



OUTOKUMMUN KAIVOSTUNNELI 60-LUVULLA. KUVA: OUTOKUMPU OY



MEGAWATIN LÄMPÖPUMPPU.
KUVA: ASMO HUUSKO, GTK



AVOLOUHOS USA:SSA.
KUVA: SINI AUTIO, GTK

Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä

Kirjoittajat: Riikka Holopainen VTT
Asmo Huusko GTK
Jorma Heikkinen VTT
Kimmo Korhonen GTK
Jouko Ritola VTT

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Tekes, Ritva Heikkinen Pyhäsalmi Mine Oy, Anja Pekkala Lohjan Energiahuolto Oy Loher, Markus Tamminen Outokummun Energia Oy, Ilkka Tolonen		Asiakkaan viite
Projektin nimi Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä		Projektin numero/lyhytnimi MINERES
Raportin laatija(t) Riikka Holopainen VTT; Asmo Huusko GTK; Jorma Heikkinen VTT; Kimmo Korhonen GTK; Jouko Ritola VTT		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 48/
Avainsanat kaivokset, geoterminen energia, lämmöntalteenotto, kaivosvesi		Raportin numero VTT-R-04082-13
Tiivistelmä <p> Tekesin Green Mining-ohjelmaan kuuluneen ”Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä” (Mining Sites as Renewable Energy Sources, Mineres)-hankkeen tavoitteena oli tuottaa yleiset suuntaviivat geotermisen lämmityksen ja viilennyksen tuottamiseksi toimivista ja suljetuista kaivoksista. Hankkeessa haettiin hyödyntämismahdollisuuksia geotermiselle lämmitykselle ja viilennykselle kolmella suomalaisella kaivospaikkakunnalla: Pyhäsalmissä, Lohjalla ja Outokummussa. Hankkeessa tutkittiin näillä paikkakunnilla sijaitsevien kaivosten erilaisia lämmöntalteenottomahdollisuuksia kaivostilojen kuivanapitovedestä, ilmanvaihdosta ja prosessilaitteista. Kotimaisten ja ulkomaisten laite toimittajien (Scancool, KWH Pipe, Kaeser) kanssa tehtiin yhteistyötä lämmöntalteenoton käytännön toteutusten kannattavuuden arvioinnissa. </p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 12.6.2013 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Riikka Holopainen, tiimipäällikkö	Pekka Huovila, asiakaspäällikkö	Jari SHEMEIKKA, teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot Tekniikantie 4a, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tekes, Pyhäsalmi Mine Oy, Lohjan Energiahuolto Oy Loher, Outokummun Energia Oy, VTT, GTK		
<p style="text-align: center;"> <i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i> </p>		

Alkusanat

Tekesin Green Mining-ohjelman visiona on tehdä Suomesta olisi vuonna 2020 ekotehokkaan mineraaliteollisuuden globaali edelläkävijä. Ekotehokkuus kattaa koko kaivostoiminnan kaivoksen perustamisesta sen lopettamisen jälkeiseen mahdolliseen hyötykäyttöön.

Tekesin Green Mining-ohjelmaan kuuluneen ”Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä” (Mining Sites as Renewable Energy Sources, Mineres)-hankkeen tavoitteena oli tuottaa yleiset suuntaviivat geotermisen lämmityksen ja viilennyksen tuottamiseksi toimivista ja suljetuista kaivoksista. Hankkeessa haettiin hyödyntämismahdollisuuksia geotermiselle lämmitykselle ja viilennykselle kolmella suomalaisella kaivospaikkakunnalla: Pyhäsalmissa, Lohjalla ja Outokummussa. Hankkeessa tutkittiin näillä paikkakunnilla sijaitsevien kaivosten erilaisia lämmöntalteenottomahdollisuuksia kaivostilojen kuivanapitovedestä, ilmanvaihdosta ja prosessilaitteista. Kotimaisten ja ulkomaisten laitetoimittajien (Scancool, KWH Pipe, Kaeser) kanssa tehtiin yhteistyötä lämmöntalteenoton käytännön toteutusten kannattavuuden arvioinnissa.

Hankkeen johtoryhmä koostui hankkeen rahoittajien (Tekes, Pyhäsalmi Mine Oy, Lohjan energiahuolto Oy Loher, Outokummun Energia Oy) edustajista sekä tutkimusosapuolien (GTK, VTT) edustajista.

Espoo 12.6.2013

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	3
1 Johdanto.....	6
2 Kaivoksen energiapotentiaalin arvioiminen	7
2.1 Tarvittava taustatieto.....	7
2.2 Kivilajien lämmönjohtavuus.....	7
2.3 Veden käyttö kaivoksessa ja kuivanapitopumppaus	8
2.4 Kaivoksen sulkeminen	10
3 Lämmöntalteenotto kaivosvedestä	11
3.1 Kaivosveden lämpötila	11
3.2 Lämmöntalteenottojärjestelmät	13
3.2.1 Suljettu järjestelmä.....	13
3.2.2 Avoin järjestelmä.....	13
3.2.3 Puoliavoin järjestelmä	14
3.2.4 Järjestelmien vertailu	14
3.3 Kaivosvesien hyödyntämiseen liittyvä lainsäädäntö ja riskit	15
3.3.1 Yleistä	15
3.3.2 Kalliopohjavesi	16
3.3.3 Vesilaki.....	16
3.3.4 Ympäristön suojelulaki	16
3.3.5 Riskit	17
4 Lämmöntalteenotto kaivosprosessista: kompressorien jäähdytys	18
4.1 Kompressoreiden lämpötase	18
4.2 Lämmöntalteenotto kompressorien poistolämmöstä	19
4.3 Lämmöntalteenotto kompressorien jäähdytysöljyjärjestelmästä	20
4.4 Lämmöntalteenotto ilmajäähdytteisten kompressorien poistolämmöstä	21
5 Kaivospaikkakuntakohtainen tarkastelu.....	22
5.1 Pyhäsalmen kaivos	22
5.1.1 Kaivoksen energiantarve.....	22
5.1.2 Kaivosveden hyödyntäminen kaivoksen tuloilman lämmittämiseen ...	22
5.1.3 Rikastamo	23
5.1.4 Laguna-hanke	24
5.2 Lohja	25
5.2.1 Lohjan Energiahuolto Oy Loher	25
5.2.2 Ojamon kaivosallas	26
5.2.3 Nordkalk Tytyrin kaivos.....	26
5.3 Outokumpu	27
5.3.1 Outokummun Energia Oy.....	27
5.3.2 Outokummun kaivos	27
6 Laskennat tarkastelukohteille	29

6.1	Lämmöntalteenotto Pyhäsalmen kaivoksen poistoilmasta.....	29
6.2	Lämmöntalteenotto Lohjan Ojamon avolouhoksesta	32
6.3	Lämmöntalteenotto Outokummun vinotunnelista.....	38
7	Liiketoimintamallit	44
8	Yhteenveto	45
8.1	Johtopäätökset.....	45
8.2	Ehdotuksia jatkotarkasteluille.....	45
	Lähdeviitteet	47

1 Johdanto

Toiminnassa olevista kaivoskuiluista ja muista kaivoksen maanalaisista tiloista on poistettava jatkuvasti vettä, ja käytöstä poistetut tilat täyttyvät tavallisesti nopeasti vedellä. Kuilun sisältämästä vedestä voidaan ottaa talteen lämmönvaihtimien ja lämpöpumppujen avulla lämpö- ja jäähdytysenergiaa. Kaivosvedellä voidaan siten tuottaa uusiutuvaa energiaa vuoden ympäri, sääolosuhteista riippumatta. Myös vedellä täyttyneet avolouhokset ovat potentiaalisia lämmönlähteitä.

TEKESin Green Mining- ohjelman tavoitteena on luoda kasvavan ja perinteisen kaivostoiminnan rinnalle uutta, erityisosaamista vaativaa liiketoimintaa. Keskeisenä tavoitteena on kasvattaa vientiin tähtäävien pk-yritysten määrää mineraaliklusterissa. Keskeinen teema GreenMining-ohjelmassa on energiatehokkuus kaivoksen koko elinkaaren aikana, mikä oli myös Kaivokset uusiutuvan energian tuottajina ja hyödyntäjinä (MINERES)-hankkeen tavoite.

MINERES-hanke oli esiselvityshanke, joka tavoitteena oli tuottaa konkreettista tietoa hanketta rahoittaville yrityksille sekä yleisempiä hyödyntämiskenaarioita kaivos-, energia- ja rakennusosalalle sekä viranomaisille. Hankkeen aluksi tutkimusryhmä vieraili kunkin yritysrahoittajan luona selvittämässä heidän tarpeitaan ja toiveitaan hankkeen suorittamista koskien. Lohjan Energiahuolto Loherilla tavattiin 6.3. toimitusjohtaja Markus Tamminen, Outokummussa 7.3. toimitusjohtaja Ilkka Tolonen ja Inmet Pyhäsalmissa 15.3. tehdaspalvelupäällikkö Pauli Koistinen. Yhteydenpitoa yritysten kanssa jatkettiin hankkeen edetessä.

Hankkeen keskeisenä ideana oli kaivoksista saatavan geoenergian (lämmön ja viilennyksen) hyödyntäminen paikallisesti kaivoksilla sekä alueellisessa verkostossa. Hankkeessa tutkittiin vedellä täyttyneiden kaivostilojen termodynaamista käyttäytymistä laskennallisesti ja simuloimalla. Tähän raporttiin on koottu yhteenvetoa lämmöntalteenottoon vaikuttavista reunaehdoista sekä esitetty yleisiä suuntaviivoja geotermisen lämmityksen ja viilennyksen tuottamiseksi kaivoksista. Hankkeen tulosten perusteella voidaan jatkossa tehdä yksityiskohtaisempia hyödyntämis- ja toteutussuunnitelmia erilaisille kaivoskohteille.

2 Kaivoksen energiapotentiaalin arvioiminen

2.1 Tarvittava taustatieto

Kaivoksen hyödyntäminen energianlähteenä edellyttää monipuolisesti tietoa mm.:

- Kaivostilojen syvyyksistä, tilavuuksista, rakenteesta ja tilojen välisistä yhteyksistä, ns. kaivoksen pohjakartta/ malli
 - Louhintamäärä (tonnit/kuutiot) kertovat kaivoksen tilavuuksista
- Kaivosveden ominaisuuksista
- Pohjaveden liikkeestä kaivosalueella (hydrologia laajemminkin)
- Kaivoksen kivilajin ominaisuuksista (sekä malmi että sivukivi)
 - geohydrologiset ja geokemialliset ominaisuudet
- Maanpäällisten tilojen ja kaivosalueen nykyisestä käytöstä ja omistusoikeuksista
- Ympäristölainsäädännöstä
- Kaivoksen sulkemiseen liittyvästä ohjeistuksesta

Kaivoksen rakenteen tarkastelu voidaan tehdä karttojen ja rakennekuvien perusteella. Nykyinen louhintateknikka mahdollistaa kaivostilojen tarkan suunnittelun sekä toteutuksen mutta yleensä ollaan karttatiedon varassa. Kaivostiloihin liittyvä dokumentointi on siis ensiarvoisen tärkeää. Kaivoksen toiminnassa mukana olleiden haastattelut ovat yksi tietolähde.

Kaivostilojen käyttökelpoisuus on varmistettava myös paikan päällä. Käytöstä poistettujen kaivostilojen jälkiarviointi on varauksin mahdollista. Kaivostilojen sortumat sekä muut esteet vaikeuttavat tarkistustyötä. Lämmön talteenottotekniikan sijoittaminen tiloihin, jotka edellyttäisivät suurta työmäärää esim. sortumisen vuoksi, ei ole kannattavaa. Sortumat eivät kuitenkaan ole este veden liikkeelle, joten sortuneet tilat kannattaa huomioida potentiaalin arvioinnissa.

Energiapotentiaalin arvioimiseksi on suoritettava paikkakohtaisia mittauksia. Lähtötietoina tarvitaan mm. tietoa lämpötiloista eri syvyyksillä ja kaivoksen eri osissa. Veden laatua ja sopivuutta voidaan arvioida mm. happamuuden sekä veden kiintoainepitoisuuden perusteella. Mittaukset ja näytteiden otto voidaan suorittaa kaivostilojen tarkastelun yhteydessäkin.

2.2 Kivilajien lämmönjohtavuus

Kivilajin tehollinen lämmönjohtavuus (Taulukko 1) kertoo kallioperän lämmönjohtavuudesta. Korkea lämmönjohtavuus parantaa lämmön siirtymistä kauempaa kallioperästä kaivosveteen. Mitä korkeampi lämmönjohtavuus on, sitä enemmän lämpöä kalliosta voidaan ottaa tai sinne voidaan ladata. Kallion lämmönjohtavuus vaikuttaa kaivosveden lämpötilatasoon maanalaisissa kaivostiloissa voimakkaasti. Kivilajien mineraalikoostumus vaihtelee ja vaikuttaa lämmönjohtavuuteen. Esimerkiksi kvartsi parantaa tätä huomattavasti.

Kallioperää hyödyntävien energiajärjestelmien suunnittelussa GTK suosittelee, että kivilajin koostumus selvitetäisiin laboratoriossa ja tehollinen lämmönjohtavuus mitattaisiin poraamalla koereikä kallioon. Suurten, yli sadan kilowatin tehoisten energiajärjestelmien suunnittelussa GTK:n suositus on selvittää kivilajin koostumus laboratoriossa ja varmistuttaa tehollinen lämmönjohtavuus poraamalla kallioon oletettuun lämmönottosyvyyteen ylettyvä koereikä.

