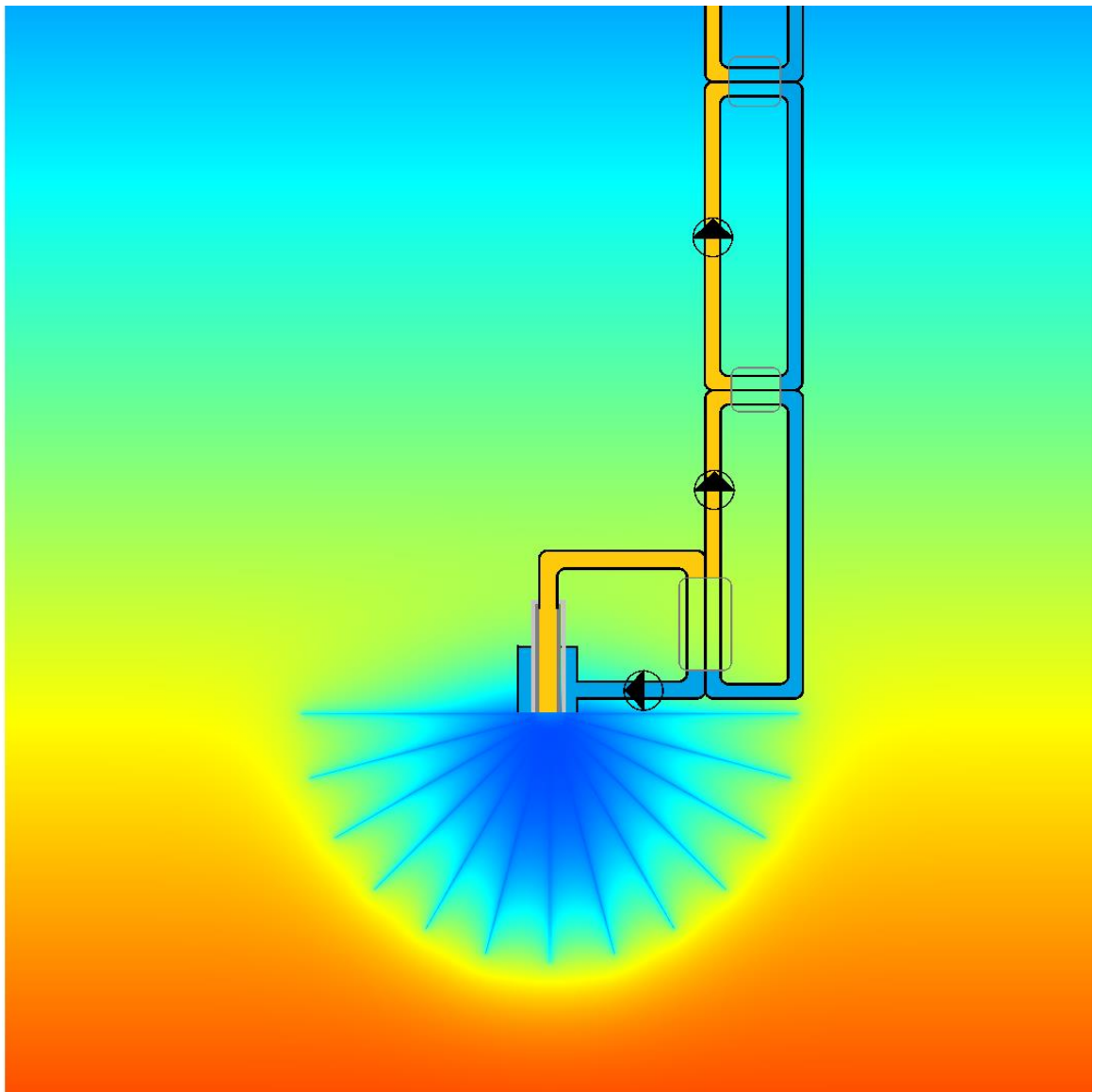


Pyhäsalmen kaivos hiilivapaan lämpö- energiantuotannon mahdollistajana

Lasse Ahonen, Katariina Ala-Rämi, Ulla Lehtinen,
Nina Leppäharju ja Annu Martinkauppi



OULUN YLIOPISTO

Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja

Mikroyrittäjyyden tutkimusryhmä MicroENTRE ja Geologian tutkimuskeskus

ISBN 0000000 (painettu)

ISBN 0000000 (elektroninen)

ISSN 2489-3501 (painettu)

Lasse Ahonen¹, Katariina Ala-Rämi², Ulla Lehtinen², Nina Leppäharju¹ & Annu Martinkauppi¹

Pyhäsalmen kaivos hiilivapaan lämpöenergiatuotannon mahdollistajana

¹Geologian tutkimuskeskus

²Kerttu Saalasti Instituutti

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja N/20XX

Nivala /Pyhäjärvi

Tiivistelmä

Tämä raportti tarkastelee hiilivapaan geotermisen lämmön talteenottoa Pyhäsalmen kaivoksesta ja matalalämpöisen geoenergian hyödyntämistä. Maanalaisen noin 1,4 km syvän kaivoksen metallien louhinta päättyy lähitulevaisuudessa, jolloin tilat tarjoavat geotermisen energian tuotannolle poikkeuksellisen hyvät mahdollisuudet. Raportissa esitellään geotermisen energian ja sen hyötykäytön yleiset peruseriaatteen, kaivoksen geologiset ja -termiset lähtökohdat sekä konsepti geotermisen lämmön talteenottoa ja hyödyntämistä varten. Lopuksi tarkastellaan konseptin kannattavuutta, geotermisen lämmön hyödyntämistä paikallisessa kaukolämpöverkostossa sekä lämpöenergian paikallisia käyttökohteita.

Tässä hankkeessa suunniteltava ja optimoitava toteutuskonsepti pohjautuu maanalaiseen lämpökaivokenttään sekä kehitettävään kollektoriin, jolla lämpöä saadaan kalliosta tehokkaasti siirrettyä lämmönsiirtopiiriin. Kaivoksen pohjalle sijoitettu lämpökaivokenttä voidaan mitoittaa tuottamaan lähes 20-asteista vettä useiden megawattien teholla, jolloin vuotuinen lämpöenergian tuotanto voi nousta kymmeniin gigawattitunteihin ja lämpöpumpulla tuotettu lämpötilataso 70 – 90 asteeseen.

Geotermisen energian hyödyntäminen luo kasvualustan kehittää uusia teknologioita ja palveluja sekä yrityksiä kaivosympäristössä. Saadut tulokset tukevat visiota, jossa Pyhäsalmen kaivosalueesta ja ympäröivästä taajamasta kehittyy uusiutuvien energiamuotojen pilotointi- ja esimerkkikohde, joka herättää yritysten ja yhteisöjen kiinnostusta Suomessa ja ulkomailla.

Asiasanat: geotermisen lämpö, hiilivapaa lämpöenergia, Pyhäsalmen kaivos, kaivosvesi, liiketoimintapotentiaali

Lasse Ahonen¹, Katariina Ala-Rämi², Ulla Lehtinen², Nina Leppäharju¹ & Annu Martinkauppi¹

Pyhäsalmi mine enabling carbon-free thermal energy production

¹Geological Survey of Finland

²University of Oulu, Kerttu Saalasti Institute

Publication of the University of Oulu, Kerttu Saalasti Institute N/20XX
Nivala, Finland

Abstract

This report examines the recovery of carbon-free geothermal heat from the Pyhäsalmi mine and the utilization of low-temperature geothermal energy. Extraction of metals from the about 1.4 km deep mine will end in the near future, providing exceptional possibilities to utilize underground space for the geothermal energy production.

This report presents the basic principles of geothermal energy and its utilization, geological and -thermal premises of the mine, and a concept for the recovery and utilization of heat. Subsequently, we examine the cost-effectiveness of the concept and outline the utilization of the geothermal energy in the local district heating network, as well as in the potential on-site applications.

The design concept generated and optimized in this project is based on an underground borehole field and a novel collector type transferring heat from the rock to the heat circulation loop. The heat wells placed at the bottom of the mine can be dimensioned to produce nearly 20-degree water with several megawatts power, allowing annual heat production of tens of gigawatts at the temperature range of 70 – 90 degrees by means of heat pumps.

Utilization of geothermal energy creates a platform for developing new technologies, services and enterprises within mine areas. The obtained results support the vision of Pyhäsalmi as a pilot surroundings for renewable energies that attract companies and communities in Finland and internationally.

Keywords: geothermal energy, carbon-free thermal energy, Pyhäsalmi mine, mine water, business potential

Esipuhe

Tutkimus perustuu Energiakaivos –hankkeeseen (9/2017 – 2/2020), jonka toteutuksesta vastaavat Geologian tutkimuskeskus (GTK) ja Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin (OUKSI) mikroyrittäjyyden tutkimusryhmä MicroENTRE. Hanketta rahoittavat Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR), Pyhäjärven kaupunki, Pyhäsalmi Mine Oy sekä Pyhäsalmen Energia ja Vesi Oy. Raportti pohjautuu Energiakaivos-hankkeessa syksyyn 2019 mennessä tehtyyn työhön ja saatuihin tuloksiin. GTK on vastannut tavoitteesta selvittää kuinka paljon ja millä tavoin kallioperään varastoitunutta lämpöenergiaa voidaan ottaa käyttöön, eli raportin sisällön osalta geotermisen energian sekä lämmönoton potentiaalista, kustannuksista ja ratkaisumallista. OUKSI:n vastuulla on ollut selvittää saatavan lämmön hyödyntämistapoja, geotermisen energian liiketoimintamahdollisuuksia sekä paikallisten yritysten ja energia-alan toimijoiden kiinnostusta hyödyntää näitä mahdollisuuksia.

Geologian tutkimuskeskuksessa työhön ovat kirjoittajien lisäksi osallistuneet erityisesti Jaakko Hietava ja Isa Witick (geologinen rakennemallinnus ja geotermiset tutkimukset), Mikko Pelkkala ja Satu Vuoriainen (mittaukset), Petri Hakala (lämpötilamittaukset ja mallinnus) sekä Kimmo Korhonen ja Kaiu Piipponen (mallinnus). Useat henkilöt Pyhäsalmen kaivokselta ovat edesauttaneet tutkimuksen toteutusta sen eri vaiheissa.

Tutkimuksen toteuttaneet Geologian tutkimuskeskus ja Oulun yliopiston Mikroyrittäjyyden tutkimusryhmä MicroENTRE kiittävät tutkimukseen osallistuneita ja yhteistyökumppaneita.

Lyhenteitä

ATES, Aquifer Thermal Storage, lämmön varastointi huokoiseen vesipitoiseen muodostumaan

BTES, Borehole Thermal Storage, lämmön varastointi kallioon porareikien avulla

CHP, Combined Heat and Power (plant), lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos

COP, Coefficient of Performance, suom. (lämpöpumpun) **tehokerroin**

CTES, Cave Thermal Storage, lämmön varastointi vedellä täytettyyn luolaan

DTH, Down-the-hole (drill), suom. **uppoporaus**

EGS, Enhanced Geothermal System

HDR, Hot Dry Rock

ORC, Organic Rankine Cycle

RH, Relative humidity, suhteellinen ilmankosteus (0 – 100 %)

Suureita ja mittayksiköitä

Teho (P) on työ aikayksikköä kohti, tehon yksikkö SI-järjestelmässä on watti (W).

Energia (E) tai työ (W) on tehon ja ajan tulo, energian yksikkö SI-järjestelmässä on joule (J): $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$. Tässä raportissa käytetään energian yksikkönä pääasiallisesti wattitunnin (Wh) kerrannaisia (milli-, kilo-, mega-, giga-).

Lämpövuoto (tarkemmin lämpövuon tiheys) on pinta-alayksikön läpi virtaava lämpöteho (esim. mW/m^2).

Lämpötila (T) ilmaistaan normaalisti celsiusasteikolla ($^{\circ}\text{C}$), mutta joissain yhteyksissä käytetään absoluuttista lämpötila-asteikkoa: $1 \text{ kelvin (K)} = 273.15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kahden lämpötilan erotus on numeroarvona sama molemmissa asteikoissa.

Lämmönjohtavuus (λ tai k) kuvaa tässä raportissa sitä miten hyvin lämpö virtaa kalli-ossa. Dimensiona on teho jaettuna virtauksen aiheuttavalla lämpötilaerolla kahden pisteen välillä, yksikkö $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Lämpökapasiteetti (C) kuvaa kuinka paljon kappale (kivi) lämpenee/jäähtyy (ΔT), kun lisätään/poistetaan tietty määrä lämpöenergiaa. Ominaislämpökapasiteetin yksikkö massayksikköä kohti on $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Materiaalin tiheys huomioiden käytetään tässä raportissa myös yksikköä $\text{kWh}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$.

Tässä raportissa käytetään monien suureiden (energia, teho, aika, valuutta) yksiköiden yhteydessä tuhatkerrannaisia:

milli-	(m)	= tuhannesosa, 10^{-3}	mW
kilo-	(k)	= tuhatkertainen, 10^3	kW
mega-	(M)	= miljoonakertainen, 10^6	MW
giga-	(G)	= miljardikertainen, 10^9	GW
tera-	(T)	= triljoonakertainen, 10^{12}	TW

Sisälllys

Suureita ja mittayksiköitä.....	6
1 Johdanto	9
1. Tutkimuksen tausta ja tavoite.....	9
1.1 Pyhäsalmen kaivos ja sen merkitys Pyhäjärven kaupungille.....	9
2 Geoterminen energia	10
2.1 Geotermisen energian määrittely ja käsitteitä.....	10
2.2 Geotermisen energian hyödyntämistavat yleisesti.....	12
2.2.1 Sähkön tuotanto	12
2.2.2 Akviferilämmön hyödyntäminen	13
2.2.3 Hot Dry Rock – Enhanced Geothermal System (HDR – EGS).....	13
2.2.4 Lämpökaivo	14
2.2.5 Kaivos lämmönlähteenä	16
2.2.6 Lämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla.....	17
2.3 Geoterminen energia Suomessa	18
2.3.1 Yleistä	18
2.3.2 Suomen matalan geotermisen energian potentiaali.....	20
2.3.3 Suomen syvän geotermisen energian potentiaali	21
3 Energiakaivos – geoterminen projekti	24
3.1 Projektin kuvaus	24
3.2 Pyhäsalmen kaivoksen geologinen ja geoterminen kuvaus	25
3.3 Geotermisen lämmön talteenoton tekninen toteutus.....	29
3.4 Pyhäsalmen geoterminen potentiaali	32
4 Energiakaivos - geotermiset liiketoimintamahdollisuudet.....	36
4.1 Kaivosalueen kuvaus	36
4.2 Kaivosalueen energian käyttö ja lämmitys	37
4.3 Pyhäsalmen geotermisen energian kustannukset ja käyttökohteet	38
4.3.1 Ratkaisumalli	38
4.3.2 Kustannuslaskelmat	39
4.3.3 Alueellinen kaukolämpö.....	42
4.3.4 Lämpöenergian käyttökohteet paikallisesti	44
5 Johtopäätelmät.....	51
5.1 Pyhäsalmen geotermisen energian teknis-taloudellinen potentiaali	51
5.2 Tulevaisuuden mahdollisuudet ja vaihtoehdot.....	51
Lähdeluettelo	54
Liite 1. Työpajojen materiaalia	57
Liite 2. Kaivosalueen layout.....	59

1 Johdanto

1. Tutkimuksen tausta ja tavoite

Pyhäjärven kaupungissa sijaitseva Pyhäsalmen kaivos tarjoaa poikkeuksellisen hyvän tutkimus-, kehitys- ja demonstraatioympäristön tulevaisuuden hiilivapaalle energiantuotannolle. Pyhäsalmen kaivoksen toiminta on päättymässä tulevina vuosina ja kaivosalueelle haetaan uusia käyttökohteita. Vuosina 2017–2020 toteutettava Energiakaivos-hanke tutkii ja kehittää kaivokseen liittyvän geotermisen energiantuotannon ratkaisuja ja niihin liittyvää uutta liiketoimintapotentiaalia. Olemassa olevat geotermisen energian sovellukset perustuvat maan pinnalta tapahtuvaan lämmön pumppaamisen käyttäen vesitäytteisiä reikiä tai muita vesitäytteisiä maanalaisia tiloja. Syvällä maan pinnan alla toimiminen tarjoaa lämmön talteenottoon huomattavasti tehokkaammat vaihtoehdot, joiden tutkiminen muualla vaatisi suuria investointeja. Pyhäsalmen kaivos on kaivoksenakin poikkeuksellisen syvä, joten se tarjoaa ainutkertaisen mahdollisuuden tutkia aikaisemmista poikkeavan konseptin teknistä ja taloudellista toimivuutta.

Tässä raportissa esittelemme geotermisen energian ja sen hyötykäytön peruseriaatteen, ensin yleisesti maailmanlaajuisella tasolla ja sitten tarkennamme Suomen olosuhteisiin ja kaivosvesienergiaan. Erilaisista geologisista olosuhteista ja termisen energian käyttötarkoituksista johtuen on olemassa hyvin erilaisia teknisiä toteutuksia, joiden avulla energiaa on otettu hyötykäyttöön. Tämän takia tarkastelu keskittyy teknisiin ratkaisuihin siinä laajuudessa kuin ne mahdollisesti liittyvät kaivosympäristön lämpöenergiaan ja pureudumme ratkaisutapoihin erityisesti Pyhäsalmen kaivoksen olosuhteet huomioiden. Tämän jälkeen tarkastelemme geotermisen lämmön hyödyntämistä Pyhäjärven kaukolämpöverkostossa sekä matalalämpöisen lämpöenergian käyttökohteita. Lopuksi luomme tulevaisuuden vision Pyhäsalmen kaivosalueesta hiilivapaan energian tuotannon ja hyödyntämisen demonstraatiokohteena.

1.1 Pyhäsalmen kaivos ja sen merkitys Pyhäjärven kaupungille

Pyhäjärven kaupungin kannalta keskeinen lähtökohta tälle tutkimukselle ovat kaivoksen ehtyvät mineraalivarat ja tarve löytää hyvässä kunnossa olevalle maanalaiselle rakennetulle ympäristölle korvaavia käyttötarkoituksia. Pyhäjärven kaupungin asukasmäärä on noin 5300 ja on arvioitu, että vuonna 2040 asukasmäärä olisi 4700. Kaikkiaan Pyhjäjärvellä oli vuonna 2016 yhteensä 1688 työpaikkaa (Pyhäjärven kaupunki, 2019). Pyhäsalmen kaivos on työllistänyt suoraan noin 200 henkilöä. Lisäksi kaivoksella on työskennellyt noin 60 alihankkijoiden työntekijää. Useat paikkakunnan metallialan yritykset tekevät töitä kaivokselle. Jyväskylän yliopiston laatiman selvityksen mukaan kaivoksen synnyttämät työllisyysvaikutukset ovat noin 760 henkilötyövuotta, mikä merkitsee noin 40 % Pyhäjärven työpaikoista. Lisäksi kaivostoiminnan vaikutus kunnan vuotuisen kunnallisverokertymään on arviolta yli 3 miljoonaa euroa. Täten kaivoksen työntekijöiden kunnallisverokertymä ja kaivoksen yhteisövero on kattanut lähes 30 % kaupungin verotuloista.

Pyhäjärven kaupungin pääosin omistama Pyhäjärven Callio (Pyhäsalmen Kvanttikiinteistöt Oy) on toteuttanut useita hankekokonaisuuksia, jotka tähtäävät kaivoksen uusiokäytön toimiviin vaihtoehtoihin kuten kaivoksen hyödyntäminen datakeskuksen sijaintipaikkana, pumppusäätövoimalana, testaus- ja pelastustoiminnassa sekä kasvien ja

hyönteisten kasvatuspaikkana. Kaivosyhtiö on luovuttanut Calliolle ensioikeudet kaikkene alueen ja infran uusiokäyttöön.

Kaivoksen tiloissa toimivan Oulun yliopiston Kerttu Saalasti instituutin hallinnoima maanalainen tutkimus- ja koulutusympäristö, Calliolab, osana Callio Pyhäjärveä tukee ja kytkee erilaiset uusiokäyttömahdollisuudet tieteelliseen testaukseen ja toimintaan tuottaen mm. julkaisuja, testausraportteja, opinnäytetöitä ja suosituksia erilaisista vaihtoehtoisista teknologiaratkaisuista myös geotermisen lämmön hyödyntämiseen. Esimerkkinä opiskelijatöistä on kuvassa 1 esitetty nelikenttäanalyysi kaivoksen mahdollisuuksista ja uhkista.

Vahvuudet	Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Halpaa energiaa • Halpa lämmitys/jäähdytys • Hyvät logistiset yhteydet ja valmis infrastruktuuri • Geograafisesti keskellä Suomea • Paljon tilaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Vetovoimattomuus • Tarvitaan suuria investointeja • Kaupungin pieni asukasluku • Kaukana isommista kaupungeista
Mahdollisuudet	Uhat
<ul style="list-style-type: none"> • Kaivoksen työntekijät mahdollista kouluttaa uusiin tehtäviin • Valmiita ja potentiaalisia tiloja monipuoliseen toimintaan • Ainutlaatuisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Saadaanko toimintaa kaivokseen • Työntekijöiden uudelleen työllistymiseen heikot mahdollisuudet • Työntekijöiden pois muuttaminen • Verotulojen menetys

Kuva 1. Pyhäsalmen kaivosalueen uusiokäytön nelikenttäanalyysi (pohjautuu opiskelijatyöhön ryhmä Niinimäki, Kangasharju, Köykkä, Kantola).

Koko Suomen tulevaisuuden energiaratkaisujen kannalta lähes puolitoista kilometriä syvä kaivos tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden kehittää ja demonstroida uusia ratkaisuja, jotka ovat siirrettävissä ja monistettavissa suurempiin asutuskeskuksiin, joissa vähähiilisyys ja hiilivapaaseen energiantuotantoon siirtyminen ovat keskeisiä lähivuosien haasteita.

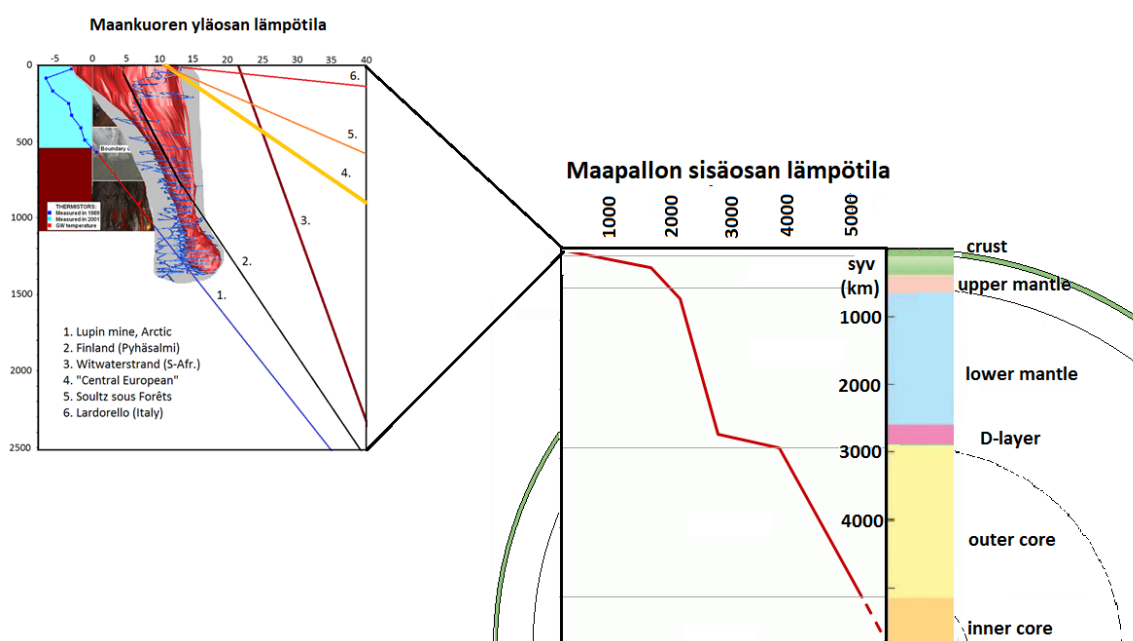
2 Geoterminen energia

2.1 Geotermisen energian määrittely ja käsitteitä

Yksinkertaisimmin määriteltynä geoterminen energia on maankamaran lämpöä. Suomessa jalkojemme alla oleva maankamara jaotellaan geologisesti maaperään ja kallio-perään. Maaperä koostuu peruskallion päälle viime jääkauden aikana ja jälkeen (noin 10000 vuotta sitten) asettuneista löyhistä ja huokoista kerroksista, joita ovat esimerkiksi moreenit, savet ja hiekat. Kallioperä on kiinteän maankuoren ylintä osaa, joka Suomessa löytyy yleensä läheltä maan pintaa. Esimerkiksi Keski-Euroopassa Suomen peruskalliota vastaavat kivilajit saattavat löytyä vasta jopa kymmenen kilometrin syvyydestä ja peruskallion (*basement rock*) päällä on erilaisia vuosimiljoonien kuluessa syntyneitä kerroskivilajeja, joiden ominaisuudet kuten huokoisuus ja siten vesipitoisuus saattavat olla huomattavasti suurempia kuin kiteisen kallioperän huokoisuus.