Taulukko 1. Yleisimpien kivilajien lämpöominaisuuksia

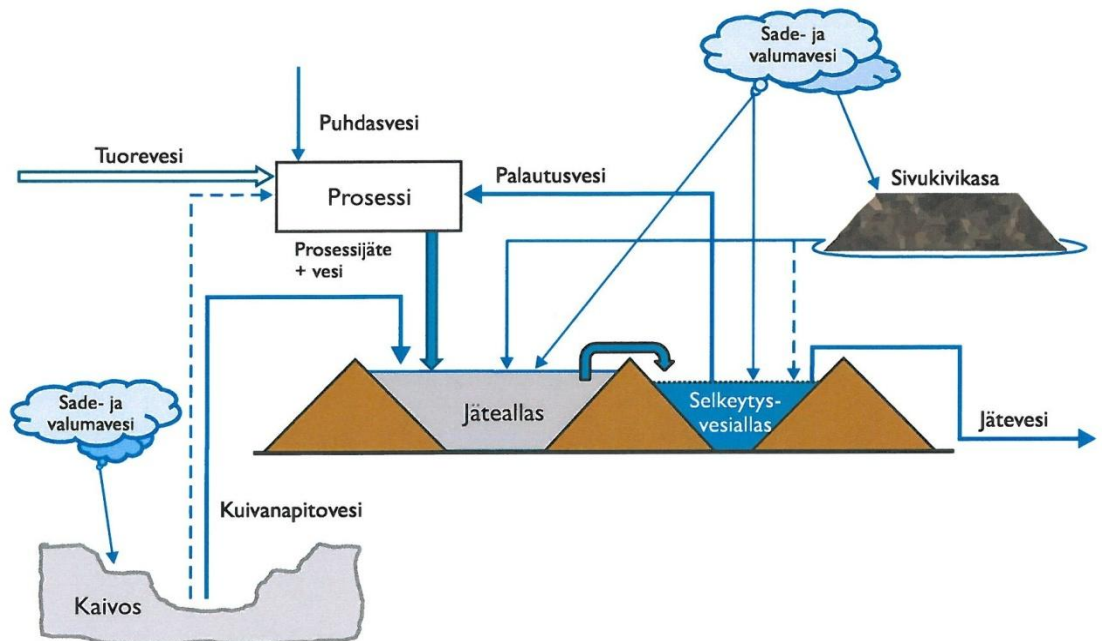
Kivilaji	Lämmönjohtavuus, W/mK	Ominaislämpö- kapasiteetti, kJ/kgK	Tilavuuden lämpökapasiteetti, kWh/m³ K
Graniitti	2.9 – 4.2	830	0.62
Hiekkakivi	3.0 – 5.0	730	0.55
Kvartsiitti	5.0 – 7.0	890	0.58
Kalkkikivi	1.7 – 3.0	840	0.63
Saviliuske	1.7 – 3.5	850	0.66

2.3 Veden käyttö kaivoksessa ja kuivanapitopumppaus

Kaivostoiminnassa tarvitaan suuria määriä vettä esimerkiksi seuraaviin tarkoituksiin:

- Porausvesi
- Varsinainen prosessivesi (jauhatus ja rikastus vesilietteessä)
- Tiivistevedet (pumput, imukoneet ym.)
- Kemikaalien valmistus
- Huuhteluvedet (laitteiden ja tilojen pesu ja huuhtelu)
- Pesuvedet (suodattimien pesu)
- Pölynpoistolaitteet

- Talousvesi (juomavesi)



Kuva 1. Kaivoksen perinteinen vesikaavio (Kauppila et al. 2011)

Vesiin ja vesien käsittelyyn liittyy kaivostoiminnassa ympäristöriskejä. Ympäristölle haitalliset mekanismit ovat rinnastettavissa myös riskeiksi energiantalteenottolaitteille (korroosio, saostuminen, ...). Osa vedentarpeesta voidaan kattaa veden takaisinkierrätyksellä eri prosessivaiheista. Toiminnassa tarvitaan kuitenkin myös puhdasta tuorevettä. Veden kierrätysmahdollisuudet riippuvat kaivoksen prosesseista ja niissä käytetyistä kemikaaleista. Kemikaalien pitoisuus vesissä kasvaa kierrätyksen myötä. Tämä väkevöityminen voi haitata kaivoksen esim. rikastusprosessia tai laitteiden toimivuutta muuten.

Kaivoksen tuorevesi otetaan yleensä läheisestä vesistöstä (joki tai järvi). Joissain tapauksissa tuorevetenä voidaan käyttää myös kaivoksen kuivanapitovettä joko sellaisenaan tai käsiteltynä. Useissa rikastamoissa tuoreveden tarve voidaan kattaa lähes täysin kierrätyksellä sekä kuivanapitovedellä.

Kaivoksen talousvesi saadaan yleensä paikallisen vesiyhtiön verkosta. Kaivoksilla voidaan hyödyntää myös omilla puhdistuslaitteilla käsiteltyä vettä esimerkiksi pesu- tai jäähdytysvetenä.

Kaivoksen pitämiseksi kuivana louhintaa varten kaivoksesta on pumpattava maanpinnalle pohjavettä sekä sinne valuvaa pintavettä, porausvesiä ja muita kaivoksen vesiä. Pumpkauksen tarve vaihtelee kaivoksittain riippuen kaivosalueen hydrologiasta. Pumpattavan veden laatuun vaikuttavat malmin koostumus sekä myös louhinnassa käytettävät räjähdysaineet. Malmin tyypistä riippuen louhinnassa voi liueta veteen esim. raskasmetalleja, puolimetalleja tai sulfaattia. Esimerkiksi sulfidimalmien louhinnassa kuivanapitovedet ovat tyypillisesti sulfidimineraalien hapettumisen seurauksena happamia ja metallipitoisia. Räjähdysaineista voi puolestaan liueta veteen typen yhdisteitä. Lisäksi kuivanapitovedet sisältävät usein hienojakoista kiviainesta liejuna sekä mahdollisesti myös kaivoskoneista valuneita öljyjä.

Louhinnassa käytettävät räjähdysaineet sisältävät lähes poikkeuksetta ammoniumnitraattia, joka voi liueta kaivosvesiin ja aiheuttaa rehevöittävää typpikuormitusta vesistöihin. Aikaisemmin yleisesti käytetty ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seoksesta (94% ammoniumnitraattia) koostuva, herkästi veteen liukeneva räjähdysaine korvataan nykyään niukkaliukoisilla räjähdysaineilla (75-85% ammoniumnitraattia). Räjähdysaineiden vaikutusta kuivanapitovesien laatuun voidaan arvioida räjähdysaineiden käytön ja kaivosveden laadun seurantatietojen perusteella.

Kuivanapitoveden määrään vaikuttaa merkittävästi vuosittainen sademäärä sekä pintavesi- ja pohjavesivalunta louhokseen. Maanalaisissa kaivoksissa, kuten Pyhäsalmen kaivoksella, kuivanapitoveden määrä pysyy yleensä vuositasolla lähes muuttumattomana, mutta kuukausittainen vaihtelu voi olla hyvinkin suurta sadannasta ja sulamisvesistä riippuen.

Malmin irrottaminen räjäyttämällä muuttaa ympäröivän kallioperän rakoja, mikä puolestaan muuttaa kallioperän hydraulisia ominaisuuksia ja siten myös pohjaveden virtausta. Kuivanapitopumppaus alentaa pohjaveden tasoa ja muuttaa virtaussuuntia kaivoksen ympäristössä. Ns. kuivatuskartion eli kuivatusvaikutuksen suuruuteen vaikuttaa kaivoksen syvyys sekä maa- ja kallioperän vedenjohtavuus. Louhos- ja yleensä kaivostilojen kuivanapidon ohella raakaveden otto voi alentaa raakavesilähteen pintaa. Raakaveden tarvetta pyritään kaivoksilla pienentämään vesien kierrätyksellä.

Teknisesti kaivoksen kuivanapitoveden energiapotentiaali voidaan määrittellä sinä energiamääränä, joka voidaan siirtää kaivosvedestä pumppaamalla. Veden lämpö määrän hyödyntäminen suhteutetaan kulutukseen tietyllä virtauksella ja ajankestolla.

2.4 Kaivoksen sulkeminen

Kaivostoiminnan päätyttyä louhostilat täytetään tai tuetaan ja avolouhoksen reunat muotoillaan sortumien ehkäisemiseksi. Veden täyttäessä louhokset myös pohjaveden pinta palautuu ja virtaussuunnat muuttuvat. Kaikilla sulkemiseen liittyvillä toimenpiteillä pyritään kaivosalueen normaalin hydrogeologisen tasapainon palauttamiseen. Kaivoksen täyttymisen vedellä tulee tapahtua hallitusti kaivoksen mineraalien geokemialliset ominaisuudet huomioiden.

Louhoksen täytyessä vedellä sen seinämiin kertyneet ja kaivostäytössä muodostuneet sulfidien hapettumistuotteet huuhtoutuvat. Sulfidimineraalien hapettuminen jatkuu louhoksessa veden pinnan yläpuolelle jäävissä seinämissä vielä täyttymisen jälkeenkin. Sulfidimalmien hapettumista tapahtuu myös louhostiloissa louhinnan edetessä. Kaivoksesta pumpattavat kuivanapitovedet voivat sisältää kiintoaineksen sekä sulfidimineraalien hapettumisreaktioissa vapautuneiden metallien ja sulfaatin ohella myös jäämiä räjähdysaineista.

Metallikaivostoiminnan vesiin liittyvät haitta-aineet ovat tyypillisesti metalleja (esim. Cr, Cu, Pb, Fe, Zn), puolimetalleja (As, Sb), suoloja (sulfaatit, kloridit, syanidit), ravinteita (typpiyhdisteet) tai orgaanisia yhdisteitä (mineraaliöljyt). Lisäksi metallikaivostoiminnan vedet sisältävät runsaasti maa-alkali- ja alkalimetalleja (esim. Ca, Mg, Na, K). Etenkin louhosvedet ja kaivannaisjätteiden

lääjitysalueiden valumavedet ovat usein happamia. Louhos- ja prosessivedet voivat myös sisältää huomattavia määriä kiintoainetta. Kuivanapitoveden laadusta saadaan vertailutietoa myös saman malmityypin kaivoksilta. On huomioitava myös, että kaivosalueella voi esiintyä luontaista kallioperästä aiheutuvaa kuormitusta mikä vaikuttaa kaivosveden laatuun.

Mikäli kaivos jatkaa tulvimistaan ja veden mukana tulevat ainekset ovat pohjavesille tai yleisesti ympäristölle riski, on veden käsittely järjestettävä hallitsemattomien päästöjen ehkäisemiseksi. Vesien käsittely voi tapauskohtaisesti jatkua siis vielä kauankin kaivoksen sulkemisen jälkeen.

Hylättyjen kaivosten määrä Suomessa on vähäinen esimerkiksi Kanadaan verrattuna. Kaivostoimintaa on Suomessa harjoitettu vuosisatoja, mutta vanhimmat kaivokset (1700- ja 1800- luku) voidaan rajata tarkastelun ulkopuolelle jo pienen kokonsa puolesta. Tekniikan kehittyessä on menty syvemmälle sekä louhintamäärät ovat kasvaneet jolloin energiapotentiaalikin on vastaavasti kasvanut.

Mikä tahansa hylätty kaivostila voi palvella energianlähteenä mikäli käyttökohde ja sen vaatimukset ovat täytettävissä. Energian käyttökohteen kaukainen sijainti kaivostilasta on rajoittavin tekijä. Karkealla tasolla käyttökohteen lähellä olevaa kaivostilaa voidaan aina hyödyntää jollain tavalla lämmitykseen tai viilennykseen mutta taloudellinen tarkastelu vaatii kaivoksen energiapotentiaalin arviointia tarkemmin.

3 Lämmöntalteenotto kaivosvedestä

3.1 Kaivosveden lämpötila

Maanpinnan keskilämpötilan on tutkimusten mukaan mitattu olevan pari astetta korkeampi kuin ilman keskilämpötilan (Kukkonen 1986). Maanpinnan lämpötila vaihtelee vuodenajoittain mutta jo 10 - 15 metrin syvyydessä vuosittainen pintalämpötilan vaihtelu on suodattunut pois ja tasoittunut maanpinnan keskilämpötilaan. Maapallon sisäsyntyisen lämmön ja geotermisen gradientin vaikutuksesta lämpötila kasvaa Suomessa alaspäin mentäessä 8 - 15 °C/km. Geotermisen gradientti määräytyy geotermisen lämpövuon ja kiven lämmönjohtavuuden perusteella. Keskimäärin 200 metrin syvyydessä ollaan siis noin 2 °C maanpinnan keskilämpötilaa korkeammassa lukemissa.

Kaivosvesi kerrostuu lämpötilan mukaisesti kuten kaikki muukin vesi. Lämpimin vesi nousee konvektion myötä ylöspäin. Kuilujen ja muiden syvien vesitilojen lämpötiloissa voidaan olettaa siis olevan stationääritilassa variaatiota syvyyden perusteella. Tiettyjä teknisiä ratkaisuja käytettäessä lämpötilojen kerrostumista voidaan hyödyntää ja sekoittumista kannattaa välttää.

Mittauksella voidaan saada selville kaivoskäytävien, kuilujen ym. kaivostiloja yhdistävien rakenteiden vaikutus lämpötilaan. Lämpötilan syvyysvaihtelun mittaamiseksi GTK:lla on kaksi vaihtoehtoista ratkaisua:

1. Lämpötilan mittaaminen lämpötilaloggerilla, joka lasketaan vaijerilla veden täyttämään kaivostilaan. Lämpötilaloggeri on pari senttiä halkaisijaltaan oleva, korkeaa painetta kestävä metalliputki, joka tallentaa jatkuvasti mittaustuloksia. Lämpötilaprofiili saadaan mitattua laskemalla loggeria vaiheittain alaspäin ja antamalla lämpötilan välillä tasaantua. Riskinä loggeria käytettäessä on sen kiinnijuuttuminen esimerkiksi kaivoskuilussa oleviin rakenteisiin tai muihin esteisiin.
2. Lämpötilan mittaaminen valokuitukaapelilla eroaa edellisestä siten, että itse kaapeli toimii anturina. Kaapeli on poikkileikkaukseltaan loggeria pienempi, joten se sopii hyvinkin pieneen tilaan. Kaapeli ei tartu rakenteisiin helposti ja se kestää vetoakin. Paras ominaisuus valokuitukaapelia käytettäessä on mittausratkaisu: lämpötilat saadaan reaaliajassa jopa metrin välein.

Kallion sisällä olevan veden lämpötilan voidaan olettaa olevan tasapainossa sitä ympäröivän kivimassan kanssa. Kuitenkin esimerkiksi kuiluissa tapahtuu tiheyseroista johtuvaa veden kerrostumista. Lämpimän veden tiheys on pienempi joten se nousee ylös ja tiheämpi kylmempi vesi painuu alas. Tiheyteen vaikuttaa myös kaivosveden suolapitoisuus, johon taas vaikuttavat kaikki kaivosveteen liuenneet komponentit. Suolapitoisuus kasvaa syvemmälle mentäessä ja osittain siis kumoaa lämpötilan tiheysvaikutuksen ja tasoittaa näin lämpötilaeroja. Kaivosveden kemiallisten ominaisuuksien vaikutuksesta lämpötilakerrostumiseen ei ole riittävästi tutkittua tietoa.

Mikäli kaivosveden lämpötila pinnassa on korkeampi kuin mitä keskilämpötila antaisi olettaa, syynä voi olla ovat esimerkiksi:

- Konvektiivinen virtaus kaivoksen syvemmistä osista lämpötilaerojen perusteella. Kaivoskuilujen suuri poikkipinta-ala tehostaa konvektiota.
- Pakotettu virtaus, jonka aiheuttaa kaivokseen muualta virtaava vesi, esim. pohjavesi
- Kaivoksessa tapahtuvat voimakkaat kemialliset reaktiot, jotka vapauttavat lämpöä veteen

Tietyllä syvyydellä oleva lämpötilamaksimi tai -minimi voi indikoida myös edellä mainittuja asioita. Mikäli veden liike kaivoksessa on vähäistä, lämpötila kasvaa keskimääräisen lämpötilagradientin mukaisesti noin 1 °C sataa metriä kohden syvemmälle mentäessä.

Kaivosvesien lämpötilat ovat Suomessa alhaisia. Syvimmissäkin kaivoksissa, myös Pyhäsalmissa, jäädytään kauas matalalämpösovellusten mitoituslämpötilojen (35- 45°C) alle. Toisaalta kaivosveden alhainen lämpötila mahdollistaa veden käytön viilennyksessä. Laitetekniikan osalta puhutaan suljetuista ja avoimista järjestelmistä.

3.2 Lämmöntalteenottojärjestelmät

3.2.1 Suljettu järjestelmä

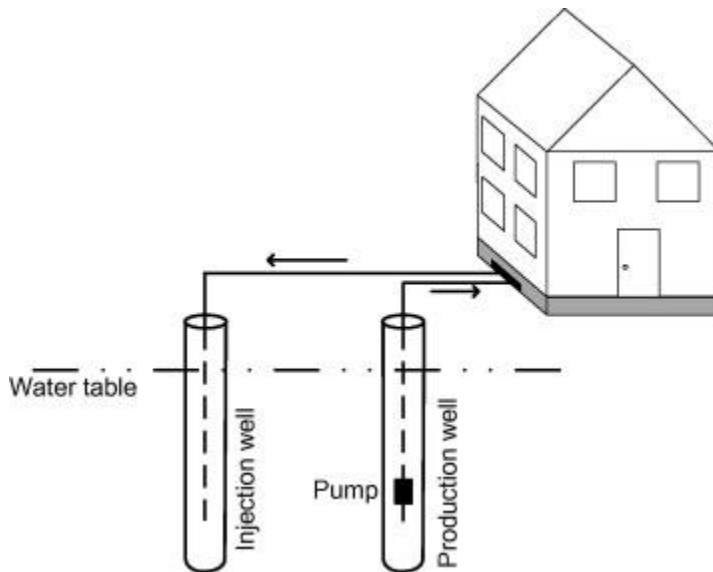
Maa- ja kallioperän sekä vesistöjen energiaa hyödyntävät järjestelmät ovat pääosin suljettuja. Suljettu keräysjärjestelmä koostuu putkistosta, jossa kierrätetään keruunestettä pumpulla. Lämmönkeruunesteeseen putken läpi johtuva lämpöenergia otetaan talteen vaihtimella, joka on yhdistetty lämpöpumppuun kylmäainekierrolla. Suljettu järjestelmä pystyy tuottamaan lämpöä sekä myös kääntäen viilennysenergiaa. Keruunesteinä käytetään vettä ja jäänestöainetta (etanoli tai glykoli) sekoitusta. Nesteen virtausnopeuden keruuputkistossa on oltava turbulентinen lämmönjohtumisen mahdollistamiseksi muoviputken läpi.

Keräysputkistoa voidaan upottaa avoimiin kaivoskuiluihin ja tunnelihin. Putkien vetäminen vedellä täyttyneissä kaivostiloissa on mahdollista kauko-ohjattavilla sukelluslaitteilla. Putkidimensioita kasvattamalla saadaan kasvatettua lämmönsiirtopinta-alaa sekä myös pienennettyä putkiston painehäviöitä.

3.2.2 Avoin järjestelmä

Avoin keräysjärjestelmä hyödyntää suoraan vettä eri lähteistä kuten vesistöistä, pohjavesistä tai kaivostiloista. Kuten suljettu järjestelmä, myös avoin järjestelmä voi tuottaa lämpöä ja viilennystä. Energiaa kuljettava vesi on suoraan kosketuksissa paitsi kallioperään, niin myös lämmönvaihtimeen.

Avoimia järjestelmiä on hyödynnetty maailmalla pohjavesivarastojen (akviferien) yhteydessä. Pohjavesimuodostumasta pumpataan vettä yhden tai useamman imukaivon (tuotantokaivon) kautta ja vesi palautetaan energian talteenoton jälkeen palautuskaivon (injektiokaivon) kautta akviferiin tai suoraan pintavaluntana vesistöön. Avoimet järjestelmät ovat pääsääntöisesti teholtaan suuria. Pohjoismaiden suurin pohjavesivarastoa hyödyntävä kohde on Tukholman Arlandan lentoasema. Arlandan alapuolinen pohjavesimuodostuma toimii talvella lämmönlähteenä ja vastaavasti kesällä sinne ladataan lentoaseman tilojen jäädytyksessä syntyvää lämpöä. Suomessa on tällä hetkellä vain yksi pienkohde, jossa pohjavettä käytetään kiinteistöjen lämmitykseen. Suomessa pohjavesien lämpötila on tasaisen alhainen (4 – 8 °C) vuoden ympäri, joten pohjaveden hyödyntäminen rakennuksen lämmitykseen edellyttää lämpöpumppua. Kaivosvesien lämpötila voi kaivoksen sijainnista ja syvyydestä riippuen olla alueen pohjaveden lämpötilaa korkeampi. Lämmönvaihtimelta palautettavan veden lämpötila ei saa laskea lähelle jäätymisrajaa. Turvarajana voidaan pitää 2 °C:n minimilämpötilaa.



Kuva 2. Avoimen järjestelmän imu- ja palautuskaivot (Self, Reddy & Rosen, 2013).

Avoim järjestelmä vaatii pumppaustehoa, koska vesi täytyy nostaa kaivosta paineella lämmönvaihtimelle. Nyrkkisääntönä pumppaustehon tulisi olla alle 10 % järjestelmän kokonaistehosta, jotta järjestelmän hyötysuhde pysyisi hyvänä. Veden pumppaaminen syvältä kaivoksesta romahduttaa hyötysuhteen.

Kaivoksen hissi- ja ilmanvaihtokuilut toimivat avoimen järjestelmän kaivoina. Parhaimmillaan kuilujen välillä on virtausyhteys, joka mahdollistaa mahdollisimman pitkän viipymän ennen kuin palautettu vesi nostetaan jälleen lämmentyneenä pinnalle.

3.2.3 Puoliavoin järjestelmä

Avoimen järjestelmän yksi variaatio on käyttää samaa kaivoa sekä imuun että palautukseen. Tällöin voidaan puhua ns. puoliavoimesta järjestelmästä. Vesi pumpataan vaihtimelle kaivon pinta-osasta ja palautetaan syvemmälle, lähelle kaivon pohjaa. Lämpötilaerojen vuoksi kaivossa tapahtuu veden kerrostumista: lämmin vesi nousee ylöspäin ja pohjalle johdettu kylmempi vesi sekoittuu. Vaikka veden liike sekoittaa kaivon lämpötilajakaumaa, veden liike ja vaihtuvuus kaivossa on toivottavaa, jotta kaivon energiakapasiteetti olisi riittävä. Jos kaivoon virtaa korvaavaa pohjavettä, niin kaivon toimintaa voidaan parantaa juoksuttamalla osa palautettavasta vedestä muualle.

Puoliavoimia järjestelmiä kaivoskuiluun suunniteltaessa tulisi selvittää lämpötilakerrostumat sekä konvektiosta ja virtauksista johtuva veden liike kuilussa. Pumppauskokeilla voidaan selvittää, virtaako kaivoksen muista osista korvaavaa vettä kuiluun.

3.2.4 Järjestelmien vertailu

Avoimen järjestelmän suunnittelu on vaativaa, koska kaivosveden pumppaaminen pinnalle vaikuttaa kaivoksen lähialueiden pohjaveden pinnan korkeuteen. Mikäli

avoimen järjestelmän vesikierto toimii hallitusti ja vettä olisi mahdollista pumpata jopa enemmän kuin energiantarve edellyttää, voidaan kaivosvettä sen laadusta riippuen käyttää ns. ”harmaana vetenä” kiinteistöjen huuhtelu- ja pesukäyttöön. Talousveden laatuvaatimusten täyttäminen vaatii kaivosveden tapauksessa lähes poikkeuksetta jonkinlaisen käsittelyprosessin.

Avoimen järjestelmän hyötysuhde on suljettua parempi, koska lämmönsiirto suoraan kallioperästä veteen ja edelleen vedestä lämmönvaihtimeen on tehokkaampaa. Suljetun järjestelmän keruuneste ei ole suoraan kosketuksissa kallioperään. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) on vertailtu suljetun ja avoimen järjestelmän ominaisuuksia.

Taulukko 2. Suljetun ja avoimen järjestelmän vertailua

	Suljettu järjestelmä	Avoin järjestelmä
Pumppauskustannukset	Pienet	Suuret
Lämmönsiirto	Kohtalainen	Hyvä
Vaikutus pohjaveden pinnankorkeuteen	Ei vaikutusta	Voi vaikuttaa paljonkin, huomioitava suunnittelussa
Vaihtimien tukkeutuminen	Ei riskiä	Huomioitava huollossa
Keruunesteen ympäristöriski	Huomioitava suunnittelussa	Ei riskiä
Lämpötilaero	Suuri (keruuneste ei jäädy)	Pieni

3.3 Kaivosvesien hyödyntämiseen liittyvä lainsäädäntö ja riskit

3.3.1 Yleistä

Olemassa oleviin kaivostiloihin asennetaan käytetystä laitetekniikasta riippuen suljetun järjestelmän keräysputkistoja tai vedellä täyttyneiden tilojen saavuttamiseksi porataan uusia imu- tai palautuskuiluja avoimia järjestelmiä varten.

Suljettujen järjestelmien rakentaminen on verrattavissa Suomessa viime vuonna voimakkaasti lisääntyneeseen lämpökaivorakentamiseen. Suljettuun kiertoon perustuvien lämpökaivojen rakentaminen muuttui luvanvaraiseksi toukokuussa 2011. Merkittäväillä pohjavesialueilla vaaditaan myös vesilain mukainen lupa lämpökaivojen rakentamiselle.

Avoimet järjestelmät, joissa lämmityksessä ja jäähdytyksessä hyödynnetään suoraan pohjavettä, tarvitsevat vesilain mukaisen luvan aluehallintovirastolta, kun pohjaveden ottomäärä on yli 250 m³/vrk ja ilmoituksen ELY -keskukselle kun ottomäärä on yli 100 m³/vrk. Lupia on myönnetty sillä edellytyksellä, että jos aluetta tulevaisuudessa käytetään yhdyskuntien vedenhankintaan ja energiakäyttöön suunniteltu vedenotto estää sen, menee yhdyskuntien vedenhankinta edelle ja lupa voidaan tarvittaessa purkaa. Jos lämmitykseen tai jäähdytykseen käytetty pohjavesi palautetaan takaisin pohjavesimuodostumaan, on syytä arvioida sen vaikutuksia pohjavesimuodostuman laatuun ja lämpötilaan sekä lämpötilamuutoksesta aiheutuvia muita mahdollisia seurauksia.

3.3.2 Kalliopohjavesi

Kallioperän rakoihin ja rikkonaisuusvyöhykkeisiin varastoituu merkittäviä määriä pohjavettä. Kaivosvesi on myöskin ns. kalliopohjavettä, joka on Suomessa merkittävä talousveden lähde harjuttomilla alueilla. Pohjavesialueet luokitellaan merkittävyytensä perusteella eri luokkiin ja pohjavesialueisiin vaikuttavaa maankäyttöä sääntelevät lait ja määräykset. Uuden vesilain myötä vesilain ja ympäristönsuojelulain välinen suhde on muuttunut siten, että ympäristönsuojelulain pilaantumisen torjuntaa koskevia säännöksiä sovelletaan kaikissa vesilain mukaisissa lupa-asioissa.

3.3.3 Vesilaki

Vesitaloushankkeella on oltava vesilain mukainen aluehallintoviranomaisen (AVI) lupa, jos se voi muuttaa pohjaveden laatua tai määrää, ja tämä muutos voi aiheuttaa pohjavesiesiintymän tilan huononemista tai olennaisesti vähentää tärkeän tai muun vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesiesiintymän antoisuutta tai muutoin huonontaa sen käyttökelpoisuutta taikka muulla tavalla aiheuttaa vahinkoa tai haittaa vedenotolle tai veden käytölle talousvetenä (VL 3:2 §).

3.3.4 Ympäristön suojelulaki

Pohjaveden pilaamiskiellosta on säädetty ympäristönsuojelulain 8 §:ssä seuraavasti:

Ainetta tai energiaa ei saa panna tai johtaa sellaiseen paikkaan tai käsitellä siten, että

- 1) tärkeällä tai muulla vedenhankintakäyttöön soveltuvalla pohjavesialueella pohjavesi voi käydä terveydelle vaaralliseksi tai sen laatu muutoin olennaisesti huonontuu;
- 2) toisen kiinteistöllä oleva pohjavesi voi käydä terveydelle vaaralliseksi tai kelpaamattomaksi tarkoitukseen, johon sitä voitaisiin käyttää; tai
- 3) toimenpide vaikuttamalla pohjaveden laatuun muutoin saattaa loukata yleistä tai toisen yksityistä etua.

Säännöksen kohdan 1) on katsottu käytännössä tarkoittavan ympäristöhallinnon kartoittamia vedenhankinnalle tärkeitä ja vedenhankintaan soveltuvia pohjavesialueita (eli niin sanottuja I ja II luokan pohjavesialueita). Pilaamiskielto kattaa momentin 1 kohdan 2) mukaan toisen kiinteistöllä olevan pohjaveden myös pohjavesialueiden ulkopuolella. Lisäksi momentin 1 kohdassa 3) viitataan yleisesti pohjaveden laadun muutoksesta aiheutuviin yleisen tai yksityisen edun loukkauksiin. Ympäristönsuojelulain perusteella pohjaveden pilaaminen ja laadun vaarantaminen on kiellettyä eikä siihen voi myöntää poikkeusta eikä lupaa.

Pilaamiskielto kattaa YSL 8 §:n momentin 2 mukaan myös asetuksella erikseen säädetyt toimenpiteet tai asetuksella kielletyn ympäristölle ja terveydelle

vaarallisten aineiden päästämisen pohjaveteen. Valtioneuvoston asetusta vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista (VNA 1022/2006) täydennettiin vuonna 2009 pohjavesidirektiivistä tulevilla säädöksillä. Asetuksen liitteessä 1E listattuja aineita tai aineryhmiä ei saa päästää suoraan eikä välillisesti esimerkiksi maakerrosten läpi tapahtuvan suodattumisen kautta pohjaveteen (päästökielto pohjaveteen). Näitä ovat mm. happitasapainoon epäedullisesti vaikuttavat aineet ja aineet, joilla on haitallinen vaikutus pohjaveden makuun tai hajuun.

3.3.5 Riskit

Suljettujen järjestelmien lämmönkeruunestevedot voivat aiheuttaa pohjaveden laadun heikkenemistä ja joissain tapauksissa lähialueen juomavesikaivojen vesi on muuttunut väliaikaisesti käyttökelvottomaksi. Lämmönkeruunesteet aiheuttavat muutoksia mm. pohjaveden hapetus-pelkistysolosuhteissa, pH:ssa ja mikrobimäärässä.

Lämmönkeruunesteet sisältävät usein orgaanisia aineita, jotka toimivat ravinteena ja lisää mikrobin määrää pohjavedessä ja hapen kulutusta. Hapettomissa ja vähähappisissa oloissa osa mikrobeista saattaa ottaa tarvitsemansa hapen pelkistämällä sulfaattia mineraaleista. Tällöin muodostuu rikkivetyä joka antaa pohjavedelle pahan hajun ja voi huonontaa veden laatua lähistön kaivoissa. Hapettomissa oloissa kallioperästä voi liueta myös rautaa ja mangaania, jotka heikentävät pohjaveden laatua. Pohjaveden pH:n lasku lisää edelleen metallien liukenemistä.