Maapallon manttereellinen kuori (*crust*) on yleensä noin 30– 60 km paksu kiteisistä kivilajeista (peruskalliosta) muodostunut maapallon mittakaavassa hyvin ohut kerros (kuva 2).

Kuvassa 2 on myös kaavamainen esitys lämpötilan kasvusta maapallon sisäosiin mentäessä. Maapallon ytimessä lämpötila on nykykäsityksen mukaan 6000 asteen luokkaa. Syvältä maapallon lämpimästä sisäosasta on siten jatkuva lämpövuoto maapallon pinnalle. Maapallon ytimen lämpö on pääosin ”alkuperäistä” eli syntynyt planeetan tiivistyessä ja puristuessa kasaan painovoiman vaikutuksesta. Toinen merkittävä lämmönlähde maapallon sisällä ovat eräät alkuaineet, joilla on itsestään hajoavia ja samalla lämpöä tuottavia radioaktiivisia isotooppeja. Tärkeimmät radiogeenistä lämpöä tuottavat alkuaineet (uraani U, torium Th ja kalium K) ovat kuitenkin hyvin selvästi rikastuneet maapallon kuorikerrokseen.



Kuva 2. Geotermiset olosuhteet maankuoren yläosassa ja koko maapallon mittakaavassa.

Maan syvyyksistä tuleva lämpövuoto koostuu pääosin näistä kahdesta edellä mainitusta lämmönlähteestä, joiden osuus geotermisestä lämpövuodosta on likimain samaa suuruusluokkaa ja voi vaihdella myös alueellisesti riippuen kuoren kivilajien lämmöntuotosta. Maapallon sisältä tuleva geoterminen (lämpö)vuoto on suuruusluokaltaan vaihteluvälillä 30–150 mW/m² riippuen lähinnä maankuoren paksuudesta ja maankuoren radiogeenisestä lämmöntuotosta. Valtamerien ohuen kuoren läpi virtaa keskimäärin jonkin verran enemmän lämpöä (suuruusluokka >100 mW/m²) kuin hyvin paksun mantereisen kuoren läpi. Suomessa geoterminen lämpövuoto on suuruusluokkaa 30–60 mW/m².

Hyvin suuressa mittakaavassa maapallon pinta koostuu plastisen manttelin (*mantle*) päällä ”kelluvista” mannerlaatoista, jotka toisiinsa törmätessään muodostavat vuoris-
toja tai repeävät muodostaen hautavajoamia ja uusia merialueita. Näillä vyöhykkeillä

ja alueilla syvyyksien geoterminen lämpö pääsee monin paikoin lähelle pintaa synnyttäen tuliperäisiä vyöhykkeitä. Usein nimitys ”geotermiset alueet” käsittää nimenomaan nämä alueet. Esimerkiksi runsaasta geotermisestä energiasta nauttiva Islanti sijaitsee Euraasian ja Pohjois-Amerikan mannerlaattojen erkanemisvyöhykkeessä. Toscanan alueen tuliperäisyys (esim. Lardorello, kuva 2) Italiassa liittyy Afrikan ja Euraasian laattojen puristumiseen toisiaan vasten ja Reinin laakso Saksan ja Ranskan rajamailla (esim. Soultz sous Forêts, kuva 2) liittyy mannerlaatan sisäiseen repeämään sekä siitä johtuvaan hautavajoamaan (*rift*).

Geoterminen lämpövuoto ($<100 \text{ mW/m}^2$) ja sitä yli tuhat kertaa suurempi auringosta tuleva lämpövuoto ($>100 \text{ W/m}^2$) kohtaavat maan pinnassa, jossa pinnan keskilämpötila on karkeasti ottaen auringon säteilymäärästä ja siten leveysasteesta riippuva. Ilmastollisista tekijöistä johtuen maanpinnan keskilämpötila voi kuitenkin vaihdella myös tietyllä leveysasteella. Suomen ja Skandinavian korkeudella jääkausiajat ja lämpimät kaudet ovat seuranneet toisiaan parin viimeksi kuluneen vuosimiljoonan aikana. Maanpinnan lämpötila heijastuu maankuoren yläosan lämpötilaan, joka pyrkii tasapainottumaan pinnan lämpötilan kanssa. Hyvin kylmissä olosuhteissa ikirouta voi ulottua hyvin syvälle kallioperään, kuten esimerkiksi Lupin’in entisessä kultakaivoksessa arktisessa Kanadassa 570 m:n syvyyteen (Ruskeeniemi *et al.* 2004). Toisaalta tasaisen kuumassa Etelä-Afrikassa auringon lämpö ylläpitää lämpimät olosuhteet myös maankuoren yläosassa. Kuitenkin siellä Witwaterstrandin kultakaivoksissa kaivostyötä tehdään syvimmillään lähes neljän kilometrin syvyydessä alle 60 asteen lämpötilassa (Jones 2018). Yhteistä Suomen, arktisen Kanadan ja Etelä-Afrikan geologialle on kiteinen hyvin lämpöä johtava peruskallio.

Keski-Euroopan sedimenttikivialueet erottuvat kuvassa 2 termisiltä olosuhteiltaan aivan eri ryhmäksi. Siellä lämmitykseen riittävä 50 – 60 asteen lämpötila saavutetaan laajoilla alueilla jo noin puolentoista kilometrin syvyydessä. Pääasiallisena syynä ovat siellä huokoiset, vesipitoiset ja huonosti lämpöä johtavat sedimenttikivilajit, jotka muodostavat maankuoren pintaosaan lämpöä eristävän ja keräävän ”peiton”, jota syvemmät lämpöä tuottavat rakenteet voivat vielä tehostaa. Lisäksi tunnetaan poikkeuksellisen korkean radiogeenisen lämmöntuoton omaavia kiteisen syväkiven muodostumia kuten Cornwall’in graniitti, jossa yhdistyvät hyvä kiven lämmönjohtavuus ja samalla melko suuri lämpötilagradientti syvemmälle mentäessä.

2.2 Geotermisen energian hyödyntämistavat yleisesti

2.2.1 Sähkön tuotanto

Hyvin kuumia geotermisen energian lähteitä hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan sähkön tuotannossa, joka perustuu pääasiassa höyryturbiinitekniikkaan. Hyvällä hyötysuhteella toimiva höyryturbiini edellyttää suuruusluokaltaan yli 10 bar’in höyrynpainetta, joka vastaa lähes 200 °C veden lämpötilaa. Tälle lämpötila-alueelle päästään melko lähellä maanpintaa mm. Toscanan alueella Italiassa. Lämpötilan jäädessä höyryturbiinivoiman kannalta alhaiseksi voidaan sähkön tuotannossa soveltaa binääritekniikkaa, jossa maasta lämmönvaihtimelle tuleva kuuma vesi höyrystää alhaisemmassa lämpötilassa höyrystyvää nestemäistä orgaanista ainetta suljetussa järjestelmässä (Or-

ganic Rankine Cycle, ORC). Fysiikan lakien mukaisesti lämpövoimakoneen hyötysuhde pienenee lämpötilaeron (höyrynpaine-eron) pienentyessä. ORC-tekniikalla pystytään tuottamaan jonkin verran sähköenergiaa geotermisestä energiasta ja teollisuuden hukkalämmöstä lämpötila-alueella 70–120 °C (esim. <https://climeon.com>) ja jopa jonkin verran alemmastakin lämpötilasta mutta ei Pyhäsalmen kaivoksen pohjalla vallitsevasta lämpötilasta.

2.2.2 Akviferilämmön hyödyntäminen

Akviferi tarkoittaa sedimenttikivissä hyvin huokoista runsaasti vettä sisältävää ja hyvin vettä johtavaa kerrospatjaa, joka usein on vielä sekä alta että päältä huonommin vettä johtavien kerrosten rajaama. Veden lämpökapasiteetti on suuri ja pitkien aikojen kuluessa altapäin tuleva geoterminen vuo on lämmittänyt veden akviferissa, mitä lisäksi edistävät akviferin päällä lämpöeristeenä toimivat huonosti lämpöä ja vettä johtavat paksut kerrostumat. Useimmiten lämpöä hyödynnetään näistä muodostumista ns. dublettitekniikalla eli pumppaamalla lämmintä vettä toisesta kaivosta ja palauttamalla jäähtynyt vesi toisen kaivon kautta takaisin muodostumaan. Sedimenttikiviympäristössä tavataan monin paikoin suoraan lämmityskäyttöön soveltuvaa 50–70 -asteista vettä noin 1,5–2,5 kilometrin syvyydessä. Akvifereja hyödyntävät lämpökeskukset ovat teholtaan muutamasti megawatista kymmeniin megawatteihin ja ne saattavat koostua useista pumppauskaivoista. Lämpö hyödynnetään alueellisesti suoraan kaukolämpöverkoissa. Tällaisia järjestelmiä on eri puolilla Eurooppaa vähintään useita kymmeniä, jopa satoja. Esimerkkeinä voidaan mainita Pariisin sedimenttikiviallas, jossa hyvä ”lämpöakviferi” sijoittuu sopivasti suurkaupungin läheisyyteen. Lundissa Etelä-Ruotsissa sijaitsee Pohjoismaiden oloissa poikkeuksellinen hiekkakivikerrosta hyödyntävä syvä geoterminen lämpövoimala, josta saadaan noin kilometrin syvyydestä lähes 20 °C vettä. Lämpöenergia hyödynnetään noin 50 MW:n lämpöpumppulaitoksen avulla kaukolämpöverkossa (Gehlin *et al.* 2015).

2.2.3 Hot Dry Rock – Enhanced Geothermal System (HDR – EGS)

Geotermisten sedimenttikivien hyödyntämisen ja geofysikaalisen tutkimuksen myötä kehittyi ajatus, että kerrostumien alla on tai voi olla kuumentava lämmönlähde, kuten magmakivi. Kiteiset peruskallion kivet eivät kuitenkaan ole huokoisia ja vesipitoisia vaan pikemminkin ”kuivia”. Systemaattinen HDR-konseptin tutkimus ja kehitys alkoi Fenton Hill-kohteessa Uudessa Meksikossa Yhdysvalloissa 1970-luvulla (Laughlin 1981, Tenzer 2001). Fenton Hill oli jo tällöin tunnettu geotermisesti mielenkiintoisena paikkana mm. kuumien lähteiden perusteella, ja kairattaessa kerroskivien läpi päästiin noin 600 metrin syvyydessä kuumaan kiteiseen peruskallioon (96 °C, Reiter *et al.* 1976). Tämän pohjalta kohteessa kairattiin tutkimusreikiä noin 3–4 km:n syvyyteen tutkien ja testaten veden kiertoa ja kuumentumista reikiä yhdistävien rakoverkostojen välillä. Rakoverkostojen avautumista ja veden kiertoa parannettiin syöttämällä kallion rakoihin vettä erittäin korkealla, jopa lähes 1000 bar’in paineella. Termi ”Enhanced Geothermal System”, EGS, on sittemmin vakiintunut kuvaamaan vastaavia geotermisiä järjestelmiä, joissa ”painehalkaisu”, so. peruskallion rakoilun lisääminen ja stimulointi on tavoitteena. Merkittävä järjestelmän toimintaan vaikuttava tekijä on kallion

jännitystila: lämmönsaannin suhteen hyviä tuloksia on saavutettu geotermisesti aktiivisilla mannerlaattojen repeämisvyöhykkeillä kuten Reinin hautavajoaman alueella. Siellä ongelmaksi on kuitenkin muodostunut kallioperän vetojännitystilasta johtuva vyöhykkeiden tektoninen aktiivisuus, joka saattaa purkautua maanjäristyksinä. Seisminen monitorointi on tärkeä osa EGS-projekteja myös siksi, että sen avulla voidaan nähdä mihin suuntiin painestimulointi synnyttää vettä johtavaa rakoilua.

EGS-projektien päätarkoituksena on tähän saakka ollut päästä riittävän kuumaan kalliioon, jotta lämpöä voitaisiin hyödyntää sähkön tuotannossa. Sitä vastoin Suomen oloissa hiilivapaan lämpöenergian tarve asutuskeskuksissa on ollut edistämässä Espoon Otaniemessä meneillään olevaa projektia, jossa painestimuloinnilla on tarkoitus saada aikaan vesikiertoa erittäin syvälle (yli 6 km) peruskallioon porattujen lämpökaivojen välille ja siten tuotettua lähes sata-asteista vettä kaukolämpöverkkoon. (<https://www.st1.fi/geolampo>).

2.2.4 Lämpökaivo

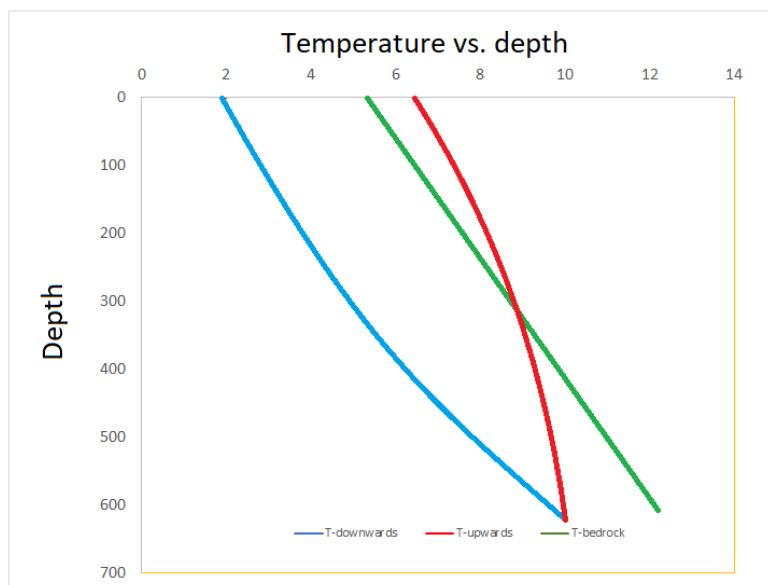
Suomessa matalan lämpötilan geotermistä energiaa eli geoenergiaa, tai kansantajuisemmin maalämpöä, hyödynnetään pääasiassa kalliioon poratun lämpökaivon eli energiakaivon ja siihen asennetun lämmönkeruuputkiston eli kollektorin avulla. Termillä energiakaivo korostetaan sitä, että lämmön siirto kaivon avulla voi olla (esim. vuodenajasta riippuen) joko lämmönottoa maasta tai lämmön luovutusta viileään maahan (maaviilennys). Energiakaivon rakentamisessa suositellaan noudatettavan Suomen kaivonporausurakoitsijat ry:n eli Poratekin ohjeistusta. Ympäristöministeriö on julkaissut Energiakaivo – Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa -oppaan (Juvonen & Lapinlampi, 2013), jossa käsitellään maalämpöjärjestelmiin liittyvää lainsäädäntöä, suunnittelua, rakentamista sekä käyttöä ja huoltoa.

Lämpökaivot porataan kiteisen kallioperän alueilla kuten Suomessa ja Ruotsissa nykyään lähes aina paineilmakäyttöisellä uppoporauksella, jossa iskevä porapää on kaivon pohjassa (*percussion drilling, down-the-hole drill - DTH*). Tämä tekniikka on hyvin nopea ja kustannustehokas kuivassa kalliiossa, mutta syvällä kalliiossa vastaantuleva korkea vesipaine voi kumota paineilman tuottaman iskuvoiman. Kerroskivilajien alueilla kuten Keski-Euroopassa iskuporausta ei juuri käytetä, vaan kaivot tehdään perinteisellä kiertokairaustekniikalla. Erityisesti kaivosympäristöjen tarpeisiin on kehitetty vesipaineella toimiva iskuporaus, jonka etuna ovat mm. pienemmät pöly- ja äänihaitat (<https://www.wassara.com>). Keski-Euroopassa energiakaivojen sisäosat kollektoriputkien ja kaivon seinämän välillä on usein täytetty massalla (esim. bentoniitti), koska huokoisissa ja hyvin vesipitoisissa kivilajeissa eri kerrosten erilaisten vesien sekoittumiseen voi liittyä ympäristöriskejä. Suomessa kaivot täyttyvät yleensä itsestään kallion raoista tihkuvalla pohjavedellä, hyvin runsas vedentulo kallioporakaivoon ei ole yleistä. Tyypillisen energiakaivon halkaisija (pientaloissa) on noin 115–140 mm ja syvyys suuruusluokkaa 150 – 300 m.

Lämpökaivotekniikalle on ominaista, että kaivosta ei pumpata vettä, vaan maankamaran lämpö siirretään lämpöpumpulle suljetun kollektorin eli lämmönkeruupiirin avulla (yleensä ns. U-putki). Markkinoilla on useita erilaisia vaihtoehtoja, joissa keruuputken halkaisija, paksuus, lämmönjohtavuus, muotoilu (esim. putken sisäpinnan rihlaus) ja

konfiguraatio kaivossa vaihtelevat (putkien määrä ja sijoittelu). Keruuputkistossa lämmönkeruunesteenä käytetään Suomessa yleensä jäätymätöntä 28 % etanoli-vesiseosta.

Lämmönkeruuputkiston teho riippuu keruunesteen lämpökapasiteetista ja virtausnopeudesta niin, että nopeuden kasvaessa siirtyvä lämpömäärä kasvaa. Tarkemmin analysoiden lämmön siirto kalliosta kaivoon, kaivovedestä kollektoriputken nestekierto on ja edelleen lämpöpumpulle riippuu monesta tekijästä, joita on tutkittu mm. kuitukaapeli-lämpötilamittausten ja mallinnuksen avulla (esim. Acuña 2013). Kaivon kokonaislämpövastukseen vaikuttavat keruupiirin materiaaliominaisuudet ja kaivossa paikallaan olevan veden lämpövastus. Keruuputkessa ylöspäin ja alaspäin menevän nesteen lämpötilojen välinen vuorovaikutus (*thermal shunt/interaction*) tulisi minimoida pitämällä U-putken haarat erillään. Kaivossa seisova vesi pyrkii tasoittamaan lämpötilaeroja kaivon seinämän ja kaivossa olevien kylmempien kollektoriputkien välillä siirtäen lämpöä kylmemmälle puolelle termisen diffuusion ja mahdollisesti myös veden tiheyseroista johtuvan vapaan konvektion avulla. U-putkikonfiguraation lisäksi suljetuna lämmönkeruuputkistona käytetään jonkun verran myös kahdesta sisäkkäisestä putkesta koostuvaa koaksiaalikeräintä. Tällöin toinen nestevirta kulkee sisäputken ja ulkoputken välisessä tilassa (*annulus*), toinen sisäputkessa. Koaksiaalikollektorilla kaivon läpimitta voidaan hyödyntää paremmin ja seisova vesitila kollektorin ja kaivon seinämän välissä saadaan minimoitua. Myös kollektorin virtausvastus saadaan pienemmäksi ja kaivo voi vastaavasti olla syvempi. Kaivon syvyyden kasvaessa useampiin satoihin metreihin on myös kallion lämpötilagradientti otettava huomioon kollektorin toiminnallisessa mitoituksessa, ettei kaivon kylmempi yläosa jäähtyä keruupiirin paluuvirtaamaa. Virtauksen hidastuessa lämmönkeräys tehostuu alas mentäessä, mutta voi myös jäähtyä ylösvirtauksessa kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Kaavamainen esitys (väärin mitoitettun) kollektorin veden lämpötilasta kylmässä menoputkessa (T-downwards) ja lämmenneessä paluuvirtauksessa (T-upwards). Kallion (häiriintymätön) lämpötila vihreällä.

Lämpökaivo voi olla myös ns. avoin ratkaisu siten, että kaivoon on asennettu lähelle pohjaa menevä pumppausputki ja uppopumppu. Pumpatusta vedestä otetaan lämpö talteen, minkä jälkeen jäähtynyt vesi ohjataan takaisin kaivoon. Osa jäähtyneestä vedestä voidaan kuitenkin ohjata pois kierrosta, jolloin kaivo ottaa korvaavaa lämmintä vettä kalliosta parantaen kaivon lämmöntuottoa (*standing column well*). Lämmönsiirto kalliosta kaivon vesitilavuuteen toimii huomattavasti paremmin, jos lämpöä siirtävä vesi virtaa suorassa kosketuksessa kalliioon.

2.2.5 Kaivos lämmönlähteenä

Kaivokset ja kaivosvedet ovat tällä hetkellä kiinnostuksen kohteena hiilivapaita ja vähähiilisiä lämmönlähteitä etsittäessä. Suuri osa näistä tutkimuskohteista sijaitsee sedimenttikiviympäristön hiilikaivoksissa, joissa toisaalta kivilajien alhaisen lämmönjohtavuuden toisaalta radiogeenisen lämmöntuoton (U, Th) takia lämpötila kasvaa syvemmälle mentäessä paljon nopeammin kuin kiteisessä peruskalliossa. Hiilikaivoksia on eri puolilla maailmaa runsaasti, monen niistä ovat olleet toiminnassa yli 100 vuoden ajan. Kapeita tunneleita saattaa olla satoja kilometrejä ja kallioperä on sinänsä huokoista ja vettä johtavaa. Skotlannissa ja Keski-Englannissa on hyvin aktiivista kaivosvesienergian tutkimusta ja pilotointia (Hall *et al.* 2011). Erityisesti British Geological Survey (BGS) ja Durhamin yliopisto ovat edistämässä geotermisen energian käyttöön-ottoa perustamalla NERC-rahoituksella kaksi geoenergian havainto- ja tutkimuskeskusta (UK Geoenergy Observatory), joista toisessa kohteena on Glasgown kaupungin alla sijaitsevien hiilikaivostunnelien käyttö kaupungin lämmityksessä (Adams *et al.* 2019).

Mielenkiintoisesti tällä Brittein saarten hiilikaivosten geologisella ympäristöllä on geologinen jatke Atlantin valtameren toisella puolella Nova Scotiassa, missä Springhill'in kaupunki hyödyntää kaupungin alla sijaitsevaa 200 vuoden ajan louhittua hiilikaivosta geotermisen energian tuotannossa (CADDET, 2019)

Tietävästi suurin kaivosveteen perustuva geotermisen lämmön hyödyntämiskohde on Pohjois-Espanjassa Oviedon lähellä sijaitseva Keski-Asturian hiilikaivosalue. Vuoren rinteessä sijaitsevasta vedellä täyttyneen kaivoksen vedestä saadaan yli 3 MW:n lämpöteho, jota hyödynnetään lämpöpumppujen avulla paikallisen sairaalan sekä Oviedon yliopiston Mieresin kampuksen lämmityksessä ja viilennyksessä (Lara *et al.* 2017). Vedellä täyttyneisiin, etupäässä hiilikaivoksiin liittyviä kaivosvesi-energiahankkeita on monissa Euroopan maissa. Heerlenin kaupungissa toteutus on viety jo pitkälle integroimalla kaukolämpö ja -kylmä kaivosvesijärjestelmään, joka perustuu erillisiin ja eri syvyyteen ulottuviin lämmitys- ja viilennyskaivoihin (Verhoeven *et al.* 2014).

Edellisistä selvästi poikkeava kaivosvesienergiakohde on Michiganin Hancockissa, missä aikanaan louhittiin metallista kuparia kiteisestä vulkaanisesta kallioperästä. Kohteessa demonstroitiin 1022 m²:n rakennuksen lämmitystä 18 lämpöpumpun avulla tuotetulla 170 kW:n teholla. Lämmönlähteenä käytettiin noin 1200 m syvän kaivoksen

vettä, joka pumpattiin vedellä täyttyneestä kaivoksesta 92 m:n syvyydestä. Lämpötilatasoltaan ja –gradientiltaan kaivosvesi vastasi Suomen olosuhteita siten, että tasapainolämpötila kaivoskuilun pohjalla oli noin 16 °C. Pumppauksessa havaittiin kaivoskuiluun syntyvän selvä kerroksellisuus lämmön ja suolaisuuden suhteen niin, että lämmin, mutta suolaisuutensa takia tiheämpi, vesi ei noussut kaivoksen pohjalta pumpulle (Bao *et al.* 2018).