Pohjaveden lämpötilan nousu tai lasku aiheuttaa muutoksia pohjaveden ekosysteemiin, esimerkiksi bakteerien määrään. Tutkimustuloksia mikrobiologisista vaikutuksista on toistaiseksi kuitenkin vähän.

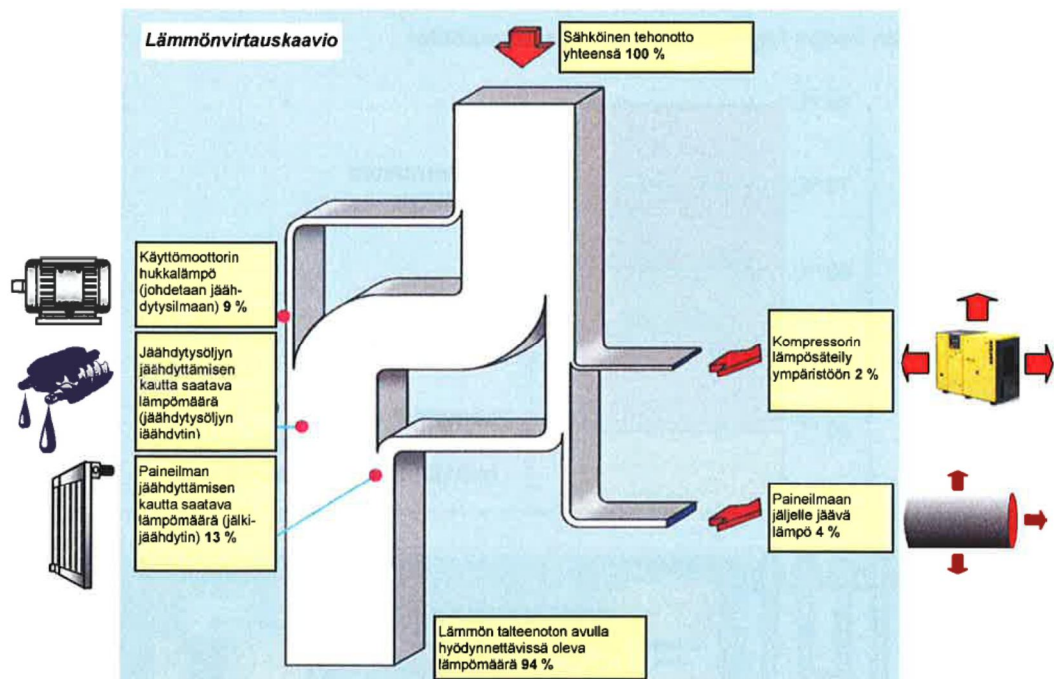
4 Lämmöntalteenotto kaivosprosessista: kompressorien jäädytys

4.1 Kompressoreiden lämpötase

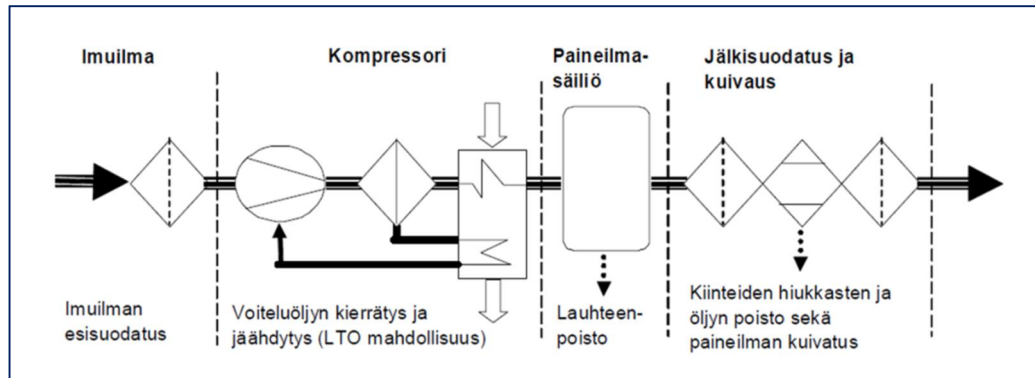
Teollisuudessa käytettävät ruuvikompressorit ovat joko öljyjäädytteisiä tai vesijäädytteisiä kompressoreita. Öljyjäädytteiset kompressoriasemat ovat investointikustannuksiltaan edullisempia ja ilmeisesti tästä syystä ne ovat teollisuuskäytössä myös yleisempiä.

Kompressorit tuottavat runsaasti hyödynnettävää lämpöä, sillä 100 % kompressoriin syötetystä energiasta muuttuu lämmöksi. Suurin osa eli 72 % käytetystä ja lämpönä hyödynnettävästä energiasta saadaan jäädytysneste-/öljyjäädytteisissä kompressoreissa niiden jäädytykseen käytetystä väliaineesta, 13 % paineilmaasta ja jopa 9 % sähkömoottorin lämpöhäviöstä. Täysin koteloidussa ja jäädytysneste-/öljyjäädytteisissä ruuvikompressorissa jopa sähkömoottorin energiahäviö ja osittain sisäinen lämpösäteily voidaan hyödyntää lämpöenergiana tarkoin kohdistetun jäädytyksen avulla.

Kompressorin käyttämästä energiasta on siis mahdollista hyödyntää lämpöteknisesti yhteensä jopa 94 %. Vain 2 % energiasta häviää lämpösäteilynä ja 4 % lämmöstä jää paineilmaan (Kuva 3: lämmönsiirtokaavio, Kuva 4: lämmön talteenottoperiaate paineilmakompressorista).



Kuva 3. Kompressorin lämmönsiirtokaavio (lähde: Kaeser)



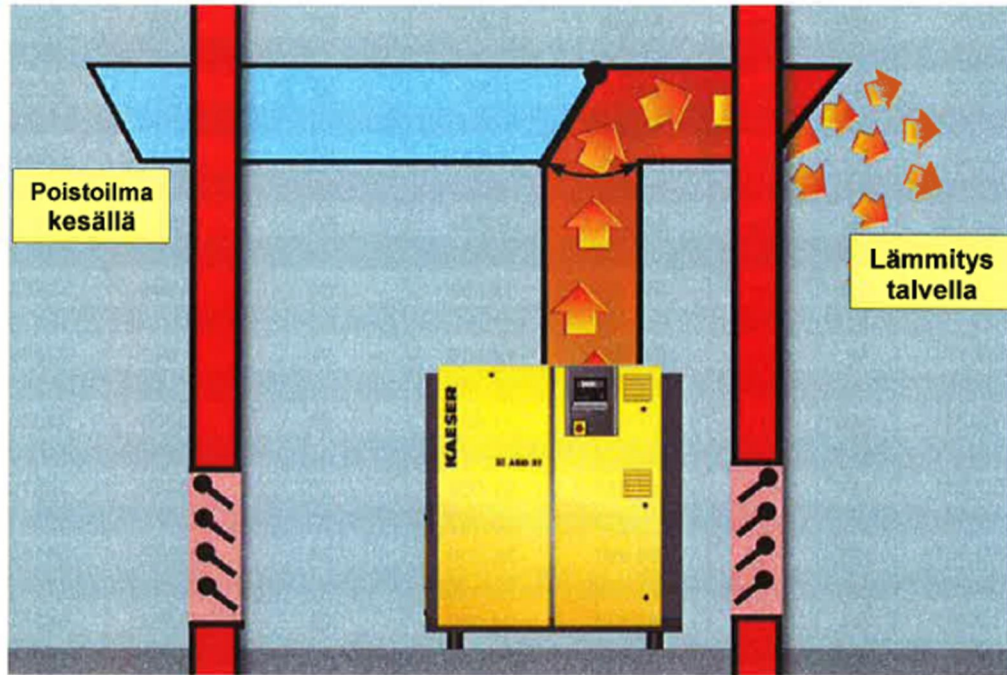
Kuva 4. Lämmön talteenottoperiaate paineilmakompressorista (Penttinen, 2009).

4.2 Lämmöntalteenotto kompressorien poistolämmöstä

Kylminä vuodenaikoina jäädytyksessä syntyvä poistolämpö voidaan hyödyntää suoraan sisätilojen lämmityksessä ja/tai lämmön talteenottojärjestelmien avulla tapahtuvassa lämminvesituotannossa. Tähän soveltuvat esimerkiksi levylämmönvaihtimet. Järjestelmä on hyvä keino säästää energiaa myös kesällä.

Ilma- ja jäädytysneste-/öljyjäähdytteisten ruuvikompressorien kohdalla yksinkertaisin tapa hyödyntää lämpöä on käyttää kompressoreissa lämmennyt jäädytysilma välittömästi hyödyksi. Tällöin poistoilma johdetaan kanavajärjestelmän kautta lämmitettäviin tiloihin (Kuva 5). Tällainen kanavajärjestelmä on otettu käyttöön myös Pyhäsalmen rikastamolla, jossa kompressoreiden jäädytysilmaa johdetaan tarvittaessa rikastamon alakerran lämmitykseen korvaamaan kaukolämpöä. Silloin kun lämmöllä ei ole tarvetta, kompressoreiden jäädytysilma johdetaan suoraan ulos.

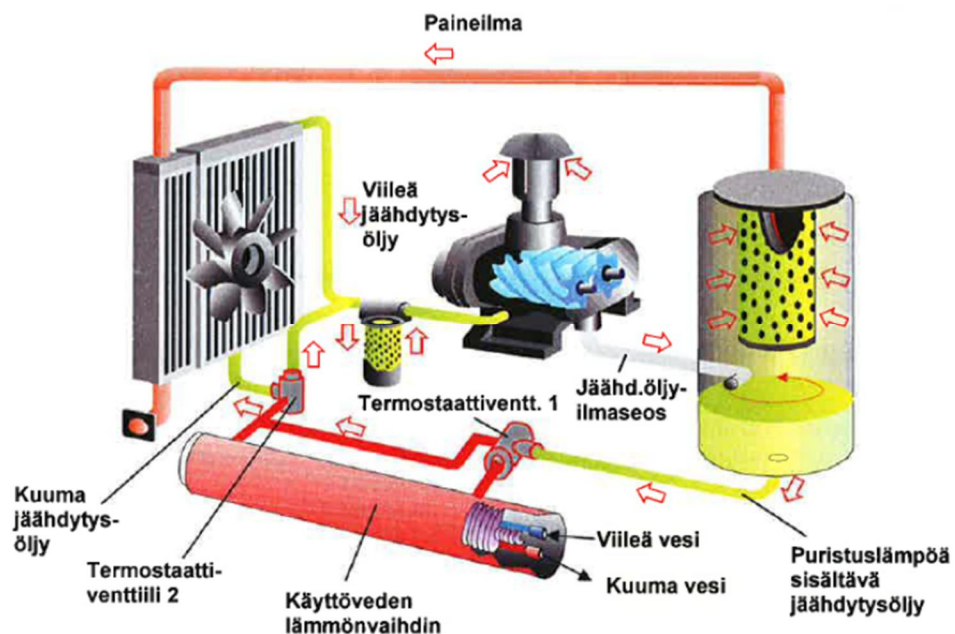
Lämmintä ilmaa voidaan luonnollisesti käyttää myös muissa kohteissa kuten esimerkiksi kuivausprosesseissa, oviaukkojen lämmityksessä, tuloilman esilämmityksessä jne. jos käyttötarvetta löytyy. Jos käyttökohde sijaitsee etäämpänä toisessa rakennuksessa, lämmönsiirto kannattanee tehdä nestekiertoisella lämmönsiirtoputkistolla



Kuva 5. Lämpimän poistoilman hyödyntäminen sisätilojen lämmityksessä poistoilmakanavan avulla (lähde: Kaeser).

4.3 Lämmöntalteenotto kompressorien jäähdytysöljyjärjestelmästä

Sekä ilma- että vesijäähdytteisten ruvikompressoreiden kohdalla on mahdollista tuottaa lämmintä vettä eri tarkoituksiin asentamalla jäähdytysöljyjärjestelmään levylämmönvaihdin. Järjestelmän avulla on valmistajan mukaan mahdollista tuottaa jopa 70 °C lämpöistä vettä (Kaeser).

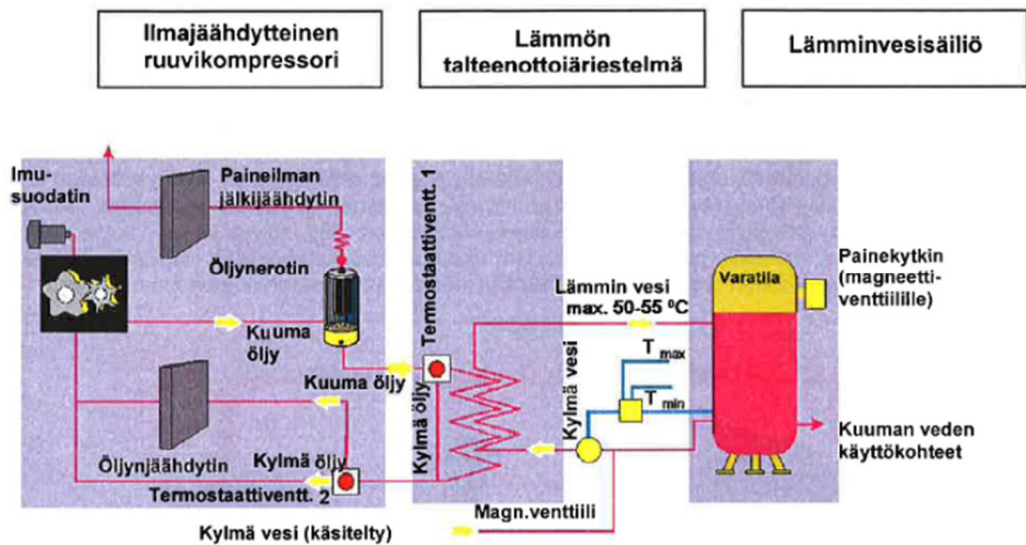


Kuva 6. Lämmöntalteenotto käyttöveden lämmittimellä (Kaeser).

Kaeserin ruuvikompressoriin integroitu lämmönvaihdin (Kuva 6), joka voidaan myös jälkiasentaa käytössä olevaan kompressoriin, siirtää jäähdytysöljyyn sitoutuneen lämmön lämmitettävään veteen. Kuvan mukaisella järjestelyllä Kaeserin kompressoriin integroitu suurin vedenlämmitin on teholtaan 22 kW, jälkiasennettuna sen hinta-arvio on noin 10 000 euroa. Termostaattiventtiili 1 varmistaa, että jäähdytysöljyn lämpötila ei laske alle kompressorin optimaalisen toiminnan edellyttämää lämpötilaa. Lämpimän veden tarpeen pienentyessä vielä kuuma jäähdytysöljyvirta ohjataan automaattisesti kompressorissa vakiovarusteena olevaan ilmajäähdytteiseen yhdistelmäjäähdyttimeen. Jäähdyttimessä muodostuva lämminilma voidaan hyödyntää lämmityksessä.

4.4 Lämmöntalteenotto ilmajäähdytteisten kompressorien poistolämpöstä

Kompressoriin kytkettävällä LTO-järjestelmällä ilmajäähdytteisten ruuvikompressoreiden jäähdytyslämpö voidaan siirtää kuumavesisäiliöön, josta sitä voidaan edelleen hyödyntää nestekiertoisen lämmönjakoputkiston avulla erilaisiin käyttökohteisiin, esimerkiksi veden lämmitykseen (Kuva 7).



Kuva 7. Esimerkki poistolämpöä hyödyntävästä vedenlämmitysjärjestelmästä (Kaeser).

5 Kaivospaikkakuntakohtainen tarkastelu

5.1 Pyhäsalmen kaivos

5.1.1 Kaivoksen energiantarve

Pyhäsalmen kaivos on Euroopan syvin monimetallikaivos, jonka päätuotteet ovat kupari-, sinkki- ja pyriittirikaste. Kaivoksen omistaja on kanadalainen Inmet Mining Corporation. Kaivoksessa on töissä 229 työntekijää, urakoitsijat mukaan laskettuina kokonaishenkilömäärä on noin 250. Kaivos on aloittanut toimintansa vuonna 1962. Kaivoksen tulos vuonna 2011 oli 95 M€

Pyhäsalmen kaivoksen malmin alkuainepitoisuudet ovat 1.2 % kuparia, 3.3 % sinkkiä ja 40 % rikkiä. Malmin vuosituotanto on 1.4 Mt. Malmia louhitaan 1 050 – 1 410 m syvyydessä. Rikastamossa murskattu malmi seulotaan, jauhetaan ja vaahdotetaan. Rikkituotantoa on laajennettu ja rikkiuuni on korvattu rikkiprässeillä. Malmivarat riittävät näillä näkymin vuoteen 2018 saakka. Uusia esiintymiä haetaan kairaamalla sekä maan alla että maan päällä.

Fortum tuottaa öljyllä kaukolämmön Pyhäsalmen tarpeisiin, öljykattila sijaitsee kaivoksen tontilla ja palvelee ainoastaan kaivosta. Kaukolämmön paluuveden lämpötila pidetään n. 55 °C:ssa. Kaukolämmön vuotuinen kulutus on 6 000 - 8 000 MWh. Sähkön vuosikulutus on noin 75 GWh, josta rikastamo käyttää valtaosan. Rikastamon vuotuinen raakavedenkulutus on 4 Mm³.

Pyhäsalmen kaivoksen tuorevesi otetaan läheisestä Pyhäjärvestä. Vuosittainen vedenotto on noin 4.5 Mm³ (miljoonaa kuutiota). Kierrätysvettä saadaan prosessiin kuuluvan sakeuttimen ylitteenä. Veden kierrätysprosentti on noin 25 % (2012). Vuonna 2009 Pyhäsalmen kaivoksen kuivanapitoveden määrä oli noin 900 000 kuutiota ja veden pH keskimäärin 2.8. Vuonna 2012 satoi huomattavasti enemmän, jolloin kuivanapitoveden määrä oli noin miljoona kuutiota ja veden pH keskimäärin 2.7. Veden koostumus oli vuonna 2012 seuraava (mg/l): Fe 510, SO₄ 8970, Cu 38, Zn 480. GTK:n 80-luvulla suorittamissa kalliopohjavesitutkimuksissa Pyhäsalmen sulfidimalmialueella tavattiin pohjavedessä keskimääräistä korkeampia SO₄- pitoisuuksia, johon vaikuttaa mineraalien liukoisuus ja hapettuminen.

Maan alla tarvitaan jäähdytystä. Jäähdytyslaitteisto on asennettu vuonna 2003. Kaivoksella on jo hyödynnetty lämmön talteenottoa kaivosvedestä, mutta kaivoksesta olisi mahdollista saada enemmänkin lämpöä talteen. Kaivoksella on tutkittu sekä yrityksen että ulkopuolisten toimesta erilaisia energiaratkaisuja vuosien aikana. Esimerkiksi voima-aseman kompressoreiden lämmöntalteenottoa hyödynnetään.

5.1.2 Kaivosveden hyödyntäminen kaivoksen tuloilman lämmittämiseen

Kaivosveden lämpötila kuilujen pohjalla on noin 20 °C (nyrkkisääntö: 100 m syvyydellä lämpötila on noin 10 °C ja jokainen 100 m lisää syvyyttä nostaa lämpötilaa noin 1 °C). Osaa vanhoista louhoksista ei ole täytetty eli vesi virtaa niiden läpi.

Kaivoksen toiminnan kannalta kriittistä on kaivoksen tuloilman lämmittäminen. Tuloilmavirta on keskimäärin 100 m³/h, maksimissaan 135 m³/h. Lämmön talteenottojärjestelmä (ns. tuuletusasema) on ollut käytössä 12 vuotta. Kaivosvedestä saadaan tuloilman lämmittämiseen jatkuvaa lämmitystehoa 2 MW, joka riittää ulkolämpötilaan -15 °C asti. Uusi kaivos- projektissa laskettu takaisinmaksuaika lämmöntalteenottojärjestelmälle oli alle kolme vuotta. Järjestelmä on maksanut itsensä takaisin öljysäästöinä jo kauan sitten. LTO-järjestelmässä oli alkuvuosina mukana myös savukaasupesurin suodatusvesi (n. 28°C), joka tehosti lämmöntalteenottoa merkittävästi.

Kaivosvesi on haaste laitteistoille, koska Pyhäsalmen malmiossa on rikkiä. Ns. rikkilouhoksissa rikki "palaa", jolloin kaivosveden lämpötila nousee ja pH laskee. Koska veden pH on matala, rauta ei erotu vaan pysyy liuenneena vedessä. Rautaa pääsee kuitenkin kertyy lämmönvaihtimiin ja putkistoihin aiheuttaen tukkeumia, mikä on kunnossapidon kannalta haasteellista.

Kaivosvedestä lämpöä talteen ottaviin lämmönvaihtimiin sakkautuu rautaa, joten vaihtimia on oltava kaksi kappaletta, koska toinen on pesussa. Vaihtimen kautta otetaan vain lämmityskautena lämpöä talteen, koska lämmölle ei ole hyödyntämisaikaa lämmityskauden ulkopuolella.

Ilmanvaihtokuilussa (raitisilmanousussa) n. 220 metrin syvyydellä on ”ruhje”, josta tulee vettä (joka johdetaan kuilun pohjalta 645 metrin syvyydessä sijaitsevalle pääpumppaamolle). Tuloilman lämpötilan oltava vähintään 4 °C, jotta vesi ja kuilu eivät jäätyisi ruhjeen kohdalla. Lämmöntalteenottojärjestelmän ilmanvaihtopatterissa on glykolikierto. Kun glykolin paluulämpötila laskee alle -7 °C, otetaan lisätehoa kaukolämmöstä.

Järjestelmää suunniteltaessa harkittiin lämpöpumpun hyödyntämistä, mutta kaivosveden alhaisen pH:n johdosta haponkestävistä materiaaleista valmistettu lämpöpumppu olisi ollut kallis ratkaisu (tuolloin 6.8 Mmk).

Kaivoksen poistoilman sisältämää lämpöä ei oteta tällä hetkellä talteen. Poistoilma on noin 15 °C lämmintä lievästi hapanta vesisumua, jonka sisältämä energiamäärä on huomattava. Poistoilman lämpöä voisi ottaa talteen esimerkiksi veteen siirtämällä. Poistoilma on nokista, joten lämmöntalteenottolaitetta pitäisi pystyä pesemään esimerkiksi korkeapainepesurilla. Varastossa olevaa rikkiuunin savukaasupesuria (scrubberi) voisi hyödyntää tähän, mutta pesurin kapasiteetti voi olla riittämätön koko poistoilmavirralle. Yksi mahdollisuus olisi ajaa vain osa poistoilmasta pesurin läpi.

5.1.3 Rikastamo

Rikastamossa on suurehko ilmanvaihdon tarve kemikaalien vuoksi. Rikastusprosessi tuottaa lämpöä, prosessissa kiertävä jäähdytysvesi on 20 °C lämmintä. Rikastamon katolla on savunpoistoluukut, joista tuuletetaan kesällä yllilämpöä ulos.

Rikastamon alakerrassa tarvitaan talvisin lisälämpöä, koska siellä olevan kuljettimen linjakanaalissa on avoimet aukot suoraan ulkoilmaan. Kun ulkoilman lämpötila on alle -25 ...-30 °C, kuljetinhihnan alapäässä on käytettävä

lämpöpuhaltimia. Rikastamon alakertaan johdetaan tällä hetkellä konttiasemalla öljyllä tuotetulla kaukolämmöllä lämmitettyä tuloilmaa (lämpöteho n. 170 kW).

Rikastamoon on asennettu puristinta varten kaksi 250 kW:n ruuvikompressoria (Kaeser ESD 441), joiden yhteenlaskettu akseliteho on 500 kW. Tästä tehosta voidaan ottaa lämpöä talteen noin 70 %, eli 350 kW (teoreettinen maksimi 94 % eli 470 kW). Kompressoreiden vuotuiset käyttötuntimäärät ovat noin 4000 - 5000 h. Ruuvikompressoreista talteenotettua lämpöä johdetaan rikastamon alakertaan. Käytännössä ainakin 100 -150 kW olisi edelleen saatavana LTO: lla esimerkiksi kuumavesisäiliöön, josta sitä voidaan käyttää eri tarkoituksiin. Käyttökohteita voisivat olla mm. rikastamon lähirakennusten lämmitys, käyttöveden esilämmitys tai tuloilman esilämmitys.

Rikastamon jätevesi lasketaan ensin D- altaaseen, jonka veden pH-tavoite on yli 10, jotta metallit saataisiin laskeutumaan. D-altaasta jätevesi johdetaan laskeutusaltaaseen C, josta järveen lasketaan vettä n. 200 dm³/s. Haastatteluhetkellä maaliskuussa 2012 veden lämpötila oli 3 °C ja ulkolämpötila - 5 °C. Jätevedestä ei voida ottaa lämpöä talteen, koska oja ei saa jäätyä.

5.1.4 Laguna-hanke

Pyhäjärven kaupunki ja Pyhäsalmen kaivos ovat olleet ehdolla Eurooppaan sijoitettavan hiukkastutkimuskeskuksen sijoituspaikaksi. Kaivos on sijainniltaan ja infraltaan yksi varteenotettavimmista vaihtoehtoista maan alle sijoitettaville astrohiukkasfysiikan ilmaisimille. Kaivokseen sijoitettaisiin hiukkasfysiikan ilmainen, esimerkiksi nestemäistä argonia sisältävä terässäiliö, jonka halkaisija voisi olla 70 metriä ja korkeus 20 metriä. Säiliötä pommitettaisiin neutriinosuihkuilla Euroopan hiukkastutkimuskeskus CERN:istä käsin. Vaihtoehtona on myös pommittaa neutriinosuihkuja Venäjältä ja/tai Japanista. Ilmaisimien ja tarvittavan infrastruktuurin rakentaminen niiden ympärille on mittava projekti, jonka läpiviemiseksi tarvitaan geo-, materiaali- sekä laiteteknistä tutkimustyötä. Jo pelkästään argonilla täytetyn terässäiliön vaatima jäähdytysteho voi olla satoja megawatteja. Kaivosta voitaisiin hyödyntää hiukkasilmaisimen viilennyksessä ja jäähdytysenergian kausivarastoinnissa.

Kaivoksen hyödyntäminen tutkimuskäyttöön kaivostoiminnan joskus päättyessä on erittäin tavoiteltavaa. Kaivoksen toimintaa tukevat järjestelmät ovat kunnossa ja henkilöstö on osaavaa.

5.2 Lohja

5.2.1 Lohjan Energiahuolto Oy Loher

Lohjan Energiahuolto Oy:lla (Loher) on tällä hetkellä 219 asiakasta, joista vain viisi on omakotitaloa, muut pääosin asuinkerrostaloja ja kauppoja. Liikevaihto on 5.5 M€ Loherin myynti oli 86 GWh vuonna 2011 ja 95 GWh vuonna 2010. Loher on vuonna 2012 sulauttanut Ojamon Lämpö Oy:n mukaan toimintaansa (teho 26 MW). Käyttönoton myötä myynti tulee olemaan noin 120 GWh/a. Lämmöntuottotehoa tullaan tarvitsemaan lisää tulevaisuudessa, koska Ojamon lämpölaite on juuri ja juuri riittävän tehoinen hoitamalleen alueelle.

Öljyä korvataan maakaasulla huipputehojen tuotannossa: vuoden 2012 aikana muutetaan 6.5 MW tehoa raskaasta polttoöljystä maakaasuun. Öljyn hinta on noussut valtavasti joten sen käyttö on taloudellisesti tappiollista. Öljyllä tuotetun megawatin hinta voi olla jopa 95 € kun taas biovoimalla tuotettu megawatti maksaa noin 30 €/MW. Tästä syystä öljyn käyttö on tappiollista. Öljyn korkea hinta lisää uusien lämmöntuottoratkaisujen kannattavuutta, kuten esim. kaivoslämmön.

Loher käyttää tällä hetkellä paljon raskasta polttoöljyä ja kivihiiltä. Biopolttoaineella toimivat uusi lämpölaite on valmistumassa. Uuden biolämpölaitoksen myötä päästään 85 % hiilidioksidivapaaseen tuotantoon. Biolämpölaite tulee puoliksi Finnforestin omistukseen. Finnforestin kertopuutehdas valmistaa Lohjalla liimapuupalkkeja. Uusi biopolttokattila, jossa poltetaan tuotannosta yli jäänyttä liimapuuta, tuottaa energiaa sekä Finnforestille että Loherille. Kattilassa ei voida polttaa turvetta, sillä turpeen sisältämä hiekka ja liimapuun liima aiheuttavat arinan sintraantumista.

Kivihiiltä polttava Mondin lämpölaitoksen kattila on käyttöikänsä päässä. Kattila on hieman liian suuritehoinen, joten uuden kattilan teho voisi olla pienempi. Uudessa kattilassa voitaisiin polttaa joko kivihiiltä tai biopolttoainetta. Vanhaa kattilaa ei kannata muuttaa biopolttoainetta polttavaksi, koska tällaisissa tapauksissa on ollut ongelmia.

Tuulivoimaa ei pidetä realistisena vaihtoehtona sähköntuotannolle. Loher on suunnitellut jätteenpolttolaitosta keskustaan, mutta hanke tyrmätty asukkaiden vastustuksesta. Seuraavan 10 vuoden aikana Loherilla ei ole varaa suuriin lisäinvestointeihin Ojamon Lämmön yritysoston ja uuden laitoksen rakentamisen vuoksi. CHP-laitos voisi olla ajankohtainen aikaisintaan 10 vuoden kuluttua. Tekniikan hallinta ja toimintavarmuus on tärkeää Loherille.