Yhteistä erityisesti hiilikaivossovelluksilla on, että kaivoksesta saatava vesi on melko lämmintä eli noin 20 °C luokkaa ja useissa tapauksissa päästään lisäksi suuriin tilavuusvirtaamiin, koska kaivostunneleista ja huokoisista kivilajeista käyttöön saatavaa vesitilavuutta on valtavasti, esimerkiksi Glasgown alla noin 600 km³ (vrt. Suomen järvet yhteensä n. 230 km³). Vesi voi sedimenttikivikerroksissa virrata hyvin ja kerätä lämpöä huokoisista kivilajeista laajalta alueelta. Erityisesti Keski-Asturian muodostumassa on vedenjohtavuuden kannalta erinomaisia karstiutuneita kalkkikivikerroksia. Noin 20 °C:n lämpötilataso on lämpöpumppukäytölle erinomainen, koska pumppu voi tarvittaessa tuottaa samanaikaisesti hyvällä hyötysuhteella sekä lämpöä että kylmää.

2.2.6 Lämmön hyödyntäminen lämpöpumpun avulla

Maankamaraan varastoituneen lämmön hyödyntämisessä lämpöpumppu siirtää alhaisen lämpötilatason energiaa korkeammalle, hyödyntämiskelpoiselle tasolle ulkoisen energian, yleensä sähkön avulla. Ensimmäisiä ja nykyäänkin yleisimpiä lämpöpumpun sovellutuksia ovat kuitenkin kylmäkoneet, joilla lämpöä poistetaan tilasta joka halutaan pitää kylmänä. Yleisesti ottaen lämpöpumppu nostaa lämpötilaa ”kuumalla” lauhdutuspuolella ja alentaa lämpötilaa ”kylmällä” höyrystyspuolella. Nykyaikaisissa teollisuuslämpöpumpuissa onkin usein hyödynnetty sekä lämmitys- että jäähdytysominaisuudet ja tuotetaan tarpeen mukaan sekä lämmintä että kylmää.

Lämpöpumpun lämmönlähteenä voi toimia periaatteessa mikä tahansa lämpöenergiaa sisältävä neste tai kaasu, ja tyypillisiä lämpölähteitä ovat maakamaraan lisäksi mm. vesistöt, ilma, rakennusten poistoilma ja jätelämmöt kuten esimerkiksi jätevesi.

Lämmön pumppaamiseen lämmönlähteestä tarvitaan sähköä, mutta tuotettu lämpöenergia on suurempi kuin laitteen käyttämä energia. Tätä suhdetta kuvaa lämpöpumpun lämpökerroin (COP, Coefficient of Performance), joka on määritelmän mukaan tuotettu käyttökelpoinen lämpöenergia (Q) jaettuna tarvittavalla ulkoisella energialla (W):

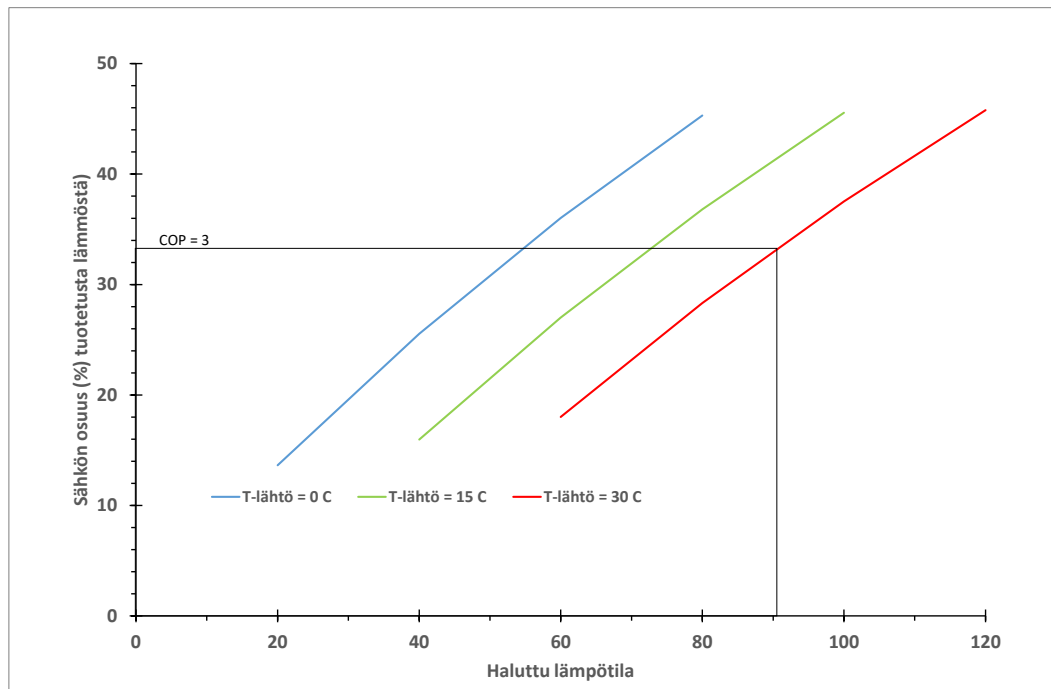
$$\text{COP} = Q/W \quad (1)$$

Lämpökerroin voidaan määritellä myös ”kylmän” puolen (T_C) ja ”kuuman” puolen (T_H) lämpötilojen avulla:

$$\text{COP} = T_H/(T_H - T_C) \quad (2)$$

Tämä COP-arvo on kuitenkin teoreettinen ja lämpötilat on annettava absoluuttisella kelvin-asteikolla, joka saadaan kun celsius-asteisiin lisätään 273,15. Kun oletetaan, että lämpöpumpulle tulee maapiiristä 0-asteista liuosta ja halutaan 35-asteista lämmitysvettä, saadaan teoreettiseksi COP-arvoksi 8,8. Käytännössä lämpöpumppuvalmistajien mittaamat ja ilmoittamat todelliset COP-arvot 0/35 lämpötilan nostolle ovat likimain puolet teoreettisesta maksimista.

Lämpökerroin riippuu siis sekä lämmönlähteen lämpötilasta että tarvittavasta lämmönjakolämpötilasta. Mitä suurempi lämpökerroin on, sitä vähemmän sähköenergiaa tarvitaan lämpöenergian tuottamiseen. Perinteisissä maalämpöratkaisuissa Suomessa ja Skandinaviassa lämpöpumpun lämpökerroin on yleensä luokkaa 3 – 4, jolloin tuotetusta lämpöenergiasta $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{4}$ on peräisin laitteen käyttämästä sähköstä ja $\frac{2}{3}$ – $\frac{3}{4}$ on peräisin maankamarasta. Lämmönlähteen lämpötila vaikuttaa paitsi lämmön pumpauksen vaatimaan sähköenergiaan myös siihen kuinka korkeaksi lämpötilataso voidaan nostaa. Jos tavoitellaan esimerkiksi perinteisen kaukolämpöverkon tarvitsemää noin 70–100 °C lämpötilaa, tarvitaan lämmönlähteestä vähintään noin 20 °C:n lämpötila. Kuvassa 4 on edellä kuvatun mukaisesti havainnollistettu lämpökaivosta saatavan lämpötilan vaikutusta COP-arvoon ja siten tuotetun lämmön hintaan likimääräisesti. Mitä lämpimämpi on lämmön lähde, sitä edullisempaa ja kuumempaa lämpöenergiaa voidaan tuottaa.



Kuva 4. Lämpökaivon antaman veden lämpötilan vaikutus sähkön osuuteen tuotetun lämpöenergian määrässä.

2.3 Geoterminen energia Suomessa

2.3.1 Yleistä

Suomessa on hyödynnetty maankamaran pintaosien lämpöä lämpöpumppujen avulla 1970–80 -luvulta lähtien. Maalämpö on perinteisesti ollut pientalojen energiaratkaisu, mutta viimeisen 10 vuoden aikana maalämmön hyödyntäminen suuremmissa kiinteistöissä ja julkisissa rakennuksissa on yleistynyt. Nykyään yli puolet omakotirakentajista

valitsee maalämmön lämmitysmuodoksi. Yleisin tapa hyödyntää maankamaran lämpöenergiaa on lämpö- eli energiakaivot, kun taas irtomaasta tai vesistöistä vaakasuuntaisella putkistolla lämpöenergian kerääminen on selvästi harvinaisempaa. Suomen Lämpöpumppuyhdistyksen tilastojen mukaan vuosina 2008–2018 on Suomessa myyty vuosittain keskimäärin 10000 maalämpöpumppua ja toimitettujen järjestelmien koko on kasvanut. Samaan aikaan lämpökaivojen poraussyvytykset ovat kasvaneet alle 200 metristä yli 300 metriin, ensimmäisiä 400 metristä jopa 800 metrin syvyyteen ulottuvia lämpökaivoja on toteutettu mm. taloyhtiökohteisiin.

Erityisesti isommissa kohteissa energiakaivokenttä voi toimia myös lämpöenergian varastona, siten että kesäkausina rakennuksen viilennyksessä vapautunut lämpöenergia ladataan kaivokenttään, jota sitten hyödynnetään talvikuukausina lämmityksen tuottamiseen. Tällaisia kausivarastoja on toteutettu Suomessa viimeisen 10 vuoden aikana useita. Energiakaivokenttä voidaan suunnitella myös mm. aurinkokeräimien tai hukkalämmön energiavarastoksi, ja erilaiset energiavarastot ovat tulevaisuudessa yhä merkittävämmässä asemassa hiilineutraaliustavoitteisiin pyrittäessä.

Maalämpö ja lämpöpumput yleensä ovat Suomessa tunnettu ja hyväksytty ratkaisumalli kiinteistöjen lämpöjärjestelmissä. Lämpöpumppu on jo osoittautunut teknisesti kypsäksi ja luotettavaksi ratkaisuksi. Megawatti-luokan teollisuuslämpöpumput ovat oleellinen osa kaukolämpö- ja kylmäverkkojen ratkaisua suuremmissa asutuskeskuksissa, joissa esimerkiksi kylmäverkon ja viemäriverkoston jätelämpö pyritään hyödyntämään lämpöpumppujen avulla. Jotta lämpöpumppuja pystyttäisiin hyödyntämään laajemmin kaukolämpöverkostossa, tarvitaan uusia lämmönlähteitä noin 20 – 30 asteen lämpötila-alueelle.

Keskisyvät, jopa 2–3 kilometriin ulottuvat lämpökaivot nähdään potentiaalisena ratkaisuna, jonka toimivuutta nyt testataan sekä laskelmien ja mallien että käytännön porauspilottien avulla. Suomen kiteinen peruskallio on kairauksen ja porauksen kannalta suhteellisen helppoa verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopan huokoisiin sedimenttikiviin verrattuna, mutta lämpötila Suomen kallioperän pintaosassa on alhaisempi. Tiedetään, että mahdollisuudet löytää vesimäärältään suuria vettä johtavia ”akvifereita” peruskalliosta ovat ilmeisen heikot, mutta toisaalta kiteinen kallioperä luovuttaa hyvän lämmönjohtavuutensa ansiosta matala-asteisen lämpöenergiansa lämpökaivoon suhteellisen hyvin.

Keskisyvä geoterminen energia on varteenotettava tulevaisuuden vaihtoehto esim. tiheään rakennetuilla alueilla, joissa olemassa oleva rakennuskanta estää useista normikaivoista koostuvan energiakaivokentän toteutuksen, ja aluelämpönä siellä, missä kaukolämpöverkostoa ei ole. Haasteena on kustannustehokkaan poraustekniikan kehittäminen. Myös keskisyvän geotermisen energian käyttöönottoa suunnitellaan toteutettavaksi kollektorin avulla, mutta kaivojen syvyys ja kustannustehokkuus edellyttävät uudenlaista tekniikkaa (esimerkiksi Qheat-konsepti [https:// www.qheat.fi/fi/konsepti/](https://www.qheat.fi/fi/konsepti/)). Perinteisessä suljetussa lämmönkeruupiirissä nesteinä käytetään jäätymisen estämiseksi etanoli-vesiseosta (28 %), kun taas korkeammassa lämpötiloissa toimivissa keskisyvissä kaivoissa kiertonesteinä voi olla vesi, eikä järjestelmän tarvitse olla välttämättä suljettu.

2.3.2 Suomen matalan geotermisen energian potentiaali

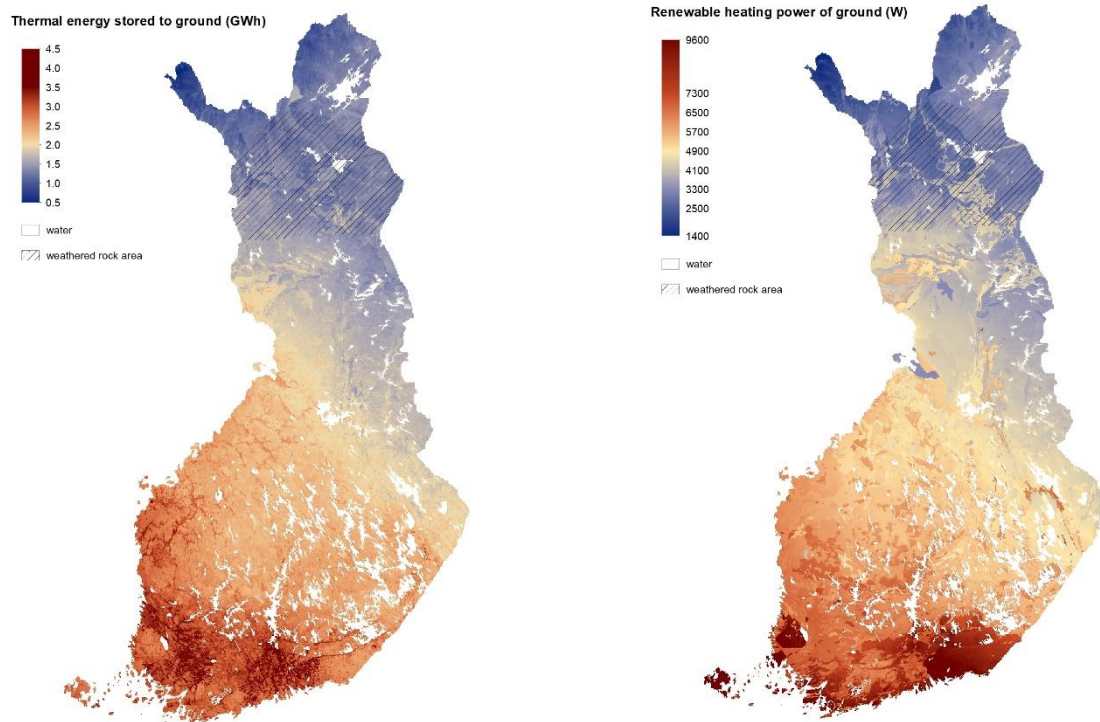
Geotermisen energian potentiaali määritellään tässä yleisesti maankamaran hyödynnettävissä olevana lämpösisältönä, joka muodostuu kolmesta komponentista:

1. Auringon lämpö
2. Geoterminen lämpövuoto
3. Maankamaraan ajan kanssa varastoitunut lämpömäärä

Geotermisen energian potentiaalia voidaan kuvata lämpötilana, -tehona tai energiana (esim. yksiköissä W tai Wh).

GTK on arvioinut kvantitatiivisesti Suomen maalämpö- eli geoenergiapotentiaalin ja kallioperän syvän geotermisen energian potentiaalin kymmenen kilometrin syvyyteen saakka. Tuloksista tuotetut kartta-aineistot osoittavat potentiaalin alueellisen vaihtelun Suomessa. Kartat ovat käytettävissä GTK:n digitaalisessa Hakku-palvelussa <https://hakku.gtk.fi/> josta löytyvät myös tarkemmat metatietokuvaukset arviointien tekemisestä ja käytetyistä lähtö-aineistoista.

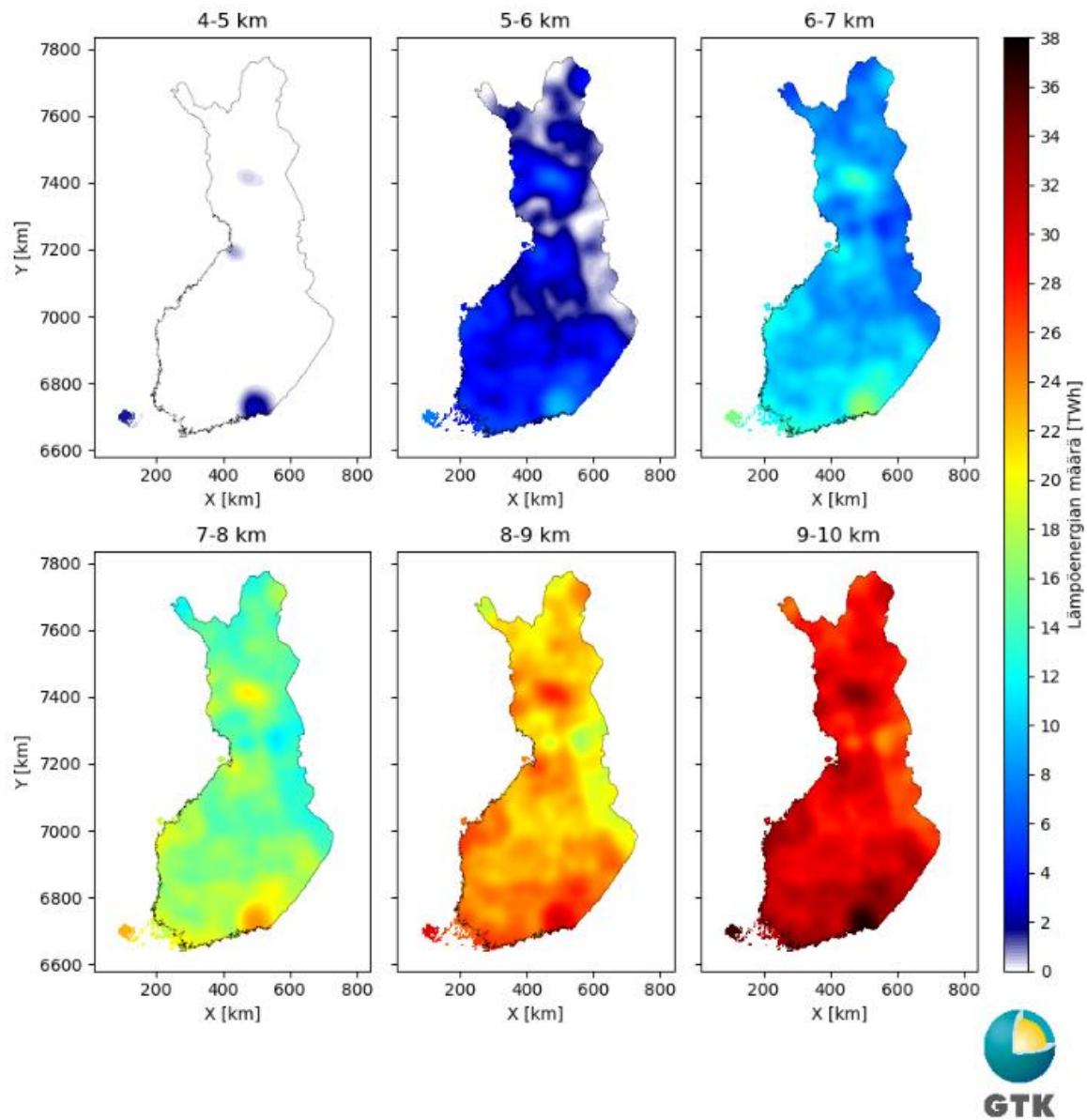
Suomen maankamaran ylimmälle 300 metrille on varastoitunut geoenergiaa noin tuhat kertaa koko maan energiantuotannon verran eli noin 300 miljoonaa GWh. Eniten geoenergiaa on Etelä- ja Lounais-Suomessa, joissa parhaimmilla alueilla yhden 300 m syvän energiakaivon energiavarasto on suuruudeltaan noin 4,5 GWh (Kuva 5). Vastaa- vasti maankamaran jatkuvasti uusiutuva lämmitysteho yhdestä 300 m syvästä energia-kaivosta on parhaimmilla alueilla noin 9600 W (Kuva 5). Arvot on saatu lämpöyhtälön aikariippuvasta numeerisesta ratkaisusta olettaen lämpökaivon seinämän pysyvän jatkuvasti 0-asteisena, eli ne kuvaavat suurinta kalliosta yksittäiseen jäätymättömään kaivoon tulevaa lämpövirtaa. Tärkeimmät laskentatulokseen vaikuttavat asiat ovat maan pintalämpötila, kivilajin lämmönjohtavuus ja geoterminen lämpövuoto.



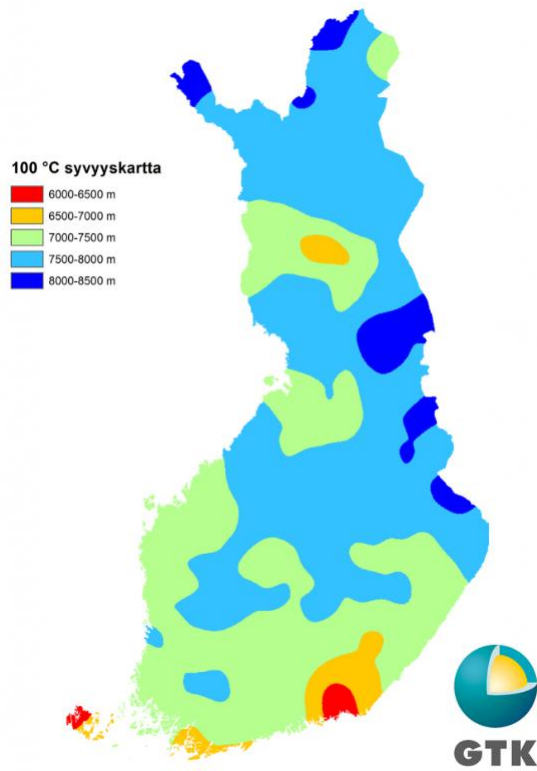
Kuva 5. Geoenergian eli maalämmön potentiaali Suomessa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on yhdestä 300 m syvästä energiakaivosta saatavissa oleva varastoituneen energian määrä (GWh) ja oikeanpuoleisessa kuvassa vastaavasti yhden 300 m syvän energiakaivon jatkuvasti uusiutuva lämpöteho (W).

2.3.3 Suomen syvän geotermisen energian potentiaali

GTK on arvioinut Suomen kallioperän syvän geotermisen energian potentiaalin 10 kilometrin syvyyteen saakka. Kartta-aineisto osoittaa kallioperään sitoutuneen lämpöenergian teoreettisen määrän siitä syvyydestä lähtien, jossa kallioperässä saavutetaan 70 °C lämpötila. Lähtöaineistona ovat maan pintalämpötila, kivilajikartan pohjalta yleistetty kallioperän lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti ja geotermisen lämpövuon, joista geotermisen energian potentiaali on laskettu syvyysväleille 4 – 5 km, 5–6 km, 6–7 km, 7–8 km, 8–9 km ja 9 –10 km (Kuva 6). Näin laskien kallioperäämme sitoutuneen lämpöenergian yhteenlasketuksi teoreettiseksi määräksi saatiin huikea, 15 291 050 TWh. Syvän geotermisen energian kartta-aineisto antaa arvion myös siitä, millä syvyydellä Suomen kallioperässä saavutetaan +100 °C lämpötila (Kuva 7).



Kuva 6. Suomen kallioperään eri syvyysväleille sitoutuneen yli 70-asteisen lämpöenergian määrä (TWh) neliökilometriä kohden.



Kuva 7. Syvyys, jossa saavutetaan 100 °C lämpötila.

3 Energiakaivos – geoterminen projekti

3.1 Projektin kuvaus

Energiakaivos-hankkeen tavoitteena on selvittää Pyhäsalmen kaivoksen hyödyntämispotentiaalia geotermisen energian tuottajana ja tähän liittyvän osaamisen kehitysalustana. Geotieteellisenä tavoitteena on selvittää kuinka paljon ja millä tavoin kallioperään varastoitunutta lämpöenergiaa voidaan ottaa käyttöön syvyysalueelta 500 –2500 m käyttäen Pyhäsalmen kaivosta kohteena.

Energiastrateginen tavoite on selvittää saatavan lämmön hyödyntämistavat ja –kelpoisuus: onko saatava lämpövuoto hyödynnettävissä osana Pyhäsalmen paikallista energiajärjestelmää, ovatko paikalliset tulokset monistettavissa muualle, missä on vastaavia olemassa olevia kalliotiloja. Toiseksi kehitetään yleispätevä konsepti maanalaiselle geolämpölaitokselle. Kolmantena tavoitteena on uusien liiketoimintamahdollisuuksien selvittäminen kartoittamalla geotermisen energian hyödyntämisessä tarvittavaa teknologiaa ja palveluita sekä paikallisten yritysten ja energia-alan toimijoiden kiinnostusta hyödyntää uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Energiakaivos-hanke käynnistyi loppuvuodesta 2017 ja päättyi helmikuun lopussa 2020. Pää toteuttajana on Geologian tutkimuskeskus Espoosta ja toisena toteuttajana Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutti Nivalasta. Hankkeen kokonaisbudjetti on 407 000 € ja päärahoittaja on Euroopan aluekehitysrahasto (EAKR) 70 % rahoitusosuudella. Pyhäjärven kaupungin lisäksi hanketta ovat rahoittaneet Pyhäsalmi Mine Oy ja Pyhäjärven Energia ja Vesi Oy.

Hankkeen konkreettisia kohdeaikaisia kohderyhmiä ovat projektiin osallistujat, Pyhäjärven kunta, Pyhäjärven Energia ja Vesi, Pyhäsalmi Mine Oy, Pohjois-Pohjanmaan yritykset.

Energiakaivos-hankkeen tavoitteisiin on toteutuksen aikana päästy neljän erillisen työpaketin kautta:

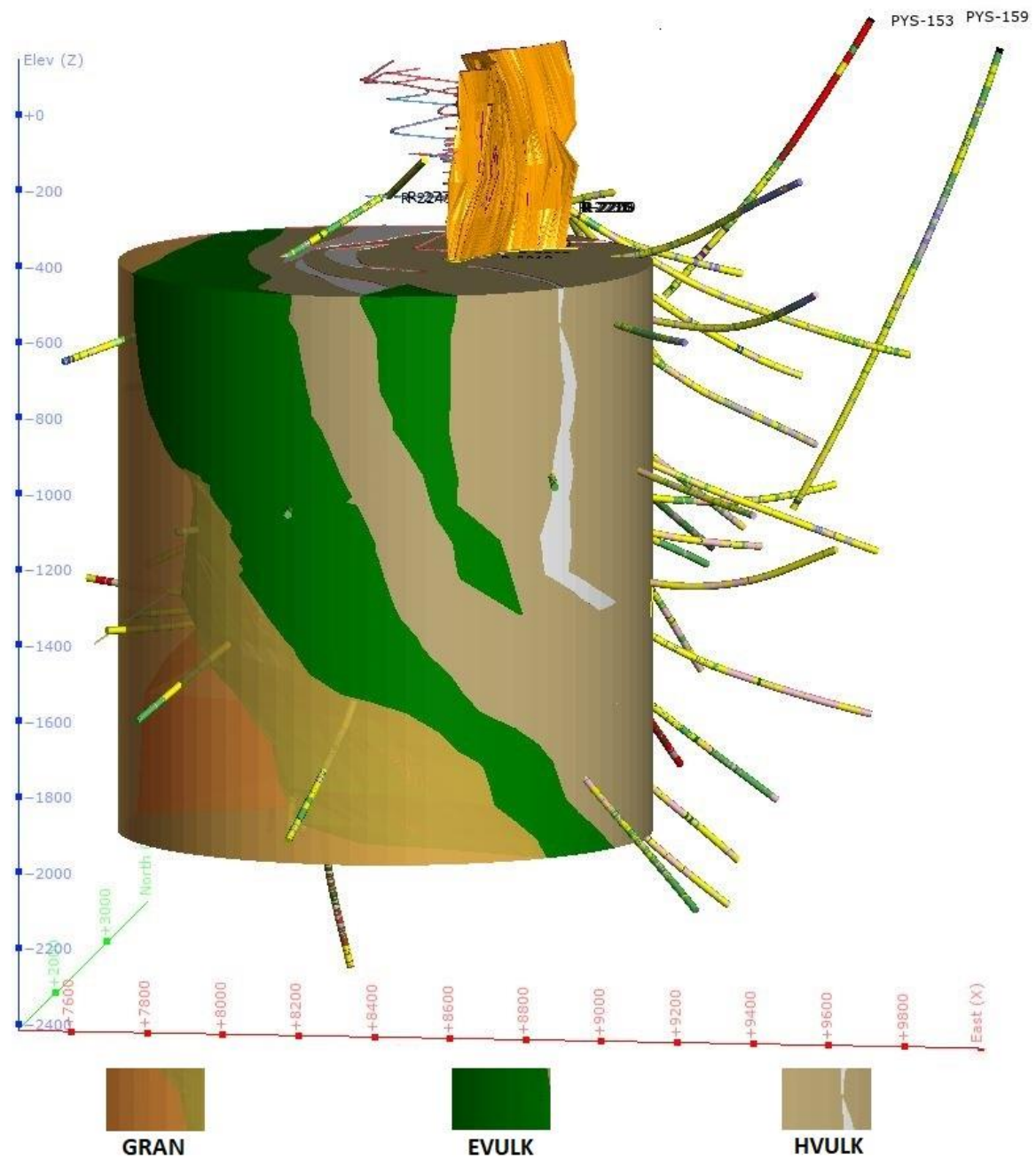
- 1) Selvitetään kiteisen kallioperän geoenergiapotentiaali
- 2) Tutkitaan geoenergian hyödyntämisstrategiat: selvitetään geotermisesti tuotetun lämmön hyödyntämismahdollisuutta Pyhäjärven kunnan kaukolämpöverkossa, arvioidaan geoenergian soveltuvuutta osaksi hajautettua lämmöntuotantoverkkoa.
- 3) Pilotoidaan lämmön talteenottoa
- 4) Selvitetään geotermisen energian potentiaali uusien yritysten kasvualustana.

Oulun yliopiston Mikroyrittäjyyden tutkimusryhmä kartoittaa geotermisen energian talteenoton luomaa uutta liiketoimintapotentiaalia paikallisesti hyödyntämällä Oulun Eteläisen alueen MicroENTRE-verkostoa sekä tekemällä selvitystyötä yhdessä Pyhäsalmi Mine kaivosyhtiön ja energia-alan toimijoiden kanssa.

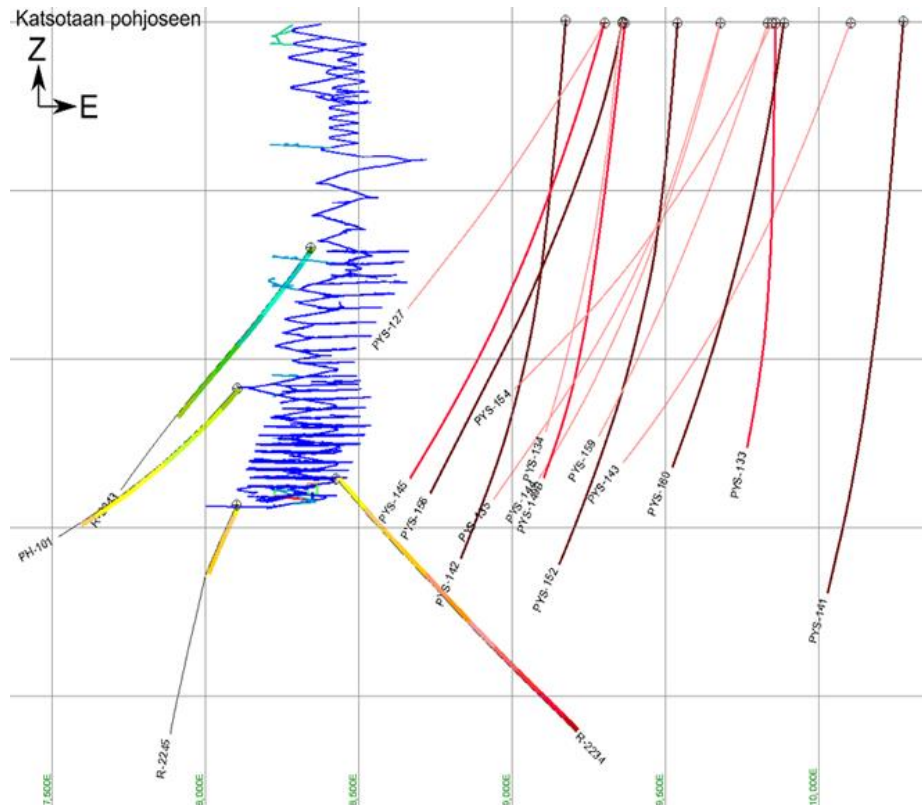
3.2 Pyhäsalmen kaivoksen geologinen ja geoterminen kuvaus

Pyhäsalmen kaivoksesta saatiin projektin käyttöön tarvittava geologinen tieto kivilajeista ja kairarei'istä tiedostoina 3D-mallia varten (*Surpac, Leapfrog*). Petrofysiikan mittauksia varten otettiin kairasydännäytteitä edustavasti kaikista tärkeistä kivilajeista. Näytteistä mitattiin lämmönjohtavuudet ja lämpökapasiteetit GTK:n laboratoriossa Espoossa. Kaivoksen geologeilta saatiin tietoa mahdollisista vettä johtavista rakenteista. Projektin puitteissa on mitattu kallioperän lämpötilaa syvistä kairarei'istä syvyyden funktiona optisella lämpötilan mittaускаapelilla (DTS). Kaivoksesta pyrittiin mittaamaan mahdollisimman paljon syviä alaspäin suuntautuvia kairareikiä ja lisäksi mitattiin lämpötiloja maan päältä kairatuista syvistä rei'istä (kuvat 8 ja 9).

Kaivoksen kivilajisto koostuu suurelta osin metavulkaniiteista eli noin 1900 miljoonaa vuotta vanhoista tulivuoren kivistä, jotka ovat metamorfoituneet korkeassa paineessa ja kuumuudessa. Ne on jaettu tämän tutkimuksen puitteissa kahteen termiseltä, kemialliselta ja mineralogiselta koostumukseltaan erilaiseen kategoriaan: happamat metavulkaniitit (HVULK) ja emäksiset metavulkaniitit (EVULK). Termi ”hapan” viittaa suurempaan piihappo- ja siten kvartsipitoisuuteen verrattuna ”emäksiseen” kiveen. Lämmönjohtavuudeltaan nämä pääluokat eroavat toisistaan selvästi. Yleisasultaan tummat emäksiset kivet ovat painavampia, joten niiden lämpökapasiteetti on tilavuusyksikössä hieman suurempi kuin happamien vulkaniittien. Yleisnimitystä graniitoidi (GRAN) on käytetty magmasyntysisistä syväkivistä (graniitti, granodioriitti, kvartsidioriitti, pegmatiitti). Happamat vulkaniitit liittyvät läheisemmin itse malmiin, emäksisten kivien ja graniitoidien osuus on suurempi malmin länsipuolella (kuva 8).

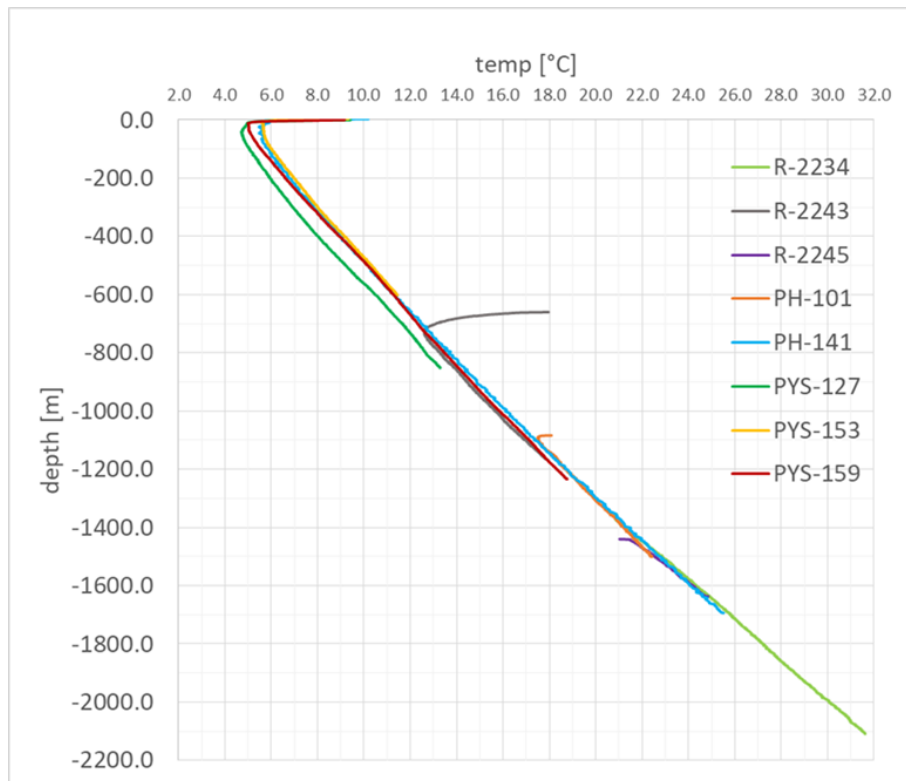


Kuva 8. Yleistetty kuva kaivoksen kivilajeista rajattuna 1400 metrin läpimittaiseen sylinteriin syvyysvälillä 500 – 2000 m (Jaakko Hietava, Isa Witick GTK). Kuvassa näkyy myös kaivoksesta ja maanpinnalta kairattuja tutkimusreikiä, joiden perusteella kivilajit on määritelty.



Kuva 9. Lämpötilan mittausreiät Pyhäsalmen kaivoksessa ja kaivoksen ympäristön syvät tutkimusreiät. Kaivoksen pohjaan vievä vinotunneli on merkitty sinisellä.

Geoterminen gradientti eli lämpötilan kasvu syvemmälle mentäessä on Pyhäsalmen kaivoksen kallioperässä keskimäärin 13 astetta kilometrillä ja kuvasta 10 tarkemmin arvioiden noin 12 astetta ylimmällä kilometrillä ja noin 14 astetta 1000 ja 2000 metrin välillä. Mittauksissa näkyy myös kaivostunnelin ja tuuletuksen vaikutus kallioseinään: 660 metrin ja 1080 metrin syvyyksillä tunnelin seinä on lämmennyt noin 18 asteen lämpötilaan, kun taas 1430-tasolla seinä on hieman häiriintymätöntä kalliota viileämpi eli noin 21 astetta.



Kuva 10. DTS-kuitukaapelilla mitattu kallioperän lämpötila syvyyden funktiona Pyhäsalmen kaivoksen tutkimusrei'istä.

Yhteenveto Pyhäsalmen kivilajien termisistä ominaisuuksista on esitetty taulukossa 1. Geotermisen lämpövuon (q) lasketaan mitatusta lämpötilagradientista (i) ja kiven lämmönjohtavuudesta (λ):

$$q = \lambda \cdot i \quad (3)$$

Kuvan 10 ja taulukon 1 lukuarvoilla saadaan geotermisen lämpövuon arvoksi Pyhäsalmen 38 mW/m².

Taulukko 1. Kolmen yleistetyn kivilajin keskimääräiset tiheydet, lämmönjohtavuudet ja lämpökapasiteetit. Aineistona 57 näytettä neljästä eri Pyhäsalmen kairareistä.

Yleistetty kivilaji		Tiheys	Lämmönjohtavuus	Lämpökapasiteetti	
		D	λ_m	C _m	C _v
	Σ	kg/m ³	W/m/K	J/ kg/K	kWh/m ³ /K
Emäksinen vulkaniitti	22	2975±76	2.27±0.16	682±22	0.56
Hapan vulkaniitti	21	2708±46	3.40±0.44	681±24	0.51
Granitoidi	14	2639±18	2.24±0.22	685±33	0.50
Koko aineisto	57	2794±156	2.92±0.61	682±25	0.53

3.3 Geotermisen lämmön talteenoton tekninen toteutus

Lähtökohtana tässä hankkeessa on ensisijaisesti lämpöenergian talteenotto kuivana pidetystä kaivostilasta, jolloin vaihtoehdot ovat oleellisesti erilaiset kuin suljetun, vedellä täyttyneen kaivoksen kyseessä ollen.

Tällä hetkellä kaivoksesta pumpataan ylös vuosittain noin miljoona kuutiometriä noin 17 °C:ista vettä, josta 7 °C:seen jäähdytettynä vapautuisi vuodessa noin 10 GWh energiaa (noin 1 MW:n keskiteho, 31 kg/s vettä). Tämän vesivirtaaman pumppaus syvältä kaivoksesta vaatii kuitenkin sähkötehoa useita satoja kilowatteja. Kaivoksesta pumpatun veden lämpö otetaan nykyään talteen lämmönvaihtimella ja käytetään kaivokseen menevän tuuletusilman lämmittämiseen. Tuuletuksen poistoilman mukana kaivoksesta ylös palaava lämpövirta on suuruusluokkaa 2–3 MW (oletuksilla 100 m³/s, 17 °C, RH 80 %). Sen talteenotto ilmalämpöpumpun avulla vaikuttaa teknisesti hyvin toteuttamiskelpoiselta.

MINERES-hankkeen puitteissa arvioitiin vedellä täyttyneen Outokummun Kaasilan kaivostunnelin lämmöntuotoksi noin 30–40 kW/km (Holopainen et al. 2013) kun laskeutakonseptina on lämmön siirtyminen kalliosta tunnelissa virtaavaan kylmään veteen. Geotermisen lämmön talteenoton peruskysymys toteutustavasta riippumatta on lämmön siirtyminen kiinteästä peruskalliosta lämpöä kuljettavaan nesteeseen. Kiven ja nesteen välisen siirtymäpinta-alan lisäksi kiven lämmönjohtavuus ja lämmönoton seurauksena kallioon syntyvä lämpötilagradientti vaikuttavat kallion saatavaan lämpövuohon.

Näin lämmön keräämisen ratkaisumalleiksi hahmottuivat projektin alkuvaiheessa:

- 1) Veden kierrättäminen kallion rakoverkostossa
- 2) Lämpökaivo

Rakoverkostoa hyödyntävä lämmönkeräys toteutettaisiin ilmeisimmin kahden tai useamman kaivon/reiän välisenä ”dublettina”, joiden välinen vettä johtava rakenne muodostaisi lämmönsiirtimen. Kaivoratkaisussa kylmä menevä nestevirta ja kaivossa lämmennyt paluuvirta ovat lähellä toisiaan ja vaikuttavat toisiinsa, kun ne kahden kaivon ratkaisuihin ovat selkeästi eri paikoissa.

Luonnollisten kallion rakosysteemien hyödyntäminen lämmönkeräyksessä osoittautui jo alustavissa tutkimuksissa erittäin haastavaksi toteutusvaihtoehdoksi. Kahta reikää yhdistävä yksittäinen tasomainen rako tai rakoparvi on vielä melko pienitehoinen ratkaisu. Merkittävän lämmönsaannin kannalta rakoilun aktiivisen lämpöä siirtävän pinta-alan täytyy olla hyvin suuri ja jakautuneena mahdollisimman suureen kalliomassa. Kiteisessä kallioperässä kallion vettä johtavan rakoilun esiintyminen ja jatkuvuus ovat vaikeasti havainnoitavia ja ennustettavia asioita. Havaittiin, että vierekkäisissä tulpatuissa paineellisissa rei’issä painetasot poikkesivat yleensä toisistaan huomattavasti. Todettiin, että niin teoriassa kuin käytännössäkin ainoa hyvin hallittavissa oleva, toteuttamiskelpoinen ja ennustettava lämmön keräystapa kaivoksenkin olosuhteissa on reikä kalliossa – eli lämpökaivo.

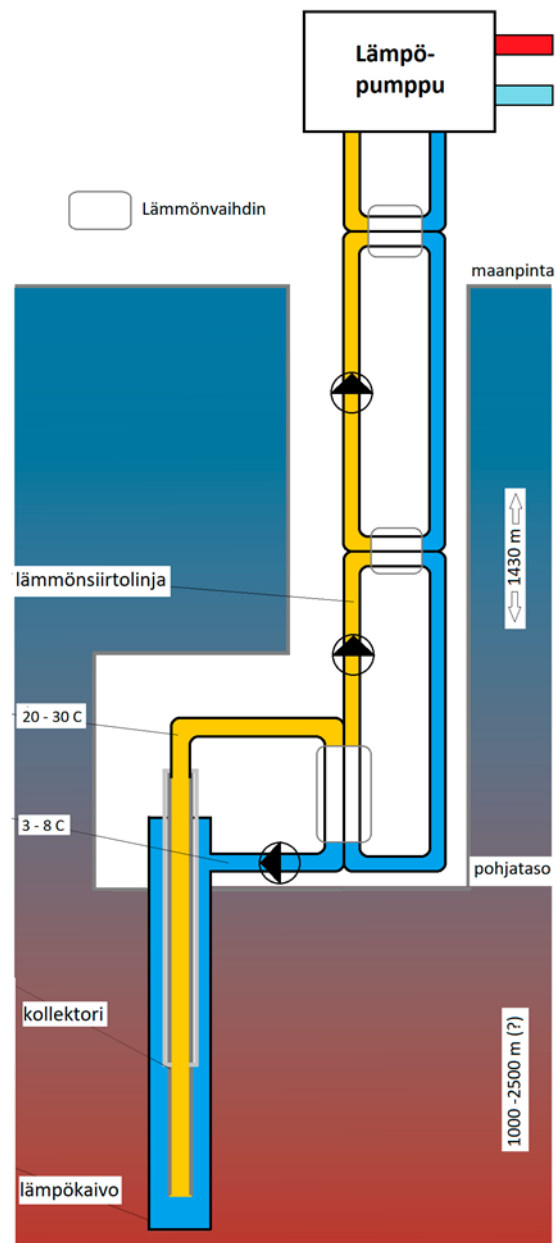
Periaatteellisella tasolla arvioitiin myös kallioreikien muodostaman ”putkilämmönvaihtimen” toteutettavuutta ja mahdollisesti saatavia etuja. Perusajatuksena oli, että lämpöä keräävä vesi virtaisi reiässä yhteen suuntaan ja paluureittinä olisi toinen reikä. Näin vältettäisiin tavallisessa lämpökaivossa tapahtuva kylmän ja lämpimän vesivirran vaikutus toisiinsa. Saavutettava hyöty tästä vaikeasti toteutettavasta ratkaisusta olisi

kuitenkin vähäinen, koska merkittävin kaivon lämmönantoon vaikuttava tekijä on kuitenkin kaivoa ympäröivän kiven lämpövastus (lämmönjohtavuus), johon taas ei voi vaikuttaa. Lämpökaivon sisäinen lämpövastus sen sijaan saadaan minimoitua käyttämällä ”puoliavointa” lämpökollektoria, jossa lämpöä keräävä vesivirta on suoraan kosketuksessa lämpöä luovuttavaan kalliopintaan ja lämmennyt paluuvirta tulee mahdollisimman nopeasti ylös lämpöeristetyssä putkessa.

Lämpökaivo kerää energiaa lähimmästä ympäröivästä kalliotilavuudesta siten, että kaivon vaikutussäde (kallion jäähtyminen) etenee ajan kuluessa. Energian saantia lisätään tarpeen mukaan poraamalla syvempiä kaivoja ja lisää kaivoja kaivokentäksi. Kaivot on sijoitettava riittävän kauaksi toisistaan, etteivät ne häiritse toistensa lämmön saantia. Yleensä lämpökaivojen välinen etäisyys on parinkymmenen metrin luokkaa, mutta jos kaivot muodostavat ladattavan lämpövaraston (*Borehole Thermal Energy Storage*, BTES), sijoitellaan ne tyypillisesti muutaman metrin päähän toisistaan. Kaivon läpimitalla ei lämmön saannin kannalta ole suurta merkitystä, koska kaivoon optimioloissa saatava lämpövirta riippuu käytännössä enemmän sitä ympäröivästä kalliotilavuudesta. Lämmön saannin kannalta monta toisistaan sopivalle etäisyydelle sijoitettua pieniläpimittaista kaivoa on huomattavasti tehokkaampi ratkaisu kuin yksi suuriläpimittainen kaivo/tunneli.

Tässä hankkeessa ensisijaisesti suunniteltava ja optimoitava toteutuskonsepti pohjautuu siten maanalaiseen lämpökaivokenttään. Lisäksi tarkoituksena on kehittää ja optimoida lämpökaivokollektori, jolla lämpö saadaan kallioista tehokkaasti siirrettyä kaivossa kiertävään veteen. Syvän kaivoksen ehdoton etu on, että lämpimään kallioperään sijoitetusta lämpökaivosta/kollektorista saadaan huomattavasti suurempi ja lämpimämpi energiavirta kuin maan pinnalta saataisiin.

Kaivoksen pohjalta saatavan lämpövirran käyttökohde sijaitsisi kuitenkin ilmeisesti maan pinnalla, joten on ratkaistava myös lämmön siirto maan pinnalle. Lämpökaivoissa kiertäneen ja lämmentyneen veden nosto maan pinnalle painovoimaa vastaan on käytännössä poissuljettu ratkaisu. Puoliavoimen maapiirin vesi tulisi todennäköisesti olemaan hyvin suolaista ja muodostaisi ongelman sinänsä, toisaalta veden pumppaaminen ylös painovoimaa vastaan kuluttaisi huomattavasti sähköenergiaa ja käytännössä söisi lämmönkeräyksen kannattavuuden täysin. Ratkaisu voisi olla suljettu pystysuuntainen vesikierto kaukolämmön tapaan (kuva 11). Haasteena tässä on erityisesti kiertoputkistoon alapäähän syntyvä erittäin korkea hydrostaattinen paine. Paineita voidaan alentaa jakamalla kierto lyhyempiin lämmönvaihdinten yhdistämiin piireihin. Toinen tutkimuksen kohteena oleva lämmönsiirron vaihtoehto on tuuletusilman lämmittäminen kaivoksen pohjalla ja lämmön talteenotto maan pinnalla ilmalämpöpumpulla, mutta tällöin osa energiasta jäisi ilmeisesti tunnelin seinämiin.