Kaivoksesta saatavalla energialla tavoiteltaisiin ajettavaksi ns. pohjakuormaa. Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen kaukolämmön korkean lämpötilan (pakkasilla tarve 110°C) tuottamisessa vaatii selvitystä. Kaivosgeoenergia ei ole investointina vielä ajankohtainen mutta selvitystyötä kannattaa tehdä 10- 20 vuoden tähtäimellä. Tärkeintä Loherille on selvittää kaivosgeoenergian vaatimat investointi- ja käyttökustannukset. Keräysjärjestelmien asennustapa sekä tekniset toteutusvaihtoehdot saatavine lämmitystehoineen ovat oleellista tietoa. Lohjalla tarkasteltiin laskennallisesti lämmön talteenottoa Ojamon kaivoksesta.

5.2.2 Ojamon kaivosallas

Ojamon kaivostoiminta oli vilkkaimmillaan vuosisadan alkupuoliskolla. Sodan jälkeen louhinta oli vielä aktiivista, mutta vähitellen louhiminen muuttui kannattamattomaksi. Kaivos suljettiin 1960-luvun puolivälissä. Kuivanapitopumppaus lopetettiin samalla ja vesi valtasikin kaivoksen muutamassa vuodessa.

Ojamon vanha kaivos on avolouhos, joka on täytynyt aikaa myöten vedellä. Louhoksen pituus 312 m ja leveys 100 m. Syvyysprofiili ei ole selvillä, arvioitu syvyys on 150 metriä, mutta louhoksesta voi löytyä syvempiäkin kohtia. Louhos on kalkkikiveä, jonka rakoilun ansiosta pohjavesi tuo lämpöä kauempaakin louhokselle. Avolouhoksesta lähtee lukuisia sivukäytäviä.

GTK:n asiantuntijan Jouni Piispasen mukaan Ojamo on Suomen aktiivisin luolamainen sukelluskohde, jossa on lähes päivittäin harrastajasukellusta. Ojamon kaivos on luolasukeltajien suosiossa, koska sukeltettavia luonnonluolia ei Suomessa käytännössä ole. Innofocus kouluttaa kaivoksella ammattisukeltajia ja Meriturva järjestää jonkin verran meriturvallisuuskoulutusta.

Ensimmäisen kerran Ojamossa sukeltettiin 1970-luvulla. Vettä on kaivoksessa ainakin 200 metrin syvyyteen asti. Kaivoksen vesi suodattuu maaperän läpi ja on siksi kirkasta ja sukeltamiselle suotuisaa. Sukelluskäytössä olevia kaivostunneleita on kymmeniä kilometrejä: pitkiä tunnelitasoja on ainakin syvyyksillä 28 m, 45 m, 58 m, 60 m, 88 m ja 138 m. Viistoon pääkuiluun pääsee sukeltamaan 138 metrin tasolle asti, mutta pääkuilun yläpää on suljettu kiviaineksella. Pääkuilun yläpäähän pääsee vain mutkaisen 28 m syvän tunnelin kautta. Veden lämpötila on tutkituilla syvyyksillä noin 5 °C. Sukeltajien tekemien mittauksen perusteella lämpötilan syvyysvaihtelut ovat hyvin vähäisiä.

Ojamon omistusoikeudet ovat Lohjan kaupungilla. Lämmöntalteenottoa suunniteltaessa olisi selvitettävä miten talteenotto vaikuttaisi Meriturvan järjestämän pelastuskoulutuksen toimintaan. Lämmöntalteenoton suurimmat vaikutukset ovat vesimassan pintakerroksessa.

5.2.3 Nordkalk Tytyrin kaivos

Loher tekee yhteistyötä Lohjalla toimivan Nordkalkin kalkkikaivoksen kanssa. Kalkkiuunien hukkalämpö siirretään Loherin verkkoon. Nordkalkin kaivostoiminta jatkuu vielä kauan mutta pitkän aikavälin mahdollisuus kaivoksen hyödyntämisessä energianlähteenä on olemassa. Tällä hetkellä käytöstä poistettuja kuiluja käytetään voimalaitostuhkan loppusijoitukseen. Nordkalk ei ole kiinnostunut luovuttamaan kaivoskäytäviä muuhun käyttöön niin kauan kuin toiminta jatkuu. Kuilut voisivat olla käytävissä noin 50 vuoden kuluttua. Tytyrin kaivoksen hyödyntämistä ei tarkasteltu tässä hankkeessa, mutta raportin Johtopäätökset-luvussa on esitetty ehdotuksia mahdollisiksi tarkastelutavoiksi tulevaisuudessa.

5.3 Outokumpu

5.3.1 Outokummun Energia Oy

Outokummun Energian liikevaihto on vajaa 10 M€ ja henkilökuntaa on 21-23 henkilöä. Asiakkaita on keskustassa 250-300 rakennusta ja teollisuuskylässä toistakymmentä teollisuusrakennusta. Kaupungin omistama Teollisuuskylä Oy kuluttaa 25 % kaukolämmöstä. Teollisuuskylä omistaa oman alueensa kaukolämpöverkoston, joka on Outokummun Energian käytössä. Outokummun Energian omistaja on Outokummun kaupunki.

Outokummun Energian asiakkaina on keskustassa 250- 300 kiinteistöä ja teollisuuskylässä toistakymmentä teollisuusrakennusta. Kaupungin omistama Teollisuuskylä Oy kuluttaa 25 % kaukolämmöstä. Teollisuuskylä omistaa oman alueensa kaukolämpöverkoston, joka on Outokummun Energian käytössä.

Kaukolämpöenergia tuotetaan tällä hetkellä pääosin bioenergialla (hake), huipputehoja joudutaan tuottamaan fossiilisella energialla (raskas polttoöljy). Kokonaislämmöntuottoteho on noin 22 MW. Öljyn käyttöosuus energiantuotannossa on ollut noin 10-14 %. Vuonna 2011 öljyn käyttöosuus saatiin laskettua 2.5 %:iin mm. ajotapaa muuttamalla ja sähkösuodatinten avulla. Outokumpu Oy:n omistamien vanhojen kaivoskuilujen hyötykäyttö kaukolämmön tuotannossa soveltuisi hyvin Outokummun maineeseen Suomen merkittävimpänä kaivospaikkakuntana.

Maaperän lämpöenergian lämpötila saadaan lämpöpumppuja sarjaan kytkemällä nostettua jopa 80- 90 °C tasolle. Tämä lämpötila on silti liian alhainen kaukolämpöverkoston menopuolelle. Outokummun Energia ei ole kiinnostunut kaukolämmön paluveden lämmittämisestä lämpölaitoksen hyötysuhteen pienenemisen vuoksi.

5.3.2 Outokummun kaivos

Outokummun kaivostoiminta sai alkunsa Outokummun kuparilöydöstä vuonna 1910, ja kaivos oli aikoinaan Euroopan suurin kuparikaivos. Kaivoksissa oli yhteensä yli 400 kilometrin mittainen kaivoskäytäväverkosto. Syvin kohta oli 430 metrin syvyydessä. Outokummussa ei tällä hetkellä ole kaivostoimintaa. Kaivostoiminta päättyi lopullisesti 1989 kun Keretin kaivos suljettiin.

Vanhan kaivoksen alueella Outokummun keskustassa sijaitseva vinotunneli johtaa kaivoksen pohjalle asti. Lisäksi kaivoksen ilmanvaihtokuiluista on yhteys erittäin laajaan tunneliverkostoon. Vinotunnelin pää ja ilmanvaihtokuilut on tällä hetkellä suljettu turvallisuussyistä.

Keretin historiaa tuntevan kaivosinsinööri Arto Hakolan mukaan kallioperä on Outokummussa erittäin rakeinen ja vesi virtaa helposti ilman kaivoskäytäviäkin. Kiinnostavin vaihtoehto kaivosvesien energian hyödyntämiseksi olisi Outokummun keskustassa sijaitseva suljettu vanha vinotunneli, jonka voisi avata ja selvittää pääseekö veteen käsiksi. Koko vinotunneli on veden peitossa, tunnelin pituus on kolmisen kilometriä, syvimmillään tunneli on 300- 400 metrin syvyydessä. Haasteena olisi selvittää miten vesi saataisiin johdettua takaisin

kaivokseen lämmöntalteenoton jälkeen ja mikä olisi optimaalisin paikka palauttaa vesi, että se ehtisi varata riittävästi lämpöä ennen uutta kierrosta pinnalla.

Outokumpu Mining Oy vastaa vanhoista kuiluista keskustan ja Keretin väliltä. Pääsy kuiluihin on turvallisuussyistä suljettu mutta Outokumpu Mining Oy on antanut alustavan luvan energiakäyttöön. Outokumpu Mining ei salli sukelluskäyttöä vaikka kaivostilat tutkimusten perusteella toimintaan soveltuisivatkin.

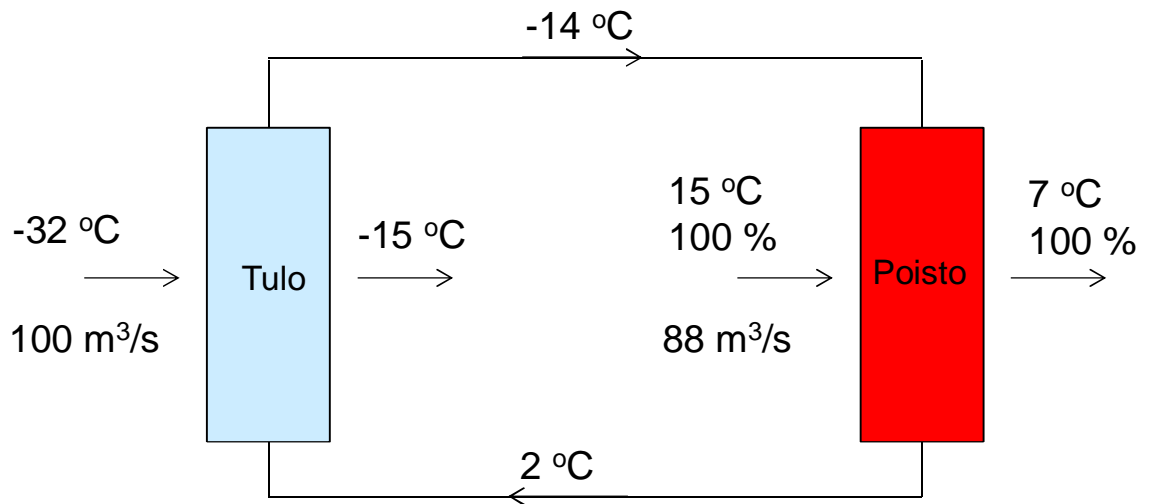
Kaivosyhtiö Altona Mining omistaa kaivosoikeudet Keretin entisen rikastushiekka-altaan päälle rakennetun golfkentän takana oleviin alueisiin, missä on tehty kaivauksia. Altona Miningin valtauksen avaaminen laskisi veden pintaa kaivostiloissa helposti noin 100 metriä, ellei tilalle tule uutta vettä.

6 Laskennat tarkastelukohteille

6.1 Lämmöntalteenotto Pyhäsalmen kaivoksen poistoilmasta

Kaivoksen tuloilmaa lämmitetään kuivanapitovedestä talteen otetulla lämmöllä. Matalan pH:n vuoksi kaivosveteen liuennut rauta kertyy lämmönvaihtimiin ja putkistoihin aiheuttaen tukkeumia. Kunnossapito vaatii järeitä laitteita.

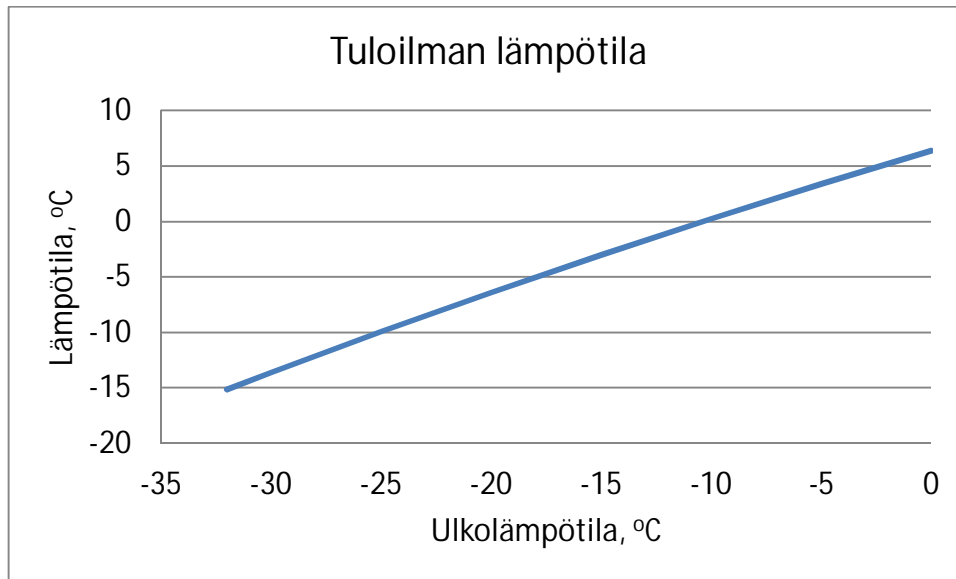
Kaivoksen poistoilman sisältämää lämpöä ei oteta tällä hetkellä talteen. Poistoilma on lievästi hapanta n. 15 °C lämmintä vesisumua, jonka sisältämä energiamäärä on huomattava. Alla olevassa kuvassa (Kuva 8) on esitetty lämmöntalteenottojärjestelmä, joka on mitoitettu lämmittämään tuloilma lämpötilaan -15 °C. Kuivanapitovedestä talteen saatava lämpö riittää tuloilman loppulämmitykseen kaivoksen tarvitsemaan minimilämpötilaan 4 °C.