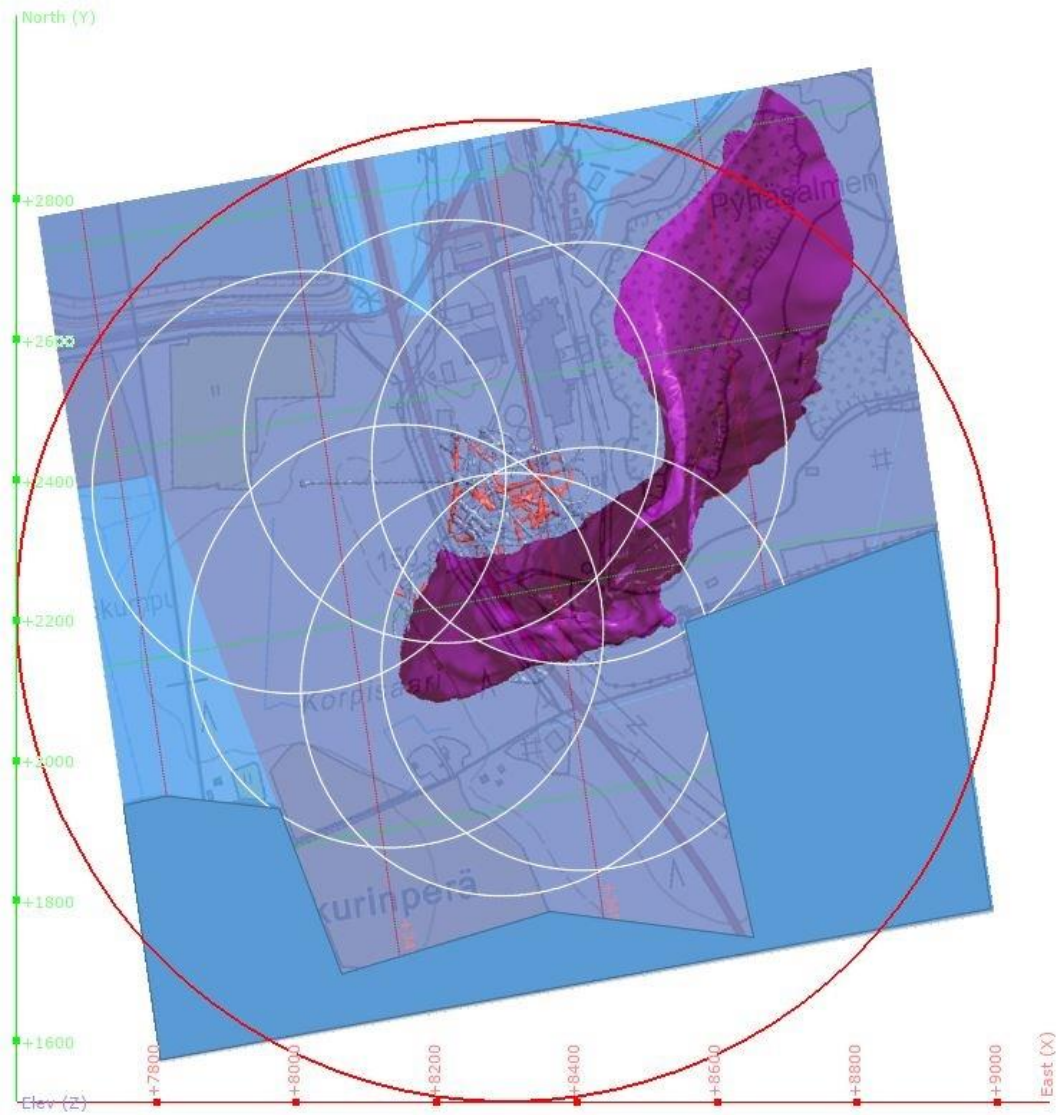
Kuva 11. Konseptikuva geotermisen lämmönoton toteutuksesta kaivoksen pohjalta.

3.4 Pyhäsalmen geoterminen potentiaali

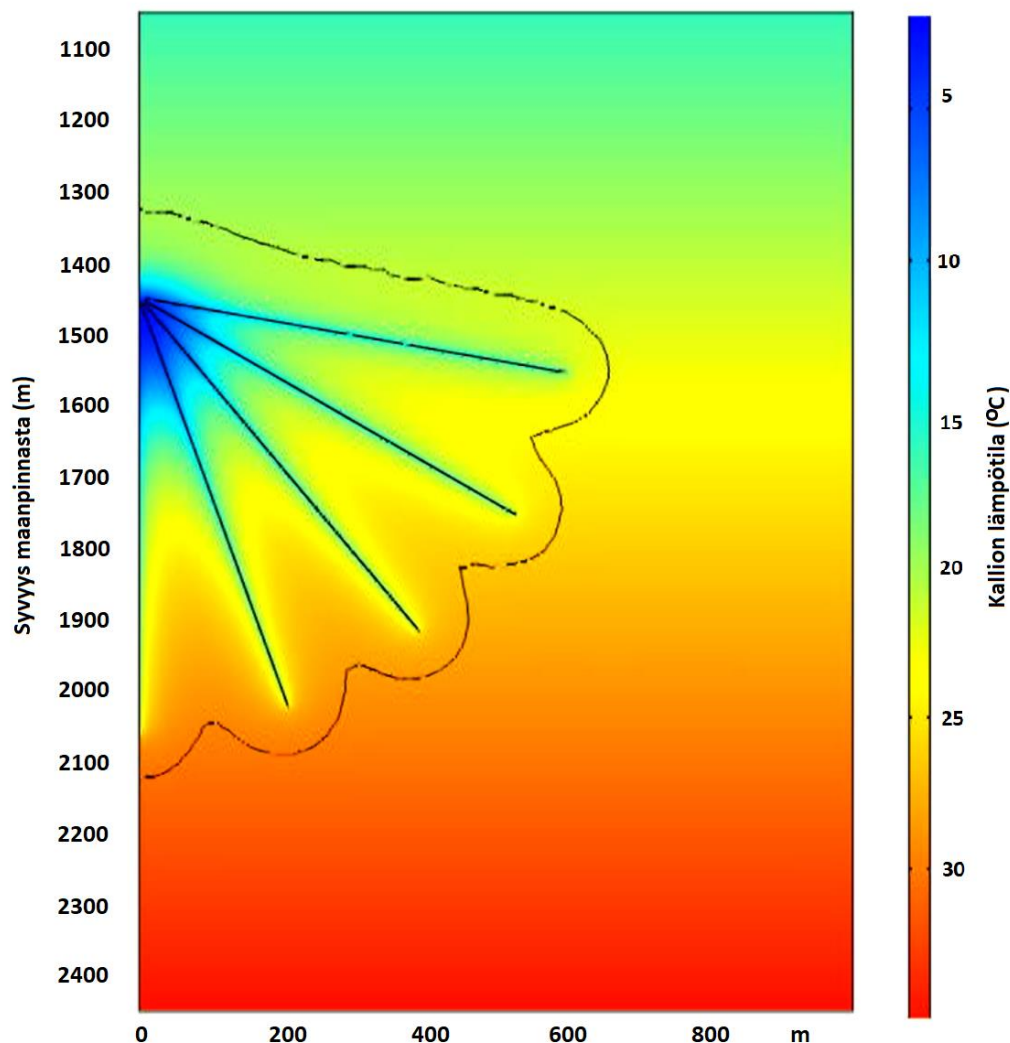
Tässä geotermisellä potentiaalilla tarkoitetaan toisaalta kallioperässä olevaa ja siitä mahdollisesti talteen saatavaa energiaa, toisaalta saatavan energian lämpötilatasoa joka puolestaan vaikuttaa energian käyttökelpoisuuteen.

Kuvassa 8 on esitetty kaivoksesta noin 700 metrin etäisyydeltä saavutettava kalliotilavuus pääkivilajeineen sylinterinä. Sylinterin seinämän projektio maan pinnalla on punaisella kuvassa 12, jossa se rajaa valkoisilla ympyröillä merkittyjä 300 metrin rei'illä katettuja mahdollisia kaivokenttäalueita. Sylinterin rajaaman 1400 metrin alapuolisen kallion lämpömääräksi saadaan 490 GWh yhden asteen lämpötila-alenemaa kohti käyttäen lähtöarvoina sylinterin tilavuutta ja kallion lämpökapasiteettia (taulukko 1). Lisäksi tulee alhaalta 58 kW geoterminen lämpövuoto sylinterin pohjan alalle (154 ha, 38 mW/m²). Lämmönotto 1 MW:n teholla alentaisi tämän kalliomassan keskilämpötilaa yhdellä asteella noin 50 vuodessa.

Lämmönotto ei kuitenkaan alenna kalliomassan lämpötilaa tasaisesti, vaan lähinnä kaivon oleva kiviseinä luovuttaa ensin lämpönsä ja viilenevä rintama etenee ajan myötä. Kuvassa 13 on havainnollistettu kallioperän jäähtymistä kaivokentästä, joka koostuu 73:sta 600 metriä pitkistä samasta pisteestä eri kulmilla lähtevästä kaivosta. Lämpövaikutus (kallion kylmeneminen) on hyvin voimakasta lähellä reikien lähtöpistettä, missä ne ovat lähellä toisiaan. Reikien etäisyyden kasvaessa 40–60 metriin alkaa niiden välillä näkyä lähes häiriintymätön lämpötilataso.



Kuva 12. Kaivoksen pohjaan sijoittuvan lämmönoton projektio maanpintakartalle (Jaakko Hietava GTK, Kimmo Luukkonen Pyhäsalmi Mine).

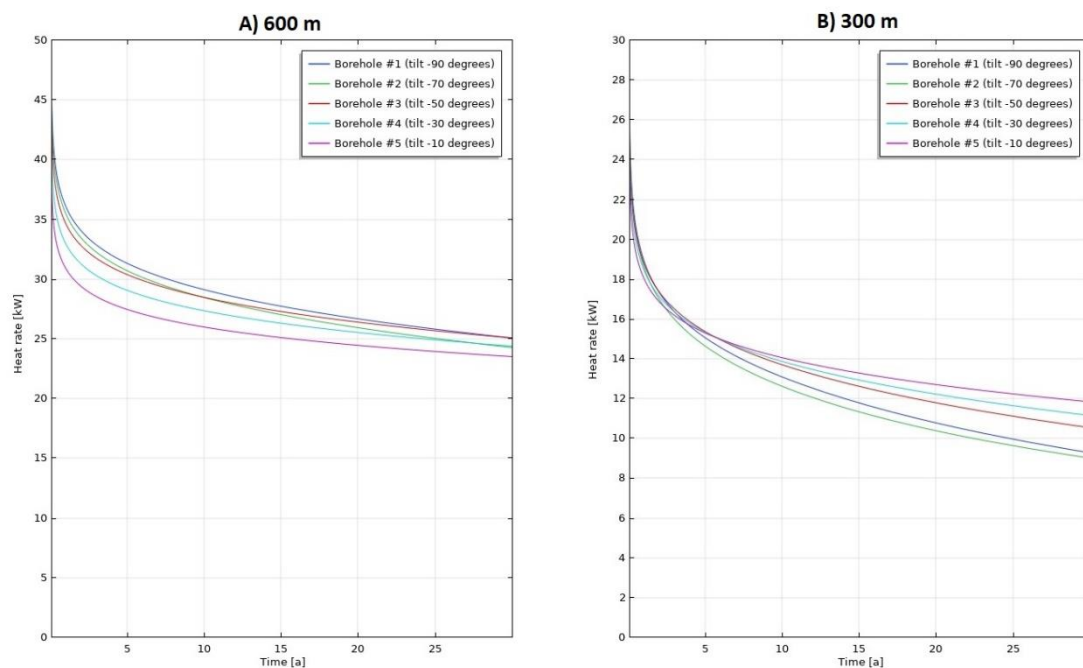


Kuva 13. Pitkäaikaisen (30 v) geotermisen lämmön pumppauksen vaikutus kallioperän lämpötilajakaumaan. Puolipallon muodostava kaivokenttä koostuu 73:sta 600 m syvästä (=pitkästä) kaivosta, jotka on porattu 20 asteen sektoreihin, kuhunkin sektoriin 20 asteen syvyyskulmavälein. Kenttää rajaava ja myötäilevä viiva on raja, jossa lämpövaikutus on 0,1 astetta (Kimmo Korhonen, GTK).

Kuvassa 14 (A) esitetään yksittäisten reikien antama lämpöteho ajan funktiona edellä kuvatussa kentässä. Koko 73 x 600 m kentän kallioperästä saama lämpöteho on tässä tapauksessa ensimmäisen vuoden kohdalla 2,5 MW (73 x 35 kW) ja vastaavasti 25 vuoden yhtäjaksoisen pumppauksen jälkeen 1,8 MW, jolloin kentästä on otettu lämpöenergiaa yli 400 GWh. Kuvasta 12 voidaan arvioida, että käytössä olevalle pinta-alalle voidaan sijoitella 3–5 kappaletta vastaavia 300 m syvistä kaivoista koostuvia kenttiä, joiden yksittäisten kaivojen lämmöntuotto on arvioitavissa kuvasta 14 (B). Kaivojen lukumääräksi saadaan näin yli 350 kpl ja kokonaistehoksi kuvan 14 B perusteella laskemalla yli 4 MW. Voidaan myös ajatella koko mahdollinen pinta-ala, noin 80 ha

(kuva 12) porattavaksi täyteen mahdollisimman pystyjä kaivoja noin 30 metrin välein, jolloin kaivojen kokonaismääräksi tulee reilut 700 kpl. Saatava lämpöteho olisi tällöin suuruusluokkaa 7–14 MW, jos kaivojen keskisyvyys olisi välillä 300 – 600 m. Tässä simulointiesimerkissä kaivojen antamaksi metritehoksi tulee noin 41 ± 1 W/m. Virtausnopeus kollektorissa on pidetty vakiona ja teho kasvaa kollektorilta tulevan veden lämpötilan nousun myötä, joka on 30 vuoden lämmönoton jälkeen noin 4 astetta vs. 8 astetta 300 ja 600 metriä syvissä kaivoissa, vastaavasti.

Kairatuista tai poratuista reikämetreistä riippuen syvältä kaivoksesta voidaan ottaa lämpötehoa useita megawatteja kymmenien vuosien ajan ilman, että lämpölähde merkittävästi hiipuu. Jatkuva lämmönotto 10 MW:n teholla (80 GWh/a) alentaa tarkastellun kalliotilavuuden keskimääräistä lämpötilaa alle 0,2 astetta vuodessa.



Kuva 14. Kaivokentän yksittäisten eri kulmaan porattujen reikien antama lämpöteho ajan funktiona.

4 Energiakaivos - geotermiset liiketoimintamahdollisuudet

4.1 Kaivosalueen kuvaus

Pyhäsalmen kaivos sijaitsee Pyhäjärven kaupungissa Pohjois-Pohjanmaan maakunnan eteläosassa, keskellä Suomea noin 450 kilometriä Helsingistä pohjoiseen ja lähellä yhteistyökorkeakouluja: Oulun yliopisto (170 km), Itä-Suomen yliopisto (150 km) ja Jyväskylän yliopisto (180 km). Pyhäjärvi sijaitsee erinomaisten liikenneyhteyksien varrella E75- ja 27-valtateiden risteyksessä. Kaupungista on kahden tunnin ajomatka viidelle eri lentoasemalle, joista yksi on kansainvälinen, Suomen toiseksi suurin Oulun lentoasema.

Kaivos sijaitsee neljän kilometrin päästä kaupungin keskustasta. Kaivosalueen vieressä sijaitsee idyllinen Ruotasen kylä. Outokumpu Oy käynnisti kaivoksen tuotannon vuonna 1962. Kaivos aloitti toimintansa avolouhoksena, mutta maanalaiseen toimintaan siirryttiin kokonaisuudessa jo vuonna 1975. Vuonna 2001 nykyisen Pyhäsalmi Mine Oy:n omistus siirtyi Inmet Mining Corporationille, jonka kanadalainen First Quantum Minerals Ltd osti vuonna 2013. Kupari ja sinkki ovat olleet kaivoksen päätuotteet. Lisäksi tuotetaan rikkirikastetta (pyriitti) sekä kultaa ja rautaa. Kaivoksella louhittiin vuonna 2018 kuparia 11 900 t ja sinkkiä 22 700 t. Vuonna 2016 kaivoksen todetut malmivarat olivat noin 3,38 Mt. (First Quantum Minerals Ltd, 2019). Maanalainen kaivostoiminta loppuu vuoteen 2022 mennessä. Tämän jälkeen pyrittiin rikastusta sivukivikasoista jatketaan arviolta viisi vuotta.

Pyhäsalmen kaivos on Euroopan syvin toimiva metallikaivos, jonka syvyys on 1445 metriä maanpinnasta. Kaivoksen syvimmältä tasolta löytyy mm. parkkipaikkoja, sähkötyöpaja, materiaalivarastoja, televiestintätila, keittiö ja ruokailutilat, sauna, suihku ja WC. Louhittuja tunneliverkostoja on kaivoksessa yhteensä toista sataa kilometriä. Kaivoksen tiloja on käytetty moniin eri tarkoituksiin mm. elokuvatuotantoon ja konserttisalin, kasvinviljelyn ja pelastustoiminnan testaustilat sijaitsevat 660 m metrin syvyydessä ja sirkkojen kasvatustilat lähellä pohjaa 1430 m syvyydessä, jossa lämpötila on noin + 25 °C. Kaivostunnelien ja kuilujen lämpötila on ylemmillä tasoilla muutamia asteita korkeampi kuin häiriintymättömän kallion lämpötila. Kaivokseen kulku tapahtuu joko vuonna 2001 rakennetulla Timon kuilun hissillä tai vinotunnelia pitkin. Matka hissillä 1440 metrin syvyyteen kestää alle kolme minuuttia ja hissien nopeus on noin 11 metriä sekunnissa. (Luttunen, 2018). Autolla ajettavan vinotunnelin on 11 kilometriä pitkä ja matka kaivoksen pohjalle kestää noin 30 minuuttia.

Maanpäällinen kaivosalue on pinta-alaltaan kaikkiaan 421 hehtaaria. Pyhäsalmen varsinaisella kaivosalueella (ks. liite 2) sijaitsevat konttorirakennus, vanha kaivostorni ja kaivostupa, rikastamo, korjaamo- ja varastorakennukset, sekä uusi kaivostupa ja kaivostorni. Pyhäsalmen kaivosalue muodostaa eheän 1960-luvun alussa rakennetun kaivosteollisuusalueen. Maakunnallisesti arvokkaita rakennuksia ovat vanha kaivostorni, konttorirakennus, rikastamo sekä Lepikon vierasmaja kaivoksen välittömässä läheisyydessä (Sweco, 2019). Kaivoksen rakennukset ovat varsin hyväkuntoisia. Korjaamo- ja varastorakennuksessa löytyy korkeita tiloja, jotka on varustettu raskaalle teollisuu-

delle soveltuvilla teollisuusnostureilla. Kaivosalueella on raideyhteys rikasteen kuljettamiseksi mm. Kokkolan satamaan ja Siilinjärvelle Yaran tehtaille. Rautatieliikennettä on nykyisin keskimäärin kaksi junaa vuorokaudessa. Kaivosalueen läheisyyteen on kaavoitettu teollisuusaluetta, jonne on suunniteltu siirrettäväksi bioenergiaterminaali sekä rakennettavaksi biohiililaitos (Ramboll, 2019).

Ruotasen kylä on kaivoksessa työskentelevien toimihenkilöiden ja työläisten asuinpaikaksi rakennettu kaivoskylä sijaiten kaivosalueen välittömässä läheisyydessä. Nykyisin alueen talot ovat yksityisessä omistuksessa. Alueella on kaikkiaan noin 300 taloutta. Kaivosalue sijaitsee lähellä Pyhäjärveä, joka on pinta-alaltaan 121,8 km². Kaivosalueen lähistö on luonnonkaunis, maaseutumainen ja metsäinen. Alueelta löytyy myös vanhoja rakennuksia kuten esimerkiksi vanhoja kyläkouluja ja maatiloja (Pohjois-Pohjanmaan rakennettu kulttuuriympäristö 2015). Kaivosalueesta etelään sijaitsee myös Pyhäjärven golfkenttä.

4.2 Kaivosalueen energian käyttö ja lämmitys

Pyhäsalmen Mine Oy:n kaukolämpöasema on rakennettu 1970-luvun loppupuolella ja lämpökattiloita saneerattu viimeksi vuonna 2013. Lämpölaitoksella on kolme lämmityskattilaa ja se on toiminut kauko-ohjauksella. Nykyisen laitoksen ylläpitäjän Adven Oy:n kanssa sopimus on voimassa vuoden 2019 loppuun. Tarkoituksena on siirtää lämpölaitoksen toiminta Pyhäjärven Energia ja Vesi Oy:n alaisuuteen. Lämpölaitos tuottaa kaivosalueelle lämpöä pelleteillä ja tarvittaessa öljyllä. Lämpölaitoksen huipputeho on ollut 3,5 MW, keskimäärin lämpölaitoksen teho on talvikuukausina 1,6 MW. Tuotettu lämpö on ollut noin 75–120 -asteista. Kaivosalueella on noin kilometri kaukolämpöputkia ja ne ovat varsin vanhoja, mistä syystä lämpöhävikkiä on runsaasti. Keskimääräinen kaukolämmön kulutus alueella on noin 6000 MWh:n tasoa vuodessa kaivos- ja rikastustoiminnan ollessa täysimääräisesti toiminnassa.

Rikastamohallin lämmityksessä hyödynnetään myös talteenottoa koneiden ja prosessin tuottamasta lämmöstä. Maanalaisen kaivostoiminnan loppuessa rikastamo tulee toimimaan vain osan vuotta, jolloin koneiden ja prosessin tuottama lämpö vähenee ja tarvitaan talviaikaan lisälämpöä. Lämmön tarve ei siis huomattavasti vähene alueella kaivostoiminnan hiipuessa. Maanalainen kaivostoiminnan lämmön tarve muodostuu ensisijaisesti puhallinilman lämmittämisestä. Kaivokseen puhalletaan jatkuvasti ilmaa 100 m³/s. Tarvittavaan raittiin ilman määrään vaikuttaa ratkaisevasti käytettyjen työkonoiden määrä. Pakokaasujen lisäksi paikallistuuletuksella varmistetaan, että muiden haitallisten kaasujen pitoisuudet pysyvät riittävän alhaisella tasolla, eikä tasoilla esiinny ongelmia pölyn kanssa. Tuuletusilman täytyy olla +4 °C ja sen lämmittämiseen käytetään kaivosvedestä saatavaa lämpöä. Kaivoksesta pumpataan ylös tuuletusasemalle +17-asteista vettä, josta lämpö otetaan talteen lämmönvaihtimilla ja siirretään pattereihin ja edelleen kaivokseen puhallettavaan ilmaan. Mikäli pakkasta on yli -16 °C, tarvitaan kaukolämpöä lämmitykseen. Kaivostoiminnan loppuessa vähenee myös dieselkäyttöisten ajoneuvojen käyttö kaivoksessa, jolloin tuuletusilman tarve vähenee. Vastaavasti kaivoksesta poistuu suuria määriä lämmintä, kostea ja likaista ilmaa, josta voitaisiin myös ottaa lämpöä talteen kuten kappaleessa 3.3 on mainittu.

Kaivoksen pitäminen kuivana vaatii jatkuvan lämpimän kaivosveden pumppauksen. Vuositasolla louhoksen ja kaivoksen kuivatusvesiä pumpataan noin miljoona kuutiota

vuodessa, johon sisältyvät kaivokseen johdettava poravesi sekä kaivostäytön mukana tuleva vesi. Kaivokseen taas pumpataan puhdasta vettä pumppujen ja muiden koneiden puhdistukseen ja kasteluun noin 50 m³/h. Keskimäärin valumavesien vesimäärä on suurimmillaan kaivoksen +630 –tason alueille on 12-15 l/s. Vuotuinen valumavesien pumppausmäärä on ollut 500 000 – 650 000 m³. Nämä vedet johdetaan rikastushiekka- alueille, joissa ne pumpataan jätteen välipumppaamon kautta jätealueelle. Kaivoksen ylemmillä tasoilla vesi voi sulfidien hapettumisen takia olla erittäin hapanta (jopa pH 2,2), kun taas syvällä kallioperässä esiintyvät suolaiset vedet ovat emäksisiä (pH 8,5–10). Hapan hapellinen kaivosvesi syövyttää metalleja. Happaman veden ja suolaisen emäksisen veden sekoittuessa syntyy kipsisaostumaa, joka voi tukkia putkistoja ja pumppuja. Putkistoja voidaan joutua puhdistamaan kaivostoiminnan loppuessaakin 1 – 2 kertaa vuodessa. Lämmintä kaivosvettä ei siis ilman puhdistusta voida käyttää maan alla tai päällä lämmitykseen tai muihin tarkoituksiin.

Kaivoskäytävien kuivana pitäminen edellyttää jatkuvaa veden pumppausta myös kaivostoiminnan päättyessä. Kaivoksen kuivana pitämisen kustannukset ovat arviolta yli 500 000 €/vuodessa. Suurimmat kustannuserät ovat 1) pumppauksen ja tuuletuksen kunnossapito ja 2) pumppauksessa tarvittava sähkö. Lisäksi kustannuksia syntyy tuuletuksen sähköstä, liejujen käsittelystä, alueiden ja hissin ylläpidosta. Kaivosalueen sähkö saadaan valtakunnan verkosta eikä alueella ole käytössä vaihtoehtoisia sähköenergian tuotantotapoja. Edullisen sähkön saaminen kaivosalueelle vaikuttaisi merkittävästi veden pumppaus- kuin lämmön talteenottokustannuksiin. Callio-organisaation alla on tehty energiaan liittyviä selvityksiä ja suunnitelmia, joiden toteutumisella olisi iso vaikutus myös geotermisen energian kysymyksiin.

4.3 Pyhäsalmen geotermisen energian kustannukset ja käyttökohteet

4.3.1 Ratkaisumalli

Kuivana pidetyn kaivoksen vesi- ja tuuletusilmakierrosta on saatavissa lämpöenergiaa 1–3 MW:n teholla. Kaivoksen kuivanapitopumppauksen mukana tuleva lämpövirta hyödynnetään nyt kaivokseen syötettävän tuuletusilman lämmitykseen. Kaivoksesta tuleva tuuletuksen poistoilma on talvellaikin melko lämmintä ja kosteaa, joten ilmapölyssä on huomattava määrä lämpöenergiaa ilmalämpöpumpulla talteenotettavaksi. Tällä tavoin kaivoksen kuivanapidon ja tuuletuksen vaatima energia ja kustannukset saadaan hyödyntämään kaivosalueen rakennusten lämmitystarvetta ja pienentämään lämmityskustannuksia. Tuuletuksen ja kuivanapidon lämpöenergia ei mitään ilmeisimmin ole pelkästään kallioperän geotermistä lämpöä, vaan siinä on muitakin maanalaiseen toimintaan liittyviä komponentteja.

Teknisesti ja liiketaloudellisesti mahdollinen tapa hyödyntää kaivostiloja geotermisen energian pumppaamisessa on mahdollisimman syvälle eli kaivoksen pohjaan sijoitettu lämpökaivokenttä. Kaivoksen kuivanapito-, energia- ja ympäristönäkökohdat huomioiden lämmönkeräys- ja siirtopiirit tulisi toteuttaa suljettuina kiertoina. Tähän toteutukseen liittyvät peruseräatteen ja laskelmia on esitetty tässä raportissa aiemmin.

Ratkaisun perusajatus on kerätä lämpöenergiaa tarvittavasta määrästä lämpökaivoja kierrättämällä vettä kaivoissa ja siirtämällä lämpö näistä (useista) primäärikiertopiireistä lämmönvaihtimella lämmönsiirtopiiriin välityksellä maan pinnalla (konseptikuva 11 aikaisemmin). Lämmönsiirtopiiristä maan pinnalle tuleva vesi olisi siten jonkin verran alempi kuin kaivoksen pohjaosan kallion lämpötila. Lämmön siirtopiiri on tarkoituksenmukaista mitoittaa alun alkaen riittävän välityskykyiseksi, jotta lämmönottoa voidaan ajan mittaan rakentaa tarpeen mukaan. Sijoittamalla lämpöpumppu(ja) maan alle lähelle kaivokenttää voidaan siirtopiiriin välityskykyä kasvattaa, toisaalta maanpinnalla lämpöpumput voivat tuottaa lämpöä joustavammin ja hajautetusti eri käyttötarpeisiin. Kiertopiiriin voidaan maanpinnalla kytkeä myös auringonlämmön keräyspiiri tai muu lämpölähde, jolloin kokonaisjärjestelmästä tulee samalla latautuva.

4.3.2 Kustannuslaskelmat

Pyhäsalmen kaivoksen geotermisen energian hyödyntämisen kustannusten arvioimiseksi tehtiin erillinen Excel-laskentapohja, jolla kustannustekijöiden vaikutusta tuotetun lämpöenergian hintaan voidaan tutkia. Taulukossa 2 on esimerkki taulukkositivusta, josta näkyy mitä taulukkoon voidaan syöttää ja mitä laskenta tulostaa. Taulukon 2 alkuosan kenttiin syötettävät arvot liittyvät itse lämpökentän, kollektorin ja primääripiiriin vesivirran ominaisuuksiin ja laskentatuloksiin.

Geotermisissä projekteissa **poraus** on yksi suurista kustannustekijöistä. Lämpökaivoporauksessa Suomen kiteiseen kallioperään isku/uppoporaus on osoittautunut kustannustehokkaaksi ja nopeaksi tavaksi. Hinta voidaan normaalitapauksessa antaa metrihintana, kun ollaan ”normaaleissa” kaivosyvyyksissä, mutta syvyyden kasvaessa useisiin satoihin metreihin poraus vaikeutuu ja hidastuu metrihinnan samalla kasvaessa. Maanpäällisissä lämpökaivourakoissa päästään kaivonporauksessa alle 30 €/m hintatasoon, erityisesti suuremmissa kohteissa, jos yksittäinen kaivo voidaan tehdä keskeytyksettä ilman että kaivo pääsee täyttymään vedellä.

Kaivoon tulevan **kollektorin** tutkimus, kehitys, mallinnus ja optimointi on tämän hankkeen loppuvaiheen keskeinen kohde. Tehokas kollektori ottaa lämpöä kalliosta mahdollisimman hyvin ja ulostulevan veden lämpötila on mahdollisimman korkea. Taulukossa on ohjeellinen hinta.

Lämpökaivon antama **lämpöteho** kaivometriä kohden saadaan yleistämällä lämpökaivomallinnusten tuloksia. Tehoon vaikuttavat kallioperän lämpötila, kaivokollektori ja keruupiiriin virtausnopeus. Lisäksi kaivon antamalla **tuloveden lämpötilalla** ja lämpöteholla on toisiinsa nähden käänteinen riippuvuus. Lämpökaivokenttä on pyrittävä suunnittelemaan niin, että kaivot eivät ”syö” toistensa lämpöä. Lämpökaivokentän optimointia jatketaan tämän hankkeen loppuun saakka. Taulukossa annettu lämpöteho ja tuloveden lämpötila edustavat tyypillisiä simuloituja arvoja, mutta ei välttämättä ole vielä parhaat mahdolliset.

Lämmön siirtolinja kaivoksen pohjalta maan pinnalle on kertainvestointi, jonka jälkeen lämpökaivo- ja lämpöpumppukapasiteettia voidaan rakentaa ja lisätä tarpeen mukaan. Linjan suunnittelu ja kustannuslaskenta edellyttävät alan asiantuntijan työtä,

tässä esitetty arvio perustuu saatavilla olevaan taustatietoon ja keskusteluihin muutamien alan ammattilaisten kanssa. **Lämpöpumppujen** osalta hintataso on hyvin ennakoitavissa.

Sähkön ostohinta on lämpöpumpulla tuotetussa lämpöenergiassa tärkein kustannustason vaikuttava tekijä investointikustannusten lisäksi. Sähköenergian markkinahinta (Nordpool) on tällä hetkellä likimain 40 – 50 €/MWh välillä, johon tulee lisäksi verkkoliityntäsopimuksen, siirron ja verotuskäytännön mukaiset lisäosat.

Taulukoon 2 on laskettu kaksi eri skenaariota:

1. Alhainen sähkön hinta (70 €/MWh) ja alhainen tavoitelämpötila (45 °C)
2. Korkeampi sähkön hinta (90 €/MWh) ja korkeampi tavoitelämpötila (70 °C)

Näiden laskelmien perusteella lämpöä pystytään kaivoksesta tuottamaan noin 30 – 40 €/MWh –hinnalla, mutta investointikustannus nostaa hintatasoa merkittävästi. Haluttu/tarvittava lämpötilataso vaikuttaa merkittävästi tuotantokustannuksiin. Kannattavuus paranee, jos lämpöpumpun tuottama kylmävesivirta voidaan myös hyödyntää. Tässä laskelmassa ei myöskään ole huomioitu mahdollista kaivoksen tuuletusilman hyödyntämistä lämmityksessä.

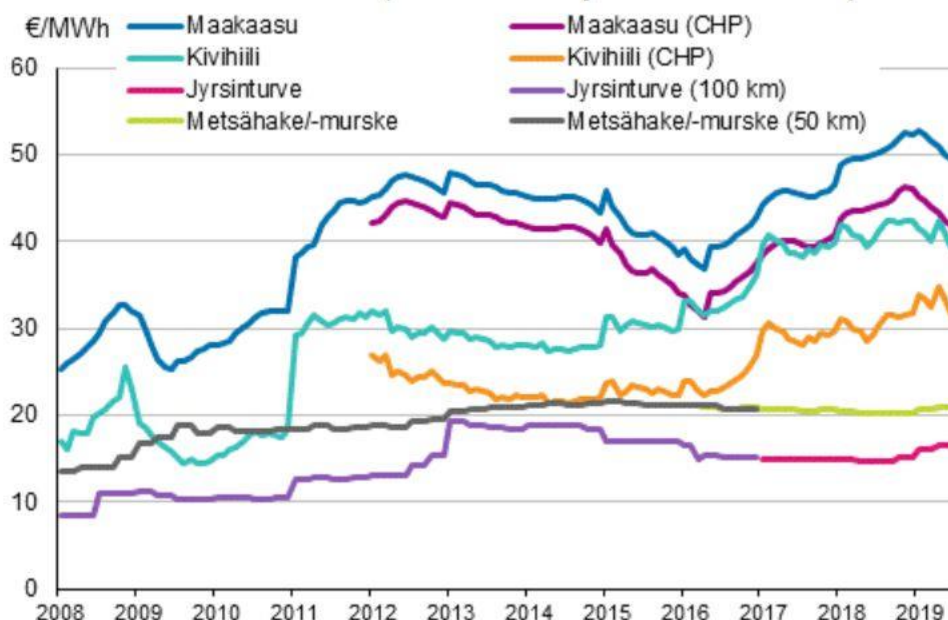
Taulukko 2. Geotermisen lämmöntuoton alustava kustannuslaskenta Excel-taulukko-pohjalla.

Lämpökaivokenttä kaivoksen pohjalla												
kairaus/poraus	35	k€/km	paineilmaporaus (<350m, 30 €/m), timanttikairaus 90 €/m, vesivasara ?									
kollektori +asennus	10	k€/km	epävarma, koska kolektori vasta suunnittelussa									
Lämpökaivon tuotto												
lämpöteho	40	kW/km	laskettu, mallinnettu									
tuloveden lämpötila (1430-tasolla)	18	C	laskettu, mallinnettu									
Lämmönsiirtolinja pohjalta maan pinnalle (5 piirin sarjana)			hyvin karkea arvio									
Lämpöeristetty DN300-putkilinja, 3 km	600	k€										
10 kpl lämmönvaihtimia (korkea paine!)	250	k€										
10 kpl kiertopumppuja (3 kW)	150	k€										
muut tekniset komponentit	150	k€										
putkistosuunnittelu	50	k€										
geotekninen suunnittelu ja rakentaminen	200	k€										
Yhteensä	1400	k€										
Muut kustannukset												
Lämpöpumput	200	k€/MW	Arvio Oilonilta									
Muut kiinteät rakentamiskustannukset	200	k€	hyvin karkea arvio									
Kiinteät käyttökustannukset	500	k€	karkea arvio, kaivoksen kuivanapitoa sisällytetty									
Vesikierron pumppauskustannus, 10 MW kiertopiiri												
100 L/s, DN300-putki => tarvittava pumpputeho	30	kW	Yleistiedoilla laskettu putken dimensioista ja tilavuusvirtaamasta									
Kiinteä investointikustannus (0 MW lämpöteho)	1.6	Me										
Sähkön hinta	70	€/MWh										
Haluttu lämpötila	45	=> COP =	5.9									
Investoinnin kuoletusaika	15	v										
Rakennetun tehon kustannukset ja energiantuotanto				Tuotantokustannukset								
	Teho	Investointi	Tuotanto	LP-sähkö	kierto	sähkö	muut	kuoletus	Yht	"Liikevaihto" (k€)		
	MW	M€	M€/MW	MWh/a	k€	k€	€/MWh	€/MWh	€/MWh	€/MWh		
	1	2.73	2.73	8766	104	18	14	57	21	92		793
	2	3.67	1.83	17532	208	18	13	29	14	55		957
	3	4.60	1.53	26298	312	18	13	19	12	43		1121
	4	5.54	1.38	35064	417	18	12	14	11	37		1285
	5	6.47	1.29	43830	521	18	12	11	10	34		1449
	6	7.40	1.23	52596	625	18	12	10	9	31		1613
	7	8.34	1.19	61362	729	18	12	8	9	29		1777
	8	9.27	1.16	70128	833	18	12	7	9	28		1941
	9	10.21	1.13	78894	937	18	12	6	9	27		2105
	10	11.14	1.11	87660	1042	18	12	6	8	26		2270
	11	12.07	1.10	96426	1146	18	12	5	8	26		2434
	12	13.01	1.08	105192	1250	18	12	5	8	25		2598
Kiinteä investointikustannus (0 MW lämpöteho)	1.6	Me										
Sähkön hinta	90	€/MWh										
Haluttu lämpötila	70	=> COP =	3.3									
Investoinnin kuoletusaika	15	v										
Rakennetun tehon kustannukset ja energiantuotanto				Tuotantokustannukset								
	Teho	Investointi	Tuotanto	LP-sähkö	kierto	sähkö	muut	kuoletus	Yht	"Liikevaihto" (k€)		
	MW	M€	M€/MW	MWh/a	k€	k€	€/MWh	€/MWh	€/MWh	€/MWh		
	1	2.58	2.58	8766	239	24	30	57	20	107		922
	2	3.37	1.68	17532	478	24	29	29	13	70		1209
	3	4.15	1.38	26298	717	24	28	19	11	58		1496
	4	4.94	1.23	35064	956	24	28	14	9	52		1783
	5	5.72	1.14	43830	1196	24	28	11	9	48		2070
	6	6.50	1.08	52596	1435	24	28	10	8	45		2358
	7	7.29	1.04	61362	1674	24	28	8	8	44		2645
	8	8.07	1.01	70128	1913	24	28	7	8	42		2932
	9	8.86	0.98	78894	2152	24	28	6	7	41		3219
	10	9.64	0.96	87660	2391	24	28	6	7	41		3506
	11	10.42	0.95	96426	2630	24	28	5	7	40		3793
	12	11.21	0.93	105192	2869	24	28	5	7	39		4081

4.3.3 Alueellinen kaukolämpö

Vuonna 2018 Suomessa tuotetusta kaukolämmöstä kivihiilellä tuotettiin 19,3 %, metsäpolttoaineilla 18,8 %, turve 15,4 % ja maakaasu 12,5 % sekä teollisuuden puutähteillä 10,2 %. Kaukolämmön ominaispäästöt olivat 147,1 gCO₂/kWh (Energiateollisuus, 2018). Pienemmillä paikkakunnilla hakkeen ja puuteollisuuden sivuvirtojen käyttö kaukolämmön tuotannossa on valitseva käytäntö. Geoterminen lämpö on potentiaalinen vaihtoehto, kun halutaan suuria määriä hiilivapaata energiaa lähellä asutuskeskuksia. Maalämmön kattavuutta verrattuna muihin lämmitysmuotoihin pienkiinteistöissä on selvitetty useissa opinnäytetöissä (esim. Skröcki 2013, Merta 2016, Ranta 2019). Vaikka investointi maalämpöön on kalliimpi kuin muihin polttoaineisiin, on maalämpö pitkällä aikajänteellä kustannustehokas ja vaivaton, sillä maalämpöpumppu vaatii vain vähän huolto- ja tarkistustoimia. Maalämpöpumput ovatkin kasvattaneet lämmitysjärjestelmistä suosiotaan eniten. Vuonna 2011 maalämpö valittiin lähes 50 prosenttiin uusista pientaloista (Motiva, 2019).

Kuvassa 15 on esitetty eri raaka-aineiden hankintahintojen kehitys lämpölaitoksille. Metsähakkeen tuotantoketju tuo tuloja alueellisesti myös paikallisille urakoitsijoille ja metsänomistajille. Lisäksi saatavat tuet vaikuttavat uusiin lämpölaitosinvestointeihin ja metsäbioenergian käyttöön. Metsähakkeen käyttöä tuetaan sähköntuotannossa esim. CHP-laitoksilla ns. syöttötariffina, mutta ei pelkässä lämmöntuotannossa. Tulevaisuudessa vähähiilisyys tulee vaikuttamaan entistä enemmän tukiin. Energiatukia voidaan myöntää sellaisille ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin, jotka lisäävät uusiutuvien energialähteiden käyttöä, edistävät energian säästöä ja käytön tehostamista sekä energiajärjestelmän muuttumista vähähiiliseksi. Tällä hetkellä puupolttoainepohjaisten lämpökeskusten tuki on 10 – 15 % ja lämpöpumppuhankkeiden 15 % (Business Finland 2019).

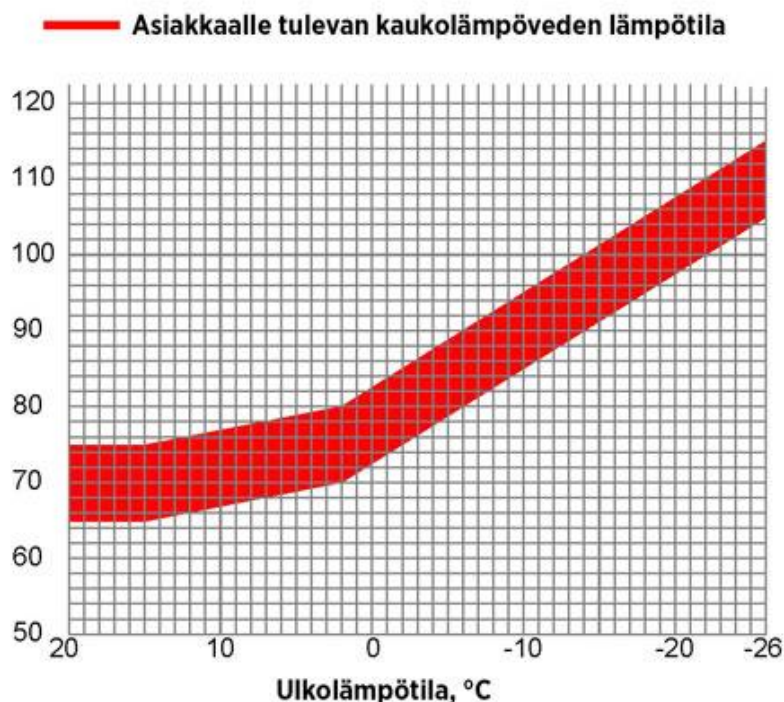


Kuva 15. Voimalaitospolttoaineiden hintakehitys (Tilastokeskus, 2019)

Pyhäjärven kaupungin alueella lämmön jakelusta vastaa Pyhäjärven Energia ja Vesi Oy. Kaukolämpöä on tuotettu kolmessa lämpölaitoksessa, joista tärkeimmät ovat keskustan alueella oleva lämpölaitos, jonka maksimiteho on 5 MW ja Ruotasen alueella oleva 1 MW lämpölaitos, jonka toiminnasta on vastannut Ruutana Heating Oy. Kaikkiaan kaukolämpöverkostoa on 25 km ja asiakkaita 257 taloutta (Pyhäjärven Energia ja Vesi, 2019).

Pyhäjärvellä kaukolämpö tuotetaan hakkeella ja lähialueen sahoilta saatavalla energia-puulla. Raaka-aineen toimittaja on kilpailutettu kolmeksi vuodeksi. Kaukolämmön hinta Pyhäjärven energian ja veden asiakkaille on 56,83 €/Mwh +alv 24 %. Hinta on jonkin verran alhaisempi kuin kaukolämmön keskiarvohinta 65 €/Mwh (Energiateollisuus ry, 2018). Vuonna 2016 Pyhäjärvellä tuotettiin lämpöä 28 000 MWh ja polttoaineiden hankintahinnat olivat seuraavat: hake 17 €/i-m¹, puru 12,80 €/i-m³ ja kuori 12,80 €/i-m³. (Kuntaliitto, 2017)

Asiakkaalle tulevan kaukolämpöveden lämpötila on riippuvainen ulkolämpötilasta (kuva 16). Putkiston hävikit vaikuttavat tarvittavaan maksilämpötilaan. Menoputkessa kaukolämmön lämpötila on yleensä 65 – 115 °C ja paluu 40 – 68 °C (energia.fi). Ruotasen lämpölaitoksen tuottama maksimilämpö on ollut 95 °C talvipakkasilla, normaali lämpötaso on 80 – 90 °C.



Kuva 16. Kaukolämpöveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona (Energia.fi)

Vuonna 2020 on tarkoitus yhdistää Ruotasen alueen kaukolämpölaitos ja kaivosalueen laitos toisiinsa, jotka siirtyvät Pyhäjärven Energia ja Veden hallintaan. Ruotasen alueella kaukolämpöverkon alueella on noin 100 taloutta. Urheilukentän itäpuolella oleva

¹ hakkeella i-m³ = 0,8 Mwh

noin 200 talouden omakotiasutus ja koulu eivät ole kaukolämmön piirissä. Mitään esteitä ei ole sille, etteikö geotermistä lämpöä voitaisi käyttää Ruotasen alueen lämmitykseen nykyisen kaukolämmityksen ohessa erityisesti kevät – syyskautena. Ruotasen alueen kaukolämpöputkistoa voitaisiin myös laajentaa. Tekemällä vertailulaskelmia nykyisiin omakotitalojen lämmityskuluihin öljyllä ja muilla polttoaineilla voitaisiin selvittää asukkaiden kiinnostus tulevaisuudessa hiilivapaaseen lämpöenergiaan. Lämpöenergian tarpeen vaihtelu on luonnollisesti riippuvainen monista eri tekijöistä, mutta keskimääräisen 120 neliön omakotitalon kulutus on uusissakin taloissa noin 15000 kWh (Motiva 2019). Edullisuuden lisäksi keskeinen geotermisen lämmön hyödyntämisen kannattavuudessa onkin sen hiilivapaus. Suomessa pientalojen energiankulutuksesta on 50 % lämmitysenergiaa ja 20 % kuluu lämpimään veteen (Ympäristö.fi, 2019). Kaukolämmön yhteistuotantoalueiden keskimääräinen päästökerroin kolmen viimeisen vuoden keskiarvona on ollut 188 kgCO₂/MWh (Motiva, 2019). Vertaillen geotermistä lämpöä tulee huomioda, että vaikka bioenergian laskennalliset CO₂-päästöt ovat niin ikään 0, esimerkiksi pientalojen lämmityksessä käytettävien polttopuun ja pellettien oletuspäästökerroin on 403 kg CO₂/MWh, joka on suurempi kuin esimerkiksi öljyllä (263 kg CO₂/MWh) (Tilastokeskus, 2019).

Pääosa Pyhäjärven kaupungin kaukolämmön kulutuksesta on keskusta-alueella, jossa sijaitsevat uimahalli, sairaala ym. julkiset laitokset. Matkaa kaivokselta on keskustaan viitisen kilometriä. Kaukolämpöputken investointikustannukset ovat halvimmillaan noin 200 €/m, kustannukset nousevat helposti 400 €/m (Energiateollisuus ry, 2018). Käytännössä siis kaukolämpöputki kaivokselta keskustajaamaan maksaisi yli miljoona euroa. Matkalla kaivoksesta keskustaan sijaitsee iso puutarhayritys, mutta muita merkittäviä lämmön kuluttajia ei välillä ole. Pyhäjärven teollisuusalue sijaitsee eri suunnassa lähellä E4 –tietä. Realistista olisi rakentaa kaukolämpöyhteys kilometrin päähän puutarhaan, jolloin samaa linja tarjoaisi geotermistä lämpöä myös matkan varrelle kaavoitetuille teollisuusalueille.