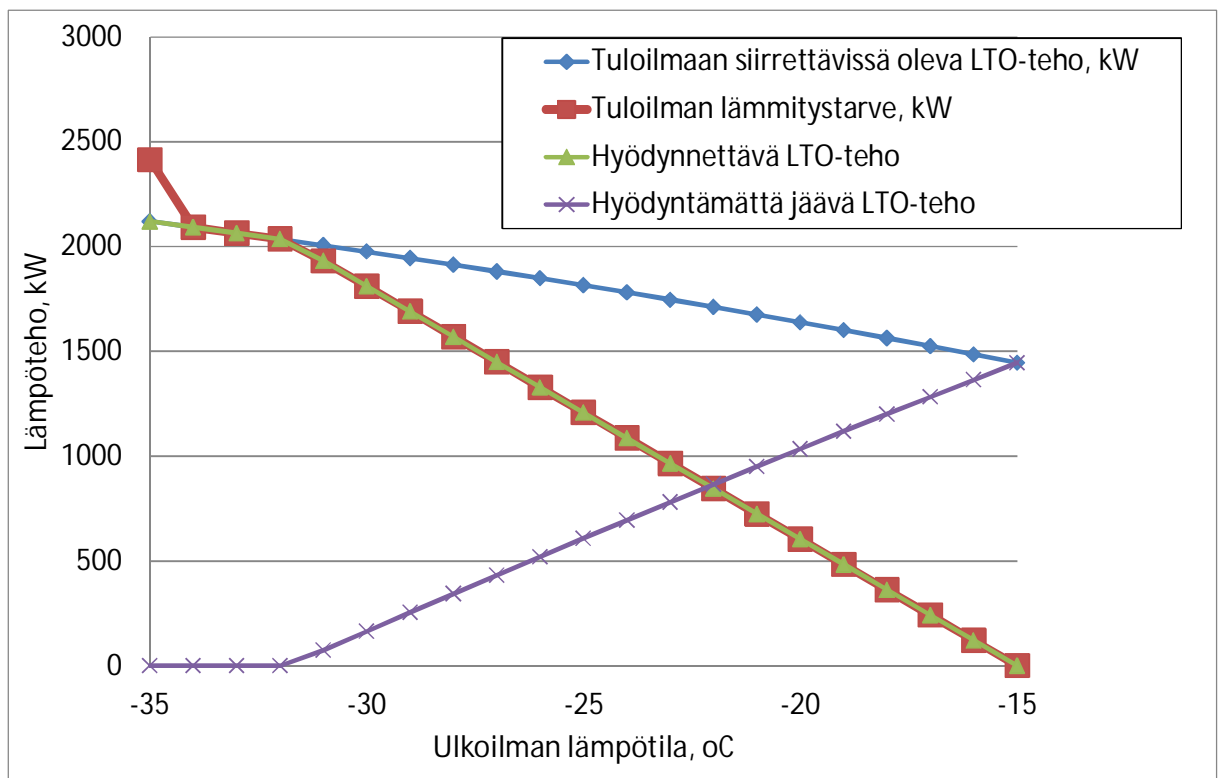
Kuva 8. Poistoilman lämmöntalteenotto nestekiertoisella järjestelmällä. Esimerkkimitoitus ulkolämpötilassa -32 °C. Kiertonesteenä on 35 % etyleeniglykoli.

Yllä olevan kuvan mukainen järjestelmä mitoittiin erään lamellipatterivalmistajan pattereille, joissa käytetään 0.2 mm paksuja alumiinilamelleja 2 mm:n jaolla. Lamellipattereiden otsapinta-ala on 34 m², tulopatteri on 4-rivinen ja poistopatteri 3-rivinen. Kuva 8 esittää tulo- ja poistoilmavirrat sekä lämmönsiirtopiirin lämpötilat mitoitustapauksessa ulkolämpötilalla -32 °C. Tulopatterin lämmitysteho on 2 020 kW, tulopatterin aiheuttama lisäpuhallinteho 14 kW ja poistopatterin 10 kW. Kiertonestepumpun pumppausteho on 17 kW. Lamellipatterit voidaan mitoittaa myös hieman pienemmiksi, mutta silloin puhallin- ja pumpputeho kasvavat. Esimerkiksi otsapinnaltaan 24 m² 5-rivinen tuloilmapatteri sekä 19 m² 4-rivinen poistoilmapatteri johtavat puhallintehoihin 30 ja 29 kW ja pumpputehoon 25 kW.

Kuvassa 9 on esitetty laitteistolla saatava tuloilman lämpötila. Kuva 10 näyttää talteen saatavan lämpötehon eri ulkolämpötiloissa. Ulkolämpötilan -32 °C yläpuolella osa saatavasta tehosta jää käyttämättä, koska tuloilmaa lämmitetään edelleen kuivanapitovedellä.



Kuva 9. Poistoilman lämmöntalteenottolaitteella saatavissa oleva tuloilman lämpötila eri ulkolämpötiloissa.



Kuva 10. Poistoilmasta tuloilmaan siirrettävissä oleva lämpöteho, tuloilman lämmitystarve sekä hyödyntämättä jäävä lämmön talteenottoteho eri ulkolämpötiloilla. Tarvittava tuloilman lämpötila on -15 °C .

Ukolämpötila on Pyhäsalmeella alle -15 °C alapuolella noin 650 tuntia vuodessa. Poistoilmasta tuloilmaan saatava, hyödynnettävissä oleva energia on tänä aikana noin 400 MWh. Puhaltimien ja pumppujen tarvitseva lisäenergia lämmön talteenoton johdosta on noin 25 MWh mikäli patterit voidaan käyttöajan ulkopuolella ohittaa. Saatava vuotuinen säästö on noin 26 000 €, jos lämmön hinta

on 70 €/MWh ja sähkön hinta 100 €/MWh. Lämmöntalteenoton vaatima investointi on luokkaa 140 000 – 250 000 € (ALV 0 %) riippuen siitä mitä materiaalia poistoilmapattereissa joudutaan käyttämään korroosion ja likaantumisen takia, esimerkiksi korroosionkestävää muovia. Laitteiston takaisinmaksuajaksi tulee näin ollen hieman alle 10 vuotta.

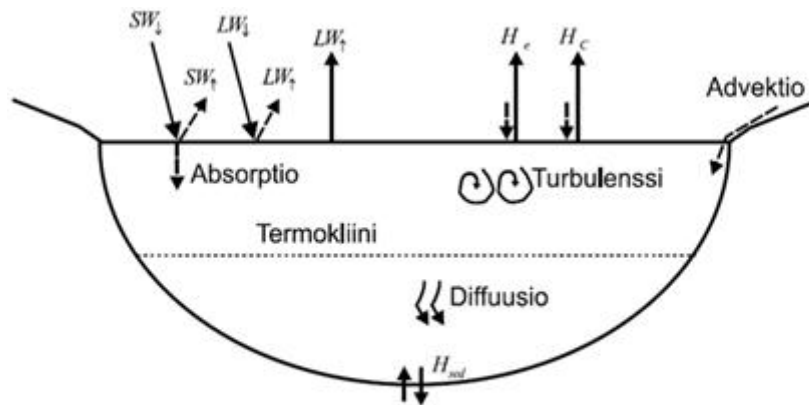
Takaisinmaksuaika lyhenee, jos poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmä mitoitetaan vain osalle tuloilmavirtaa ja loppuosa tuloilmasta lämmitetään kuivanapitovedellä. Näin vältetään kahden lämmöntalteenottojärjestelmän kytkentä sarjaan ja poistoilman lämpöä voidaan hyödyntää vuodessa pidemmän aikaa. Tämä järjestely vaatii toisenlaisen mitoituksen lämmön talteenotolle sekä poistoilmasta että kuivanapitovedestä. Hyödyntämättömälle poistoilman lämmölle (kuva 10) voi löytyä kaivokselta muutakin käyttöä.

6.2 Lämmöntalteenotto Lohjan Ojamon avolouhoksesta

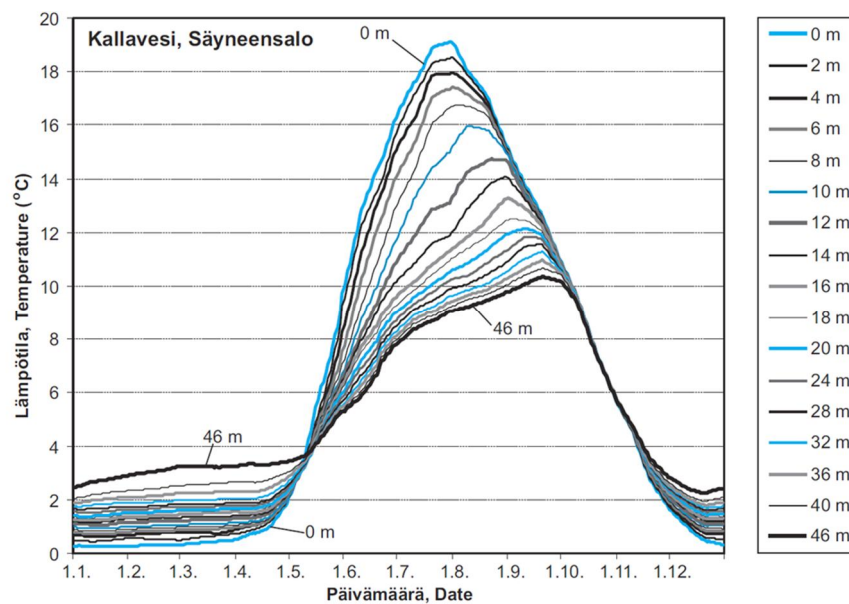
Lämmöntalteenottoa Ojamon vanhasta vedellä täyttyneestä avolouhoksesta (kuva 11) tarkasteltiin aluksi maaperän lämpötasemallilla, jolloin lämmönlähteenä on suuressa syvyydessä vallitseva korkeampi lämpötila. Lohjalla lämpötila on 14 astetta 500 metrin syvyydessä. Todettiin kuitenkin, että maaperästä veteen siirtyvä lämpövirta on pieni verrattuna muihin altaan lämpövirtoihin (kuva 12) verrattuna, joten altaan lämpötasetta tarkasteltiin järven tapaan. Kuva 13 esittää miten lämpötila käyttäytyy syvänteessä eri korkeuksilla vuodenaikojen vaihtuessa.



Kuva 11. Ojamon täyttyneen avolouhoksen muodostama lampi on noin 300 metriä pitkä ja 150 metriä syvä .

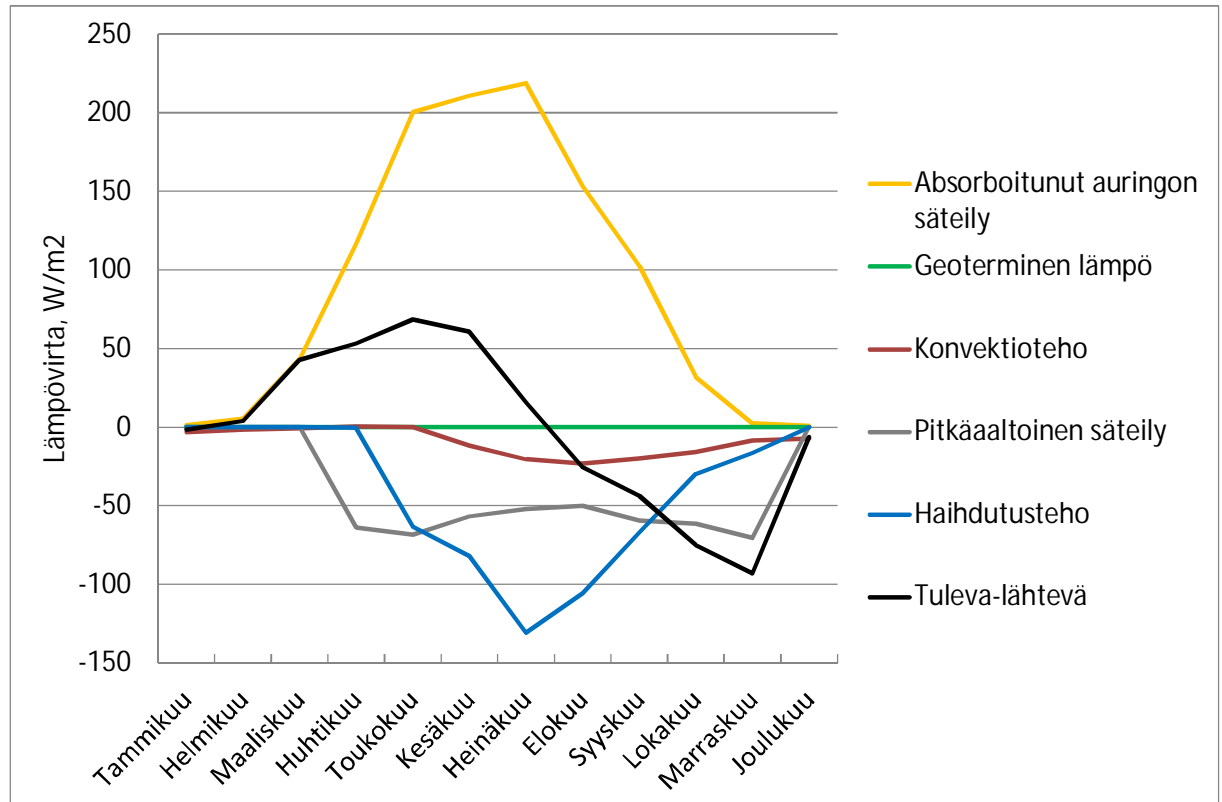


Kuva 12. Järven lämpöloihin vaikuttavat fysikaaliset prosessit. SW = lyhytaaltainen säteily, LW = pitkäaalton säteily, H_e = latentti lämpövuoto, H_c = havaittava lämpövuoto ja H_{sed} on sedimentin lämpövuoto (Korhonen 2002)



Kuva 13. Järviveden keskimääräinen lämpötila syvänteessä (1981-2000 Kallaveden Säyneensalo). 0 m = pintaveden lämpötila, 2 m = lämpötila kahden metrin syvyydellä, jne. Käyrät on esitetty pinnasta 20 metriin kahden metrin välein ja siitä syvemmillä neljän metrin välein. (Korhonen 2002)

Kuvaan 14 on laskettu arvio avolouhoksen veden lämpötaseesta kuukausittain nykytilanteessa, kun vedestä ei oteta lämpöä. Lämpöä tulee pääosin auringosta ja vähäisessä määrin maaperästä geotermisenä lämpönä. Lämpöä kuluu eniten veden haihduttamiseen (laskennassa 525 mm vuodessa). Seuraavaksi suurimmat lämpöhäviötermiit ovat pitkäaaltoinen säteily (tulevan ja poistuvan ero kuvassa 12) sekä konvektio (havaittavan lämmön vuo kuvassa 12). Kuvassa on myös veteen tulevan ja vedestä poistuvan lämmön erotus, joka on keväällä positiivinen ja kääntyy negatiiviseksi heinäkuun lopulla.