4.3.4 Lämpöenergian käyttökohteet paikallisesti

Geotermisen energian hyödyntäminen luo kasvualustan kehittää uusia tuotteita ja palveluita sekä kaivosympäristössä ennestään toimineille yrityksille, että uuden teknologian kasvuyrityksille. Uusia liiketoimintamahdollisuuksia syntyy mm. lämmön talteenottoon, energian siirtoon ja maanalaisissa tiloissa työskentelyyn liittyvien uusiin tekniikkoihin, joita voidaan hyödyntää kaikkialla kaivoksista tai muista maanalaisista tiloista saatavan geotermisen energian hyödyntämiseksi. Keskeinen kysymys onkin, kenelle näitä mahdollisuuksia kehitetään ja mitkä ovat heidän tarpeensa esimerkiksi energiamäärän suhteen. Nämä tekijät vaikuttavat ratkaisevasti mikä on parhaiten soveltuva tekniikka ja sen kustannukset. Ympäristöystävällisen imagon merkitystä ei tule väheksyä. Lähellä tuotettu tai kasvatettu ravinto, jonka tuotannossa on käytetty hiilivapaata energiaa tai matkailupalveluiden toteuttamisessa käytettynä lisää alueen vetovoimaisuutta Pyhäjärvestä hyvien yhteyksien varrella olevana luonnonkauniina paikkana elää, yrittää ja vierailla.

Energiakaivos-hankkeessa selvitettiin geotermisen energian käyttökohteita, jossa oleellinen tekijä kannattavuuden näkökannalta on tarve suurelle määrälle matalaa lämpöenergiaa. Hyödyntämisen tulisi tapahtua nykyisen kaivosalueen välittömässä läheisyydessä, hyödyntäen joko kaivoksen maanalaisia tiloja tai kaivosalueen maanpäällisiä

tiloja ja lähialueita. Mahdollisia hyödyntämiskohteita lähdettiin ideoimaan ennakkoluulottomasti ensin kartoittamalla tehtyjä ratkaisuja kaivostoiminnasta vapautuneiden tilojen hyödyntämisessä ja kutsumalla yrityksiä ja muita aiheesta kiinnostuneita toimijoita kolmeen järjestettyyn työpajaan sekä kahteen eri keskustelutilaisuuteen.

Tässä vaiheessa ideoiden toteutuskelpoisuutta Pyhäjärven maantieteelliseen sijaintiin ei haluttu pitää rajoittavana tekijänä, vaan syntyneistä ideoista (liite 1) on työstetty eteenpäin hankkeen laskennallisten tulosten edettyä, jolloin on mahdollista realistisesti arvioida liiketoiminnan kannattavuus. Lisäksi syksyllä 2018 kuusi tuotantotalouden opiskelijaryhmää arvioi liiketoimintamahdollisuuksia liittyen Pyhäsalmen kaivoksen uusiokäyttöön pohjautuen hankkeessa tuotetun taustamateriaaliin. Näitä töitä on osaltaan hyödynnetty määritettäessä seuraavia esiteltäviä liiketoimintamahdollisuuksista, joilla voisi olla eniten potentiaalia joko taloudellisesti tai saavuttamalla yritysten kiinnostusta. Tässä yhteydessä on muutamien esimerkkien avulla tarkastelu tekijöitä, jotka vaikuttavat liiketoimintapotentiaaliin ja kannattavuuteen.

Kasvinviljely ja kalanviljely

Kasvinviljely maanalaisessa kaivoksessa on aikaisempien hankkeiden perusteella ollut toimivaa hyödyntäen kaivoksen sisäistä lämpöä eri tasoilla. Pyhäsalmen kaivoksessa on testattu useiden eri kasvien viljelyä kaivoskuiluissa 660 m syvyydessä. (Luke, 2018) Esimerkiksi väriaineena hyödynnettävä morsinko-kasvi (Natural Indigo Finland Oy) ja humala (Sangen Oy) tuottivat kaivosoloissa erinomaista satoa. Kaivoskuiluissa on valttina tasainen ympärivuotinen lämpö ja lämpötilatason valintamahdollisuus. Deep farming eli tuotanto hylätyissä kaivoskuilussa onkin kasvava trendi maailmalla.

Geotermisen lämmön kannalta kaivoksen maanalaisessa kasvinviljelyssä keskeisimmät mahdollisuudet liittyvät lämpimän veden hyödyntämiseen esimerkiksi uuttamisessa ja muissa kasvien jalostusmuodoissa. Koska asukastiheys alueella on suhteellisen alhainen ja kuluttajat sijaitsevat suhteellisen kaukana kaivosalueelta, joten parhaiten tilat soveltuvat kilohinnaltaan tai tilavuudeltaan arvokkaiden lajikkeiden (esimerkiksi sahrami), hyvin säilyvien tai sellaisten lajikkeiden tuotantoon, joita voidaan jalostaa jo paikan päällä. Näin kuljetuskustannukset markkinoille eivät heikennä tuotannon kannattavuutta.

Callio Edible Insects from Mine –hanke on v. 2019 käynnistetty hanke, jossa sirkkoja kasvatetaan ruuaksi kaivoksessa. Kasvatustilat sijaitsevat kaivoksen syvimmällä ja lämpimimmällä tasolla, joissa olosuhteet kosteuden ja lämmön suhteen ovat ympäri vuoden optimaaliset.

Geotermistä lämpöä on perinteisesti käytetty useissa maissa kasvihuoneiden lämmitykseen. Johtavia maita ovat Turkki, Venäjä, Unkari, Kiina ja Alankomaat (Lund & Boyed, 2016). Luonnonvarakeskuksen (Sivenius, 2019) selvityksen mukaan esimerkiksi kurkun viljely sähkön kulutus oli 784 kWh/m² ja lämmön 276 kWh/m². Satoa kohden luvut ovat kurkulle sähkö 7,64 kWh/kg ja lämpö 2,73 kWh/kg. Vastaavasti tomaatille lämmön kulutus on huomattavasti suurempi eli 9,84 kWh/kg lämpöä ja 3,32 kWh/kg sähköä. Isommat kasvihuoneet tuottavat lämpöenergiansa pääosin itse. Uusiutuvien energiamuotojen erityisesti hakkeen osuus on kasvanut, mutta myös turpeen ja sähkön kulutus on kasvanut kasvihuoneissa yleisesti (Silvenius et al. 2019).

Muutaman kilometrin päässä Pyhäsalmen kaivosalueesta sijaitsee valtakunnallisesti keskisuuri puutarha, joka tuottaa kasvihuoneissa pääasiassa kurkkua, tomaattia ja paprikaa. Tämän kasvihuonealueen lämpöenergian kulutus vuodessa on noin 10000 MWh. Lisäksi Pyhäjärvellä on lähinnä kukkia tuottava toinen kasvihuoneyritys, joka sijaitsee kauempana lähellä E4-valtatietä. Esimerkiksi puutarhassa lämpö on tuotettu oman polttolaitoksessa sahojen jätetuusta ja hakkeesta. Kesällä 40-asteinen vesi riittää kasvihuoneiden lämmitykseen, vastaavasti talvella pitää lämmön olla 70-asteista (haastattelu).

Geoterminen energia soveltuisi hyvin kasvihuoneiden lämmitykseen ja kaivosalueen läheisyyteen olisi mahdollista perustaa uusia kasvihuoneita. Tuotetun lämmön hinnan tulisi olla kilpailukykyistä nykyisten lämmöntuotantokustannusten kanssa: esimerkiksi haketta ostetaan hintaan 16-26 €/MWh.

Esimerkki 1: tomaatinviljely ja tomaattien jatkojalostus kastikkeeksi ja murskaksi

- Arvolupaus
 - Kotimaisissa kasvihuoneissa lämpö- ja sähkökulut ovat tomaatinviljelystä jopa 60 % kaikista kuluista, kotimaisen tomaatin kysyntä on tarjontaa suurempi. Geoterminen lämpö sopii erinomaisesti kasvihuoneiden lämmitykseen, ollen taloudellinen, ekologinen ja vaivaton tapa tuottaa tarvittava lämpöenergia. Tämä on myös imagollisesti tärkeä tekijä tuotteen markkinoinnissa. Kuluttajat olisi kuitenkin löydettävä läheltä, joten tulisi panostaa lähimarkkinointiin tai jalostamiseen. Suomessa tuotettuja kasvihuonetomaattien hävikki on arvioitu olevan jopa 100 000 kg / v, samalla kun esimerkiksi SOK tuo maahan yli viisi miljoonaa kiloa tomaattisäilykkeitä (HS, 2019), joten tässä on selvä markkina- ja kasvupotentiaali. Laatu on kilpailuetu.
- Kohderyhmä
 - Ulkomailta tuodun tomaatin tuotannosta on raportoitu olevan myös eettisiä ongelmia: tuottajahinnat on painettu alas, ja tiloilla työskentelee pääosin siirtolaisia, joiden palkat ja olosuhteet ovat surkeita. Kuluttajista on tullut entistä tietoisempia, sen lisäksi että kotimaisten tomaattien tarjonnasta on jo nyt vajausta, kysyntä ekologisista ja hyvänmakuisista tuotteista on kasvanut ja todennäköisesti kasvaa edelleen. Tässä on erinomainen yhteistyömahdollisuus jo paikkakunnalla toimivalle vihanneksia tuottavalle puutarhalle ja mm. tomaattimurskan ja muiden jalostustuotteiden yrittäjän yhteistyölle. Tärkein myyntikanava on verkkokauppa.
- Kustannukset vs. tulovirrat
 - Kustannussäästöä syntyy etenkin yhteistyön toteutuessa raaka-aineiden ja jalostuksen sijoittuessa lähekkäin, jolloin kasvihuoneen ja jalostustilojen edullisen lämpöenergian lisäksi myös raaka-aineen kuljetuksen ja hävikin aiheuttamat kustannukset pienenevät. Valmiin tuotteen markkinointi ja jakelu tapahtuu tällä hetkellä pitkälti jo verkkokaupan kautta. Uusien työntekijöiden tarve tai nykyisten halukkuus siirtymään täytyy selvittää, lähtöoletuksena että tämä olisi nykyisen toiminnan päälle toteutuvaa kasvua.

Kalanviljely

Vanhoja kaivosalueita käytetään maailmassa kalanviljelyyn. Esimerkiksi Yhdysvalloissa Appalakkien alueella vanhoista hiilikaivoksista johdetaan kalanviljelyaltaisiin vettä, jonka lämpötila on 13-asteista ympäri vuoden. Kaivosalueiden kalanviljelyssä käytetty vesi on melko vähän tekemisissä ulkopuolisten saastuttajien kanssa, jolloin riskit kalataudeille vähenevät. (Fishsitecom, 2008).

Talvella 2019 päättyneessä hankkeessa selvitettiin kaivoksen eri osien soveltuvuutta vesiviljelyyn (kalat, äyriäiset, vesikasvit tai levät). Vesiviljelyssä yksi tärkeimmistä asioista on veden saatavuus sekä poistoveden puhdistaminen ja purkupaikka. Kaivostoiminnan läpi menee huomattavat määrät Pyhäjärvestä pumpattavaa vettä. Kaivosalueen suuria laskeutusaltaita voidaan mahdollisesti hyödyntää tuotantovesien puhdistuksessa kosteikkoina. Raportissa (Kainuun ja Koillismaan kalaleader 2019) todetaan, että vesiviljelyssä veden lämpötila ja sen säätely sopivaksi kasvatuslämpötilaksi on välttämätöntä. Veden lämmittäminen/jäähdyttäminen on yksi suurimmista kustannuksista vesiviljelyssä. Kaivoskuiluissa on valttina tasainen ympärivuotinen lämpö ja lämmönvaihtelun helppous.

Raportissa ehdotetaan, että veden jäähdytystä ja lämmitystä kannattaisi testata kuiluissa olemassa olevilla poistoveden saostusaltaita tai rakentamalla luolastoon altaat, joissa lämpötila saataisiin tasattua kallioperää hyväksikäyttäen. Kaivoksessa kasvatusaltaiden vettä voitaisiin lämmittää saatavalla geotermisellä lämmöllä. Kaivosvedestä talteen otettavalla lämmöllä voitaisiin lämmittää myös maan päällä olevia kasvatuskohteita.

Matkailu (kaivos, lomarakentaminen, kylpylä)

Pyhäsalmen kaivos ja sen lähialue on potentiaalinen matkailukohde tulevaisuudessa. Suomessa mm. Outokummussa vanha kaivosalue toimii matkailukohteena, jossa erilaisten näyttelyiden ja erityisesti lapsille suunnattujen aktiviteettien lisäksi matkailijoilla on mahdollisuus tutustua mm. vanhaan rikastamoon ja maan alle rakennettuun ”kaivoskäytävään”, jossa esitellään kaivostoimintaa. Pyhäsalmen maanalainen kaivos tarjoaa eksoottisen matkailu- ja tapahtumakohteen, jossa on mahdollisuus harjoittaa erilaisia aktiviteetteja, järjestää konsertteja ja muita tilaisuuksia.

Julkaistussa opinnäyteselvityksessä (Luttinen, 2018) todetaan myös, että maanpäällisellä kaivosalueella voisi olla yhtä hyvät mahdollisuudet erilaisille matkailualan toiminnalle kuin itse kaivoksessa, koska alue on laaja ja sijaitsee luonnonkauniilla paikalla. Yhtensä vaihtoehtona on esitetty kylpylätoimintaa, joka kuluttaa paljon lämpöenergiaa: kesimääräinen lämmönkulutus suomalaisissa kylpylöissä on ollut 2300 MWh vuodessa (Uusitalo, 2018). Ulkomailla suolakaivoksia on muutettu terveyskylpylöiksi (Billock, J. 2017).

Tietävästi yhtään entistä kaivosaluetta ei ole ainakaan toistaiseksi Suomessa muutettu uimahalliksi, kylpyläksi tai edes maauimalaksi. Haasteena ovat harva asutus ja pitkät välimatkat, joten yhteistyö muiden matkailukohteiden, kuten esimerkiksi Lapin matkailun kanssa olisi tärkeää riittävän volyymin turvaamiseksi. Eräs mahdollisuus on liittää kylpylätoiminta osaksi laajempaa palvelutarjontaa, kuten esimerkiksi Leppävirralla on luotu merkittävä aktiivisen urheilun ja toiminnan superkeskus Kylpylä-hotelli Ve-

sileppiksen ympärille tarjoten monipuolisia liikunta, viihde, koulutus- ja kurssipalveluja niin yksityisille, yrityksille kuin seuroille. Esimerkiksi jääkiekkojuniorien turnauksia järjestetään siellä useita vuodessa, jolloin heidän mukanaan tulevat perheet hyödyntävät muita palveluita.

Toisena esimerkkinä matkailusta on Vuokatissa toimiva Katinkullan kylpylä, joka on osa loma-aluetta hotellirakennuksineen ja loma-asuntoineen. Kylpylän altaissa käytetään +30 – 35-asteista vettä, joka lämmitetään +7-asteisesta pohjavedestä. Lämmitettyä vettä säilötään vesialtaissa, joissa veden lämpöenergia säilyy uudelleen käyttöä varten. Lämmitetty, välillä puhdistettava, vesi kiertää kylpylässä noin kuukauden, jonka jälkeen se käytetään hotellissa vessojen huuhteluvetenä. Kuumaa vettä tarvitaan lähinnä suihkuihin. Myös alueen lattialämmitteisissä loma-asuntoissa käytetään alhaisia lämpötiloja, maksimissaan +35 °C. Normaalin käyttöveden lämpötila on noin +65 °C. Alueen lämpöenergia saadaan Vuokatin hakkeella toimivasta kaukolämpölaitoksesta. Suunnitteilla on ollut myös lämmön talteenotto järvivedestä. Hanke 1 MW järvilämpövoimalasta on toistaiseksi toteutumatta. Lisäksi osa alueen sähköenergiasta saadaan aurinkopaneeleista (Haastattelu, Yle Uutiset 2017).

Esimerkki 2: matkailu- ja elämyskeskus

- Arvolupaus
 - Nykyinen Pyhäsalmen kaivosalue sijaitsee luonnonkauniilla alueella hyvien kulkuyhteyksien päässä sijaitsevan, kauniin ja kalaisan, pinta-alaltaan 125 km² suuren Pyhäjärven välittömässä läheisyydessä, jossa on loistavat mahdollisuudet luontomatkailuun ja -aktiviteetteihin. Kaupungista löytyy jo tällä hetkellä monia harrastusmahdollisuuksia, kuten jää- ja uimahalli. Kaivosympäristö tarjoaa ainutlaatuisen ympäristön monipuolisiin matkailupalveluihin elämyksistä, historiasta, luonnosta, kylpylään ja majoituksiin sekä ravintolapalveluihin. Puhtaan energian ratkaisut vahvistavat positiivista mielikuvaa ja kiinnostusta ympäristötietoisuuden aikana ja houkuttelevat paikalle myös yrityksiä.
- Kohderyhmä
 - Paikkakunnan ja lähiseutujen asukkaat, kotimaiset ja kansainväliset matkailijat, markkinointia ja palveluita kehitetään yhdessä mm. Lapin matkailun kanssa. Callion monipuolinen toiminta tuo alueelle mm. yrittäjävierailijoita. Tärkeä kohderyhmä on myös eri ikäisille tarkoitettut seurakuntat ja yhdistykset, tarjonnassa huomioidaan niin seniorit kuin urheiluseurat ja heidän tarpeensa (leirit, koulutukset, kilpailutoiminta).
- Kustannukset vs. tulovirrat
 - Esimerkiksi pienimuotoinen kylpylätoiminta kaivoksessa ei tarvitsisi ulkopuolista lämpöenergiaa, vaan riittävä lämpö saataisiin pelkästään geotermisestä lämmöstä. Puhdas vesi pitäisi pumpata kaivokseen, jossa se lämmitettäisiin ja säilöttäisiin kaivoskäytävissä. Kaivoksesta saatavalla matalalämpöisellä energialla voitaisiin myös lämmittää osan vuotta käytössä olevia loma-asuntoja, jotka voisivat sijaita lähellä nykyistä golf-kenttää. Myös alueelle sijoitettava terveyskylpylä pysyttäisiin lämmittämään pelkästään kaivoksesta saatavalla lämpöenergialla.

Tekstiili- ja autopesulat

Pesulat ovat suuri lämpöenergian kuluttaja, jotka käyttävät energiaa mm. pesuveden lämmitykseen, vaatekuivureiden kuivausilman lämmitykseen sekä höyryntuotantoon mankelointia ja pesuveden lämpötilan ylläpitoa varten. Kulutetun energian määrä vaihtelee pesulan koon mukaan tuhansista megawattitunneista satoihin megawattitunteihin. Suurin osa energiasta käytetään pesuveden lämmittämiseen ja tekstiilien loppukäsittelyyn. Tästä energiasta noin 90 % on lämpöenergiaa ja loput sähköä. Höyryntuotanto toteutetaan yleensä pienillä höyrykonteilla ja höyrygeneraattoreilla, jotka toimivat polttoöljyllä, nestekaasulla tai maakaasulla. Pesuloiden lämmönkulutus vaihtelee välillä 0,6 – 3,86 kWh/kg pyykkiä (itävaltalainen selvitys, Uusitalo, 2018). Mankeleissa käytettävän höyryn tulee olla noin 150 °C lämpötilassa ja 6 barin paineessa (Uusitalo, 2018). Uusien pesuaineiden ansiosta pesu tapahtuu alhaisella 45–60 -asteisella vedellä. Lämpöä otetaan talteen lämmönottojärjestelmillä jätevesistä ja kuivaimien lämmöstä. Pesulat ovat kiinnostuneita uusista energiaratkaisusta ja energiakulujensa minimoinnista (Califa Oy).

Kansainvälinen pesulayritys Lindström kuluttaa energiaa 1,0 kWh/kg ja mittaa CO₂-päästöjä. Yritys käyttää ensisijaisesti maakaasua energialähteenä, minkä saatavuus on yksi sijaintipaikkaan vaikuttava tekijä. Tärkein seikka pesulan sijainnille on asiakkaiden läheisyys, koska halutaan minimoida kuljetukset ja niihin liittyvät päästöt. Lindströmillä ajatut kilometrit pestyä pyykkikiloa kohti ovat keskimäärin 0,2. (Lindström Oy 2019). Ison pesulayrityksen saaminen Pyhäsalmele on kuitenkin epätodennäköistä, koska etäisyydet isoihin asiakkaisiin (mm. matkailukeskukset, sairaalat, varuskunnat jne.) ovat suhteellisen pitkät.

Tekstiilien pesun sijaan Pyhäsalmen kaivosalueella voisi toimia esim. kuorma-autojen, rekkojen ja työkonien pesua harjoittava yritys, jossa keskeinen valtti olisi sijainti vilkkaasti liikennöityjen teiden varrella. Alueella voisi toimia myös raskaan kaluston korjausta ja katsastusta tarjoavat yrittäjät. Lisäksi löytyisi tiloja, jotka soveltuisivat hyvin mm. autojen renkaiden varastointiin. Tähän yhteyteen kannattaisi hyödyntää myös ammattiautoilijoille soveltuvien matkailupalveluiden kehittämistä.

Varastointi (maanalainen, maanpäällinen)

Kaivoskäytävissä voitaisiin varastoida tuotteita, jotka vaativat ympäri vuoden tasaisen lämpötilan ja kosteuden. Myös osa maanpäällisistä tiloista soveltuu hyvin varastoiksi. Maanalaisen varastointiin liittyy kysymys tavaran kuljettamisesta kaivokseen. Hissikuljetus on mahdollinen vain kaivoksen pohjalle, josta tavara pitäisi siirtää ylöspäin autolla. Tästä syystä järkevintä olisi löytää tuotteita, joiden säilytys onnistuu joko kaivoksen pohjatason lämmössä tai lähellä maanpintaa. Lisäksi kaivosveden happamuus, mikä nopeasti syövyttää metalleja ja muita materiaaleja, aiheuttaa haasteita varastoinnille.

Teollisuuskylä (testaus, korjaus, kunnossapito)

Kaivosalueen vapautuvia tiloja voidaan tarjota yrityksille tiloiksi. Esimerkiksi tilat soivat erinomaisesti koneiden ja laitteiden huolto- ja kunnossapitoyrityksille. Rikastamo tarjoaa myöhemmin tilaa esimerkiksi paljon tilaa vaativalle raskaalle konepajateollisuudelle. Vastaavasti konttorirakennuksissa ja muissa tiloissa vapautuu tilaa toimistoille, varastoille ja erilaisiin muihin aktiviteetteihin. Lähtökohta on, että tilojen energiakulut olisivat hieman alemmat kuin muissa vastaavissa tiloissa. Lisäksi hiilivapaa energia luo alueen yrityksille positiivista imagoa.

Kuivausprosessit ym. teollisuuskäyttö

Geotermistä lämpöä on käytetty mm. maataloustuotteiden kuvaukseen kuten vehnän ja muiden viljatuotteiden, vihannesten, kalojen ja puutavaran kuivaukseen. Geotermistä lämpöä on myös käytetty teollisissa prosesseissa, joissa tarvitaan paljon lämpöenergiaa ympäri vuoden esimerkiksi veden ja hiilihappojuomien pullotus, maidon pastörinti, kemialliset uuttoprosessit, sellu- ja paperiteollisuuden prosessit sekä boorihapon valmistus (Lund & Boyd, 2016).

Bioenergiaterminaali (BET) –hankkeessa määriteltiin Pyhäjärven bioenergiaterminaalin liiketoimintakonseptit (Ramboll, 2019). Tarkoituksena on siirtää Pyhäjärven keskustassa oleva terminaali lähelle kaivosaluetta. Selvityksen yhteydessä yhtenä mahdollisuutena laskettiin energiakaivos-hankkeessa tehtyjen geotermisen lämmön nostamiskustannuksiin pohjautuen, voitaisiinko tätä lämpöä hyödyntää hakkeen kuivatuksessa, mutta hakkeen kuivaus terminaalissa ei osoittautunut taloudellisesti kannattavaksi. Energialaitokset eivät ole valmiita maksamaan kuivemmasta hakkeesta 10 – 15 % kalliimpaa hintaa, jolla geotermisen lämmön tuoma lisäkustannus katettaisiin. BET-selvityksessä ehdotettiin sen sijaan ison biohiililaitokseen investointia, jonka sivuvirtana syntyisi pyrolyysinestettä ja muista tisleitä energiakäyttöön. Esimerkiksi vain 700–1000 tonnia biohiiltä Tampereella tuottava Carbofexin tehdas tuottaa vuodessa Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämpöverkkoon 1–2 megawatin teholla noin 5 000 megawattituntia energiaa, joka vastaa noin 300 omakotitalon vuotuista lämmitystarvetta (Metsään-lehti, 2019).

Kaivos energiavarastona –hankkeessa tavoitteena oli selvittää Suomen sähköntuotantojärjestelmän optimoidun tulevaisuuden pumppusäätövoimalaitoksen konseptin toimintamalli sijoitettuna Pyhäsalmen kaivokseen. Pumppusäätövoimalan toiminta perustuu suljettuun veden kiertoon. Vesi johdetaan ylävesialtaalta maanalaisista putkistoa pitkin pystysuuntaiselle pudotusputkelle, missä vesimassat pudotetaan alas aina 1500 metrin syvyyteen ja pumpataan jälleen yläaltaalle edullisemmalla yösähköllä. (Sweco, 2019). Mikäli pumppusäätövoimala toteutuu tulevaisuudessa, se vaikuttaa ratkaisevasti kaivosalueen muihin toimintoihin ja lämpöenergian talteenottoon.

Hanke Pyhäjärvi Data Center Campus Pyhäsalmen kaivoksen hyödyntäminen datakeskuksen sijaintipaikaksi selvitti alueen tiloja ja ympäristöä sijoittumiskohteena. Selvityksen perusteella Data Centerin sijoittamisen kannalta paras vaihtoehto Keiteleen tien länsipuolella Pyhäjärven läheisyydessä kaivoksen ollessa tien itäpuolella. Maanpäällisen osuuden lisäksi kohteeseen on sijoitettu maanalainen osuus lähelle maanpintaa. Kaivoksen pumppuasemaa voidaan hyödyntää jäädytysvedenottoa paikkana. Datakeskuksesta syntyisi myös hukkalämpöä, jota voitaisiin hyödyntää kaukolämmössä, rakennusten lämmityksessä, kaivoksen tuuletusilman lämmittämisessä, kasvihuoneella ja kalanviljelyssä (BusinessFinland, datacenters).

5 Johtopäätelmät

5.1 Pyhäsalmen geotermisen energian teknis-taloudellinen potentiaali

Pyhäsalmen kaivos tarjoaa geotermisen energian tuotannolle mahdollisuuden vailla vertaa. Euroopan syvimmän kaivoksen maanalaisiin tiloihin voidaan sijoittaa lämpökaivoja kentiksi monenlaisiin tarpeisiin. Kaivoksen pohjalle sijoitetut, esim. 300 m syvät, lämpökaivot voidaan mitoittaa tuottamaan lähes 20 °C lämmintä vettä useiden megawattien teholla, jolloin vuotuinen lämpöenergiantuotanto voi nousta kymmeniin gigawattitunteihin vuodessa. Lämpökaivokentät voidaan pyrkiä tekemään mahdollisimman syviksi, jolloin kaivoista saatava lämpötilataso nousee mutta vastaavasti nousevat myös kustannukset. Toisaalta kaivoja voidaan sijoittaa pienempään kalliotilavuuteen hyvin tiheästi, jolloin kenttä jäähtyy nopeasti, mutta on vastaavasti myös lämmitettävissä ulkoisella energialla. Näin maanalaisesta kaivokentästä voidaan tehdä myös ympäristöään lämpimämpi varasto, josta talven aikana hyödynnetään sinne kerättyä hukkalämpöä.

Maanalaisen kaivokentän investointikustannukset ovat tämän alustavan arvion perusteella suuruusluokkaa 1 M€/MW, mutta alkuinvestointina tulee lisäksi lämmönsiirto-
linjan rakentaminen kaivoksen pohjalta maan pinnalle. Vastaavan maan pinnalta poratun kaivokentän porauksen metrihinta saattaa olla hieman edullisempi, mutta metrejä tarvitaan karkeasti arvioiden kaksinkertainen määrä samaan lämpötehoon pääsemiseksi ja kuitenkin kaivoista saataisiin ylös vain noin 0 °C lämpötilataso. Tällä hetkellä Suomessa kehitetään ja pilotoidaan tekniikkaa keskisyvän energian hyödyntämiseen maan pinnalta jopa yli 2 kilometrin syvyyteen porattavista rei'istä, mutta niissä toteutuksen haasteet ovat suuret ja kustannukset saatavaan tehoon suhteutettuna tulevat ilmeisesti kohoamaan huomattavasti suuremmiksi kuin Pyhäsalmen valmista kaivostilaa hyödynnettäessä.

5.2 Tulevaisuuden mahdollisuudet ja vaihtoehdot

Seuraavassa on esitetty kolme tulevaisuuden näkymää liittyen geotermisen energian hyödyntämiseen Pyhäsalmen kaivoksesta:

1) Kaivos täyttyy vedellä (0-vaihtoehto):

Mikäli maanalainen kaivos ei jatka missään muotoa toimintaansa ja sen annetaan täyttyä vedellä, ei kallion geotermistä lämpöä saada käyttöön kuin hyvin rajallinen määrä. Kaivoksen täyttävästä vedestä voitaisiin ottaa lämpöenergiaa maanpäällisten rakennusten lämmitykseen alkuvaiheessa muutaman sadan kilowatin teholla, mutta kaivoksesta saatava vesi jäähtyisi jo kymmenessä vuodessa selvästi ja lämpöpumpun hyötysuhde huononisi ajan myötä.

2) Strategia kaivoksen geotermisen energian hyödyntämiseksi lämpöpumppujen avulla

Geotermisen energian hyödyntäminen toteutetaan käyttäen Energiakaivos-hankkeessa tarkasteltuja konseptivaihtoehtoja seuraavasti:

- Tehdään järjestelmätason suunnittelu, jossa määritellään haluttu maan päälle tuleva lämpövirta ja lämpötilataso.

- Tehdään päätökset lämpökaivojen porausvyvyksistä ja kollektoriratkaisusta, tehdään tarvittava kollektorikonseptin jatkokehittely ja teknis-taloudellinen optimointi. Testataan pilottirei'istä lämmönsaanti, arvioidaan vastaavatko ne mallinnustuloksia ja optimoidaan kaivopiirien vesikierto
- Tehdään tekninen toteutussuunnitelma ja kustannusarvio lämmönsiirtolinjalle kaivoksesta maan pinnalle
- Toteutetaan lämmönsiirtolinja ja lämpöpumppulaitos, porataan kaivot (kaivoja). Asennetaan kollektorit, joissa on tarvittavat säätö- ja seurantavalmiudet. Kytetään kaivot lämmönsiirtolinjaan.
- Maan päällä lämmönsiirtolinja päättyy jakokeskukseen, josta lämmintä vesivirtaa jaetaan keskitettyyn lämpöpumppulaitokseen tai siirretään suoraan asiakkaalle, joka käyttää matalan lämpövirran suoraan esimerkiksi oman lämpöpumppunsa lämmönlähteenä. Lämpöpumppulaitos tuottaa asiakkailleen halutun lämpöistä lämpövirtaa, lämmön hinta riippuu halutusta lämpötilatasosta. Lämmön jakokeskuksella on valmius ottaa vastaan ylijäämälämpöä eri lähteistä ja siirtää sitä takaisin maanalaiseen kalliovarastoon. Esimerkiksi kaivoksen poistoilmaan integroitu ilmalämmön talteenotto lämpöpumpulla toimii erityisesti kesällä hyvällä hyötysuhteella, joten voi olla järkevää tuottaa sillä kesäaikaan lämpöä varastoon.
- Lämmönsiirtolinja mitoitetaan niin, että se järjestelmän kasvaessa pystyy välittämään halutun lämpötehon. Saatava lämpöenergia riittää alueen rakennusten lämmityksiin ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi läheisen Ruotasen alueen lämmitykseen paikallisesti. Lämpöpumppulaitos voi toimia esimerkiksi hakepohjaisen lämpölaitoksen rinnalla.

Toteutuessaan tämä järjestelmä on ainutlaatuinen konseptiltaan. Hyvin mahdollista on, että se saattaisi olla myös Suomen suurin yksittäinen geotermisen lämmön tuotantolaitos. Alustavien arvioiden pohjalta ei ole näkyvissä estettä sen toimivuudesta minkään komponentin osalta. Alustavat laskelmat myös osoittavat, että lämpöä pystytään tuottamaan kilpailukykyiseen hintaan. Tarkempi kustannus- ja riskiarviointi on kuitenkin oleellinen osa laitossuunnittelua.

3) Visio: Pyhäsalmi hiilivapaan lämmöntuotannon demonstraatiokohteena

Tulevalla vuosikymmenellä koko maapallon asukkaat joutuvat tekemään valintoja, joilla toiminta muuttuu nopeaan tahtiin hiilineutraaliksi ja jopa hiilivapaaksi. Suomi sitoutuu valtione tähän kehitykseen, jota poliittiset päätökset tulevat tukemaan. Pyhäjärvi pienenä asutuskeskuksena voi olla tämän kehityksen eturintamassa, koska käytettävissä ovat Euroopan syvimmän kaivoksen uusiokäyttömahdollisuudet. Kaivoksen syvyyksistä saatava geoterminen lämpö on yksi tämän kehityksen liikkeelle paneva voima.

Edellä kuvattu kaivoksen lämpöenergian hyödyntäminen voi mahdollistaa koko Pyhäsalmen taajama-alueen energiajärjestelmän muuttumisen hyvin vähähiiliseksi kaukolämpöjärjestelmän hyödyntäessä lämpöpumppuvoimalaa. Kaukolämpöverkkoa saneerataan, verkko avataan kaksisuuntaiseen käyttöön ja mahdollisesti sen lämpötilatasa alennetaan. Asukkaat voivat asentaa taloihinsa aurinkolämmön keräyksen ja syöttää niiden kesäaikaan tuottaman lämmön kaukolämmön paluuvirtaan, josta se ohjautuu kaivoksen lämpövarastoon ja hyvitetään talvella lämmityskuluissa. Käyttökelpoista

hukkalämpöä syntyy myös jäähallin ja kauppojen kylmälaitteilta. Lämpöverkkoon kytkeytyneiden kasvihuoneiden lämmitys tapahtuu hiilivapaasti, jolloin niiden nettovaikeus ilmakehään on hiiltä poistava. Kun kuluttajien ympäristötietoisuus lisääntyy nopeasti, tulee tuotteiden hiilivapaudesta myös myyntivaltti.

Kaivoslämpölaitos tukee olemassaolollaan pumppusäätövoimalahankkeen toteutusta, koska maanalaisen tilan käyttökustannukset jakautuvat useammalle toimijalle. Pumppusäätövoimalan hukkalämpöä hyödynnetään kaivoslämpölaitoksessa. Alueella on myös tarjolla edullista hiilivapaata sähköenergiaa, jota tuotetaan aurinko- ja tuulienergiasta, jonka kysyntä-tarjontatasapainoa pumppuvoimala pitää yllä. Pyhäsalmen kaivosalue tarjoaa hiilivapaata geotermistä lämpöä alueella toimiville teknologiayrityksille sekä sinne investoiville teollisuusyrityksille. Kaivosalueelle voi sijoittua aurinkon lämpöenergian keräyskenttä (esim. 1 ha), joka kerää kesäkuukausina 3 GWh aurinkon lämpöenergiaa maanlaiseen lämpövarastoon nostaen kaivokentän lämpötilaa noin 2–6 astetta ja alentaa siten talvella lämpöpumppuvoimalan tuotantokustannuksia. Alueelle tulee kylmätilaa tarvitsevia yrittäjiä, jotka saavat talviaikaan kylmennyksen lämpöpumppulaitokselta ja tuottavat kesäaikaan kylmälaitteiden tarvitseman sähkön rakennusten katoilla olevilla aurinkopaneeleilla.

Pyhäsalmen kaivosalueesta kehittyy uusiutuvien energiamuotojen pilotointi- ja esimerkkikohde, joka herättää kiinnostusta Suomen asutuskeskusten lisäksi laajalti myös ulkomailla. Pohjois-Pohjanmaa on liittynyt geotermisen energian älykkään erikoistumisen (S3) verkostoon (kts. EU, 2019), jonka kautta Pyhäjärven alueelta on suora yhteys kansainvälisiin verkostoihin ja siten eurooppalaisiin alan toimijoihin. Pyhäjärven kaupunki on positiivisesti tunnettu uusiutuvien energiamuotojen edistäjä ja käyttäjä. Edullinen ja päästötön energia houkuttelee alueelle niin energian hyödyntämisen liittyvien teknologisten ratkaisujen ja palveluiden kehittäjiä, kuin lämpöenergiaa tarvitsevia yrityksiä, jotka korvaavat kaivoksesta ja sen palveluiden tuottajilta poistuvia työpaikkoja ja alueen talous ja väestörakenne kääntyy positiiviseen kehitykseen.

Lähdeluettelo

- Acuña, J. (2013). Distributed thermal response tests – New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes, Doctoral Thesis, KT
- Adams, C., Monaghan, A., & Gluyas, J. (2019). Mining for heat. *Geoscientist*, 29(4), 10-15.
- Bao, T., Liu, Z., Meldrum, J., Green, C., Xue, P., & Vitton, S. (2018). Field tests and multiphysics analysis of a flooded shaft for geothermal applications with mine water. *Energy conversion and management*, 169, 174-185.
- Billock, J. (2017) These five abandoned mines have been transformed into subterranean wonderlands. <https://www.smithsonianmag.com/travel/former-mines-find-modern-glory-180967649/>
- BusinessFinland (2019). Energiatuki <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki/>
- BusinessFinland, datacenters (2019) <https://www.businessfinland.fi/en/do-business-with-finland/explore-finland/ict-digitalization/data-centers/?profile=callio-data-center-campus-pyhjrvi#profile>
- CADDET, IEA, OECD (2019) Geothermal mine water <https://www.nrcan.gc.ca/sites/oeec.nrcan.gc.ca/files/pdf/publications/infosource/pub/ici/caddet/english/pdf/R122.pdf>
- Energia.fi (2019) https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot
- Energiateollisuus (2019) Kaukolämmön hinta 1.1.2019 https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html
- Energiateollisuus ry (2018). Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset 2017. [file:///lipasto/kotidir06\\$/ulehtine/My%20Documents/KSITUTKIMUS/Energia-kaivos/Johtorakennuskustannukset_2017.pdf](file:///lipasto/kotidir06$/ulehtine/My%20Documents/KSITUTKIMUS/Energia-kaivos/Johtorakennuskustannukset_2017.pdf)
- Energiateollisuus (2018) Kaukolämpötilasto 2018. <https://energia.fi/files/3935/Kaukolampotilasto2018.pdf>
- EU (2019). <https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/-/s3-partnership-geothermal-energy-2-0-kick-off-meeting-and-workshop?inheritRedirect=true&redirect=%2Fgeothermal-energy>
- First Quantum Minerals Ltd. (2019) <https://www.first-quantum.com/Our-Business/operating-mines/Pyhasalmi/default.aspx>
- Gehlin S., Andersson O., Bjelm L., Alm P-G and Rosberg J-E. (2015). Country update for Sweden. Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Hall, A., Scott, J.A., Shang, H. (2011) Geothermal energy recovery from underground mines. *Renew. Sust. Energy Rev.* 15, 916 – 924.
- Holopainen, R., Huusko, A., Heikkinen, J., Korhonen, K., Ritola, J. (2013). Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä. Tutkimusraportti VTT-R-04082-13.
- HS (2019) Italiassa naurettiin, kun suomalaisyrittäjä kertoi aloittavansa tomaattimurskan tuotannon: ”Sieltä tuli perään sivukaupalla italialaista lainsäädäntöä” Helsingin Sanomat 3.11.2019. <https://www.hs.fi/talous/art-2000006294148.html>
- Jones, M.Q.W. (2018). Virgin rock temperatures and geothermal gradients in the Bushveld Complex. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 118 (7)
- Juvonen, J, Lapinlampi, T. (2013) Energiakaivo – maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2013. Ympäristöministeriö.
- Kainuun ja Koillismaan kalaleader.(2019) Kaivosalueen soveltuvuus vesiviljelyyn kaivostoiminnan loputtua Pyhäjärvellä. Loppuraportti 20.3.2019.
- Kuntaliitto (2017) Tietoja pienistä lämpölaitoksista vuodelta 2016 https://www.kuntaliitto.fi/sites/default/files/media/file/Tietoja%20pienistä%20lämpölaitoksista%20vuodelta%202016_0_0.pdf

- Lara, L.M., Colinas, I.G., Mallada, M.T., Hernández-Battez, A.E., Viesca, J.L. (2017). Geothermal use of mine water. *European Geologist Journal* 43, 40 - 45
- Laughlin, A.W. (1981) The geothermal system of the Jemez Mountains, New Mexico and its exploration. In: Rybach, L., & Muffler, L. J. P. Geothermal systems: principles and case histories. Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience, 1981. 371 p.
- Lindström (2019) Vastuuraportti 2018 <https://lindstromgroup.com/fi/yritys/vastuullisuus/>
- Luke (2018) Kasvistuotantoa kaivoksessa. Loppuraportti. 1.10.2016-31.12.2018.
- Lund, J.W. & Boyd, T.L. (2016) Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics* 60, s. 66-97.
- Luttinen, J. (2018) Pyhäsalmen kaivoksen kehittäminen elämyskohteeksi. Opinnäytetyö. Larea-ammattikorkeakoulu.
- Merta, M. (2016). Vuoreksen Aurinkorinteen pientalolämmitysjärjestelmien vertailu. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Metsään-lehti (2019) Biohiileltä odotetaan paljon. <https://www.metsaan-lehti.fi/uutiset/metsien-kaytto/biohiilelta-odotetaan-paljon.html>
- Motiva (2019) Motiva.fi-maalämpöpumppu https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp
- Pohjois-Pohjanmaan rakennettu kulttuuriympäristö 2015. Pyhäjärvi <https://docplayer.fi/38122149-Pohjois-pohjanmaan-rakennettu-kulttuuriymparisto-2015.html>
- Pyhäjärven Energia ja Vesi Oy (2019) <http://pyhajarvenenergiajavesi.fi/>
- Pyhäjärven kaupunki (2019) Talousarvio 2019. Taloussuunnitelma 2020-2021. <https://www.pyhajarvi.fi/sites/pyhajarvi.fi/files/Talousarvio%202019%20ja%20toimintasuunnitelma%202020-2021.pdf>
- Ramboll (2019) BET-hanke: Pyhäjärven bioenergiaterminaalin liiketoimintakonseptien määrittely. Kesäkuu 2019. Sisäinen raportti
- Ranta (2019) Vaihtoehtoisten lämmitysjärjestelmän kannattavuus kiinteistökokoluokassa. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Kandidaatintyö.
- Reiter, M., Weidman, C., Edwards, C.L. & Hartman, H. (1976). Subsurface Temperature Data in Jemez Mountains, New Mexico. Socorro, NM: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources. Report No.: Circular 151
- Ruskeeniemä, T., Ahonen, L., Paananen, M., Frape, S., Stotler, R., Hobbs, M., & Lehto, K. (2004). Permafrost at Lupin REPORT OF PHASE II. Geologian tutkimuskeskus. Ydinjätteiden sijoitustutkimukset. Report YST-119.
- Silvenius F. et al. (2019) Kasvihuonetuotteiden ilmatovaikutuslaskenta 2004 ja 2017 todellisten energiakulutustilastojen perusteella sekä vesijalanjälki. LUKE. Helsinki.
- Skrökki, J. (2013). Öljylämmitteisen aluelämpökeskuksen korvaaminen pelletti-, hake- tai maalämpölaitoksella. Opinnäytetyö, Metropolia ammattikorkeakoulu.
- Sweco Ympäristö Oy (2019) Ruotasen osayleiskaava, Pyhäjärven kunta. Työnumero E27975. Luonnos 2019/2.
- Tenzer, H. Development of hot dry rock technology. *GHC Bulletin*, Dec. 2001.
- The Fishsitecom (2008). Raising Fish in Old Coal Mines: a Healthy Alternative? <https://thefishsite.com/articles/raising-fish-in-old-coal-mines-a-healthy-alternative>
- Tilastokeskus (2019) Voimalalaitospolttoaineiden hinnat lämmöntuotannossa https://www.stat.fi/til/ehi/2019/02/ehi_2019_02_2019-09-12_kuv_003_fi.html
- Uusitalo, A. (2018) Pesuläteollisuuden energiatehokkuuden parantaminen. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö.

- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Op't Veld, P., & Demollin, E. (2014) Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling. *Energy Procedia*, 46, 58-67.
- Yle, Uutiset (2017) Jääkylmä järvivesi lämmittää pian valtavan kylpylän – ensin tulevat aurinkopaneelit. <https://yle.uutiset/3-9868996>
- Ympäristö.fi (2019) Pientalon energiakulutus ja päästöt. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Korjaustieto/Pientalot/Energiatohokkuus/Energiatohokas_pientalo/Energiankulutus

Liite 1. Työpajojen materiaalia

Mahdolliset hyödyntäjät:

1. Energiayhtiöt
2. Kaukolämpöasukkaat
3. Kylpylä / mökki / seniorit (rakennusala)
4. Datacenter
5. Bioenergiaterminaali
6. High security- pankki
7. Kiipeilykeskus
8. Teematurismi
9. hyperloop
10. Testaus (teknologia, juna)
11. Pumppuvoimalan energia
12. Koulutusmahdollisuudet (restonomit)
13. Puolustusvoimat
14. Hukkalämmön hyödyntäjät
15. Teollisuus / Tekniikka
16. Tutkimus ja kehittäminen
17. LVI
18. Jalostus
19. Kasvinviljely
20. LVI
21. ICT
22. Pelastus
23. Kypsyttäminen
24. Eksoottiset kalalajit

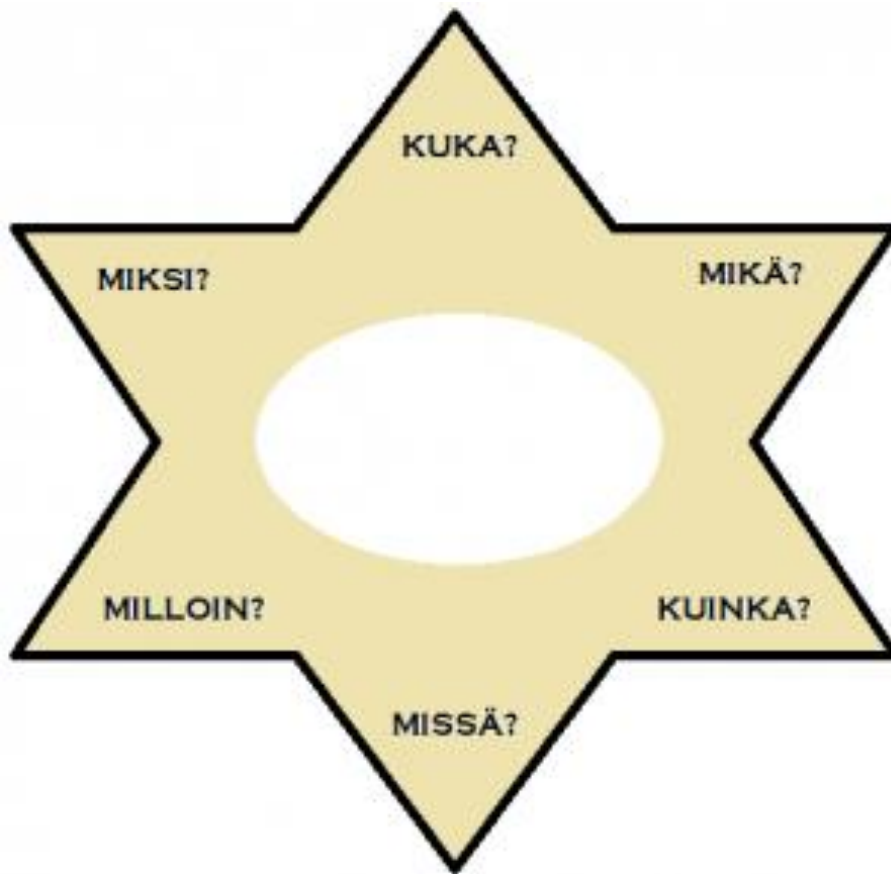
—

Miksi olisivat kiinnostuneet?

1. Edullinen lämpö/energia
2. Uusiutuva energia
3. CO²-vapaa
4. Ehtymätön
5. Paikallinen
6. Tarjoaa paljon mahdollisuuksia

Miksi eivät olisi kiinnostuneet / mikä estää / mitä pitäisi tapahtua, että voisi kiinnostaa?

1. Teknologia
2. Infrariski
3. Energian siirto
4. Investoinnin suuruus
5. sijainti
6. Paljon markkinointiresursseja
7. Yritys, joka ottaa vetovastuun



Kuinka, kuka, mikä – eli selvitettäviä ja ratkaistavia asioita

1. Rikastamon osuus lämmön siirrossa
2. ”Palavat louhokset”?
3. Poistoilman lämpöenergia
4. kaupunki mukana hankkeessa (esim. Ruotasen koulun lämmitys)
5. Kaivoksen sisäinen sähköntuotanto/ energiantuotanto etuna muille kaivosalueella toimijoille
6. Callio liiketoimintakonsepti? Tilojen kiinteät kustannukset, vuokra, omistus?
7. Rikastushiekka-altaiden lämpö, tuuletuslämpö, vesitankkien lämpö, kaasu

Liite 2. Kaivosalueen layout