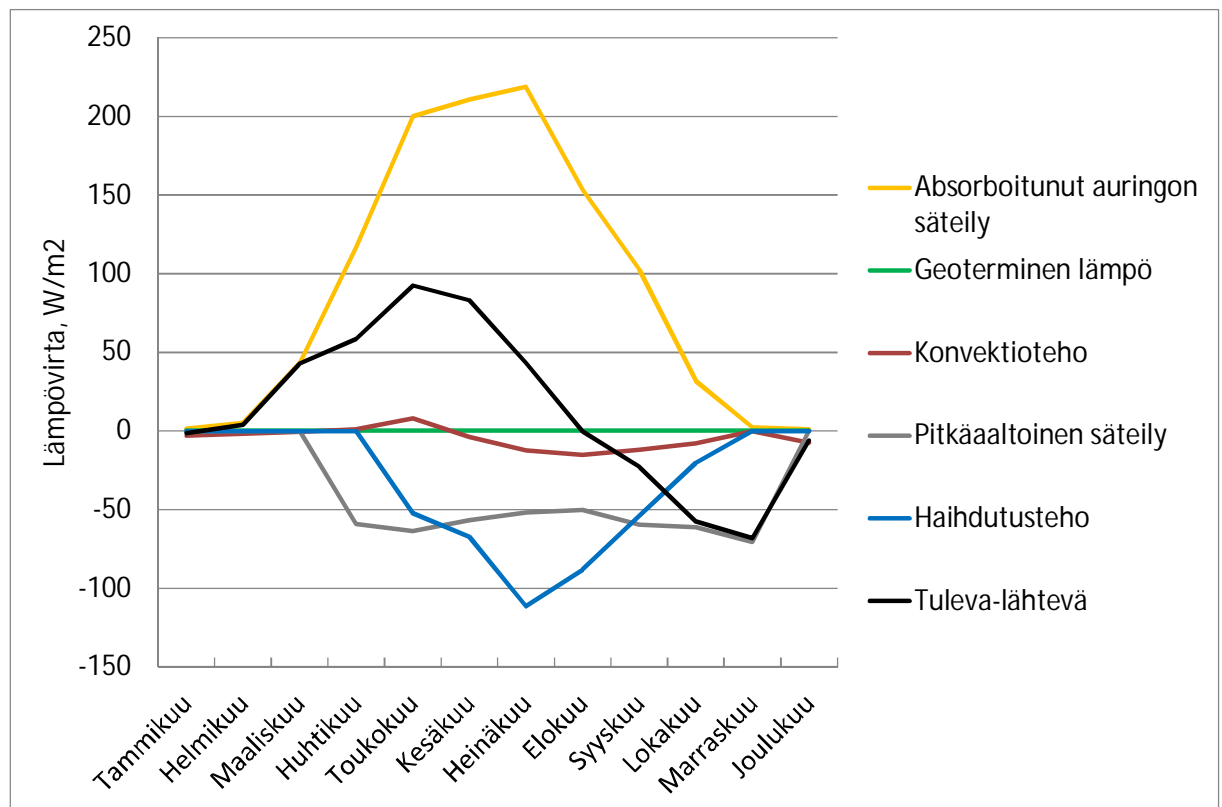


Kuva 14. Laskettu avolouhoksen veden lämpötase neliometriä kohti kuukausittain.

Lämpöhäviötermien laskentaan tarvitaan useita parametrejä (pilvisuus, konvektion lämmönsiirtokerroin, vesi- ja lumipinnan säteilyominaisuudet), joille valittavat arvot vaikuttavat tuloksiin. Tärkeimmät parametrit liittyvät ilmakehän pitkäaaltoiseen vastasäteilyyn (Choi, ym. 2008) sekä veden haihtumiseen (Finch&Calver 2008). Veden pinnan lämpötilaero ulkoilmaan nähden on laskennassa arvioitu Etelä-Pohjanmaalla sijaitsevan 36 m syvän Lappajärvinimisen kraaterijärven perusteella (Korhonen 2002). Maaperästä saatavaa lämmön osalta oletettiin, että geotermistä lämpöä (0.037 W/m^2) saadaan alalta, joka vastaa viittä altaan pinta-alaa. Laskennan epävarmuuksista huolimatta kuvan 14 lämpötasetta voitaneen käyttää avolouhoksesta saatavan lämmön suuruusluokkarviointiin.

Kuvaan 15 on laskettu vastaava lämpötase tilanteelle, jossa avolouhoksen vesipinnan lämpötila on astetta viileämpi kuin kuvassa 14. Alemman pintalämpötilan johdosta erityisesti haihtumislämpövirta pienenee (haihdunta 417 mm vuodessa) samoin kuin konvektiolämpövirta. Kokonaislämpötaseeseen

syntyy kuvaan 14 verrattuna ylimäärä, joka vastaa koko vuoden aikana keskitehoa 14 W/m^2 . Näin paljon voitaisiin siis ottaa lämpöä avolouhoksen vedestä, jos pintalämpötilan annetaan laskea keskimäärin asteen verran. Koko altaan veden lämpötilan vastaava aleneminen voi olla astetta pienempi tai suurempi riippuen siitä miten lämmönotto vedestä vaikuttaa veden kiertoon ja sitä kautta veden lämpötilajakautumaan. Veden kierron muuttumisen arviointi on epävarmaa muun muassa sen johdosta, että nykyinen veden lämpötila ($5 \text{ }^\circ\text{C}$) on lähellä veden tiheysmaksimia ($4 \text{ }^\circ\text{C}$). Tällöin veden jäädyttäminen esimerkiksi lämpötilaan $2 \text{ }^\circ\text{C}$ tekee sen kevyemmäksi ja se pyrkii pintaa kohti.



Kuva 15. Laskettu avolouhoksen lämpötase kuukausittain, jos pintaveden lämpötila alenee yhdellä asteella.

Edellä laskettu yhden asteen jäähtymää vastaava lämpöteho 14 W neliometriä kohti vastaa Ojamon 2.6 hehtaarin altaassa keskimääräistä kokonaistehoa 360 kW ja vuositasolla energiaa $3\,100 \text{ MWh}$. Tällä teholla allasvesi jäähtyy asteen verran noin vuodessa, jos lämpöhäviöt eivät samalla pienene. Altaan tilavuudeksi on arvioitu 2.6 miljoonaa kuutiometriä mikä vastaa keskisyvyyttä 100 m . Pinnan jäähtymistä kahdella asteella vastaava keskimääräinen teho on 670 kW ja vuosienenergia $5\,900 \text{ MWh}$ eli lähes kaksinkertainen yhden asteen jäähtymään verrattuna.

Allas on tavallaan aurinkoenergian kerääjä, jonka hyötysuhde on yhden asteen jäähtymällä 13% ja kahden asteen jäähtymällä 24% . Hyötysuhde on laskettu jakamalla otettu lämpöteho auringon keskimääräisellä säteilyteholla 111 W/m^2 .

Lämpötaseen laskentatarkkuutta voisi parantaa mittaamalla altaan lämpötilaprofiilia eri vuodenaikoina.

Lämmöntalteenoton taloudellista kannattavuutta kaukolämmön paluueden lämmityksessä tarkasteltiin erilaisilla laskentatapauksilla (Taulukko 3).

Taulukko 3. Kaukolämmön paluueden lämmityksen kannattavuustarkastelun lähtötiedot

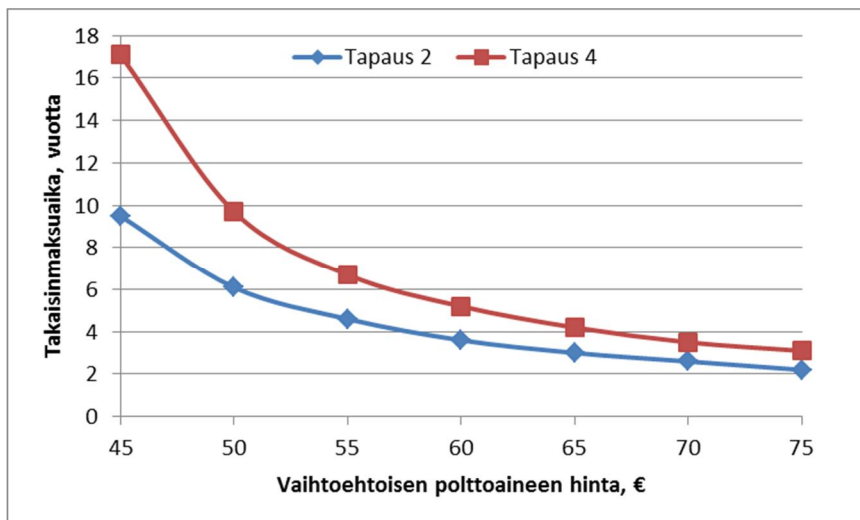
Tapaus	Kaukolämmön paluueden lämpötila, °C	Lämpötila, johon kaukolämmön paluuvesi lämmitetään, °C	Kaukolämmön paluueden virtausmäärä, m ³ /h
1	45	65	3
2	45	65	10
3	55	65	3
4	55	65	10

Kullekin laskentatapaukselle mitoitettiin Scancoolin mitoitushjelmalla lämpöpumppuratkaisut (Taulukko 4). Tarvittavan Ojamon vesivirran laskennassa ottolämpötilana pidettiin 5 °C ja palautuslämpötilana oli 2 °C. Glykolipiirin meno- ja paluulämpötilat olivat -1 °C ja 2 °C.

Taulukko 4. Kaukolämmön paluueden lämmityksen kannattavuustarkastelun mitoitussarvot. COP = lämpökerroin.

Tapaus	Lämpöteho, kW	Sähkönkulutus, kW	COP	jäähdytysteho, kW	tarvittava vesivirta Ojamosta, dm ³ /s
1	70	25	2.8	45	3.6
2	233	83	2.8	150	11.9
3	35	14	2.6	22	1.7
4	116	45	2.6	72	5.7

Lämmöntalteenottoratkaisun kannattavuus riippuu sähkön hinnasta, koska tuotettavan energian hinta saadaan jakamalla sähkön hinta lämpökertoimella (COP). Sähkön hinnalla 100 €/MWh tuotetun energian hinta on 35.70 € tapauksille 1 ja 2 ja 38.5 € tapauksille 3 ja 4. Konttiratkaisuiden hinta-arviot vaihtelevat välillä 35 000 – 115 000 €. Hintoihin ei sisälly veden pumppaus kontille. Vaihtoehdoisen polttohinnan avulla kullekin tapaukselle voidaan laskea takaisinmaksuaika. Alla oleva kuva (Kuva 16) esittää miten järjestelmän takaisinmaksuaika riippuu vaihtoehdoisen polttoaineen hinnasta tapauksille 2 ja 4, joissa paluuvesivirta on 10 m³/h. Paluuvesivirralla 3 m³/s (tapaukset 1 ja 3) takaisinmaksuajat ovat pidempiä.



Kuva 16. Konttiratkaisun takaisinmaksuajan riippuvuus vaihtoehtoisen polttoaineen hinnasta kahdelle eri laskentatapaukselle



Kuva 17. KWH Pipen lämmönvaihdin (lähde: KWH Pipe)

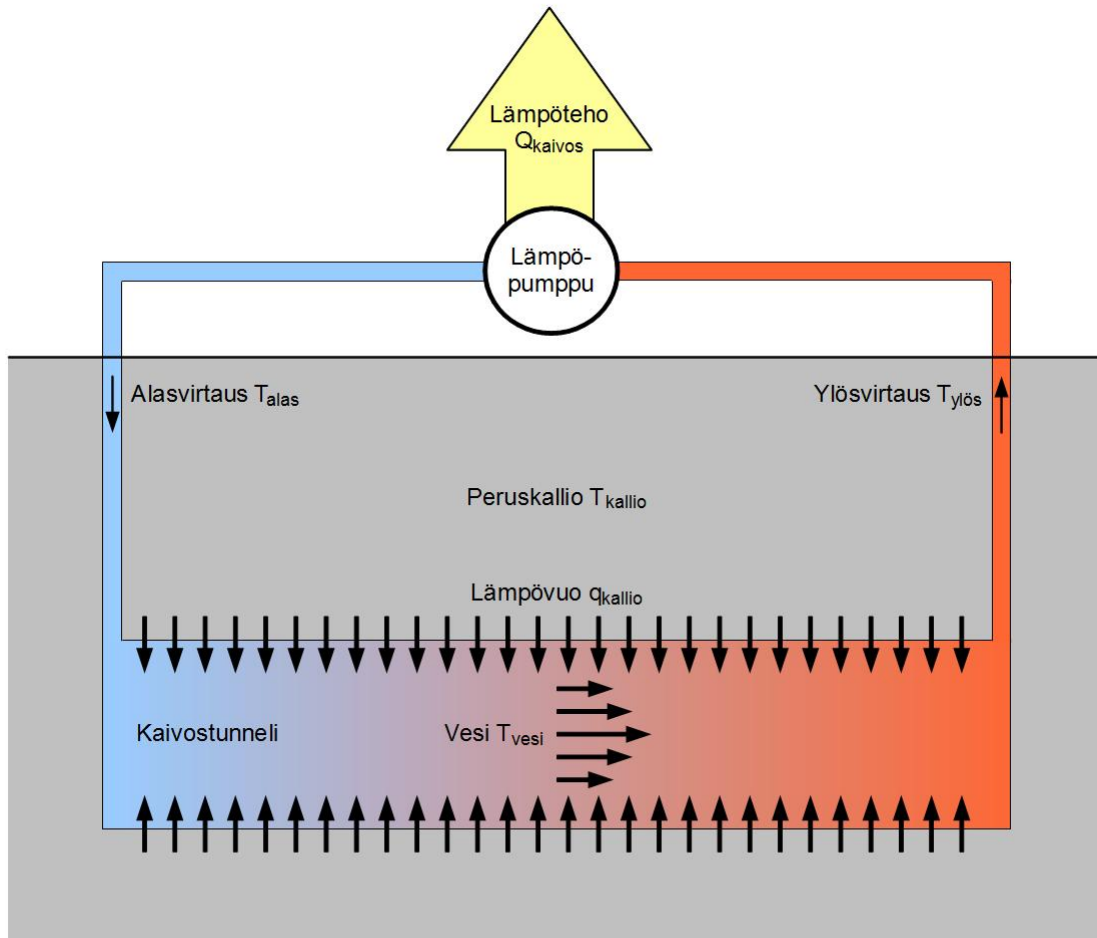
KWH Pipen PE-HD-muovista valmistetun putkilämmönvaihtimen toimintaperiaate on esitetty yllä olevassa kuvassa (Kuva 17). KWH Pipen vaihdinta optimaalisesti hyödyntävän lämpöpumpun tuottaman energian hintaa tarkasteltiin Ojamon tapauksessa. Laskennassa käytettiin sähkön hintana 100 €/MWh. Tuotetun energian hinta on suoraan verrannollinen sähkön hintaan. Laskentatapauksessa virtaus vaihtimelle oli 24 dm³/s, jolloin lämpöpumpun teoreettinen teho oli 250 kW. Lohjalla vesi voidaan ottaa läheltä pintaa, oletetun jääkerroksen alapuolelta. Tuotetun energian hinta pysyy kohtuullisena vaikka nostokorkeus kasvaisi (Taulukko 5).

Taulukko 5. Tuotetun energian hinnan riippuvuus nostokorkeudesta

Nostokorkeus, m	10	20	50
Pumppausteho, kW	3	6	14
Tuotetun energian hinta, €/MWh	43	47	60

6.3 Lämmöntalteenotto Outokummun vinotunnelista

Vedellä täyttyneitä kaivostunnelia voidaan käyttää lämmön talteenottoon samaan tapaan kuin tavallista, omakotitalon pihalle, peruskallioon porattua energiakaivoakin. Kaivostunnelin tapauksessa käytetään kuitenkin avointa järjestelmää, toisin kuin Suomessa tyypillisesti käytettävissä energiakaivoissa, jotka ovat suljettuja piirejä, joissa lämmönkeruuneste virtaa muovisen U-putken sisällä. Viileä vesi pumpataan kaivostunnelin toiseen päähän porattua reikää pitkin alas ja vastakkaiseen päähän porattua reikää pitkin ylös. Tällöin kaivostunneliin syntyy pakotettu virtaus. Peruskallion ollessa syötettävää vettä lämpimämpi, lämpöä virtaa kaivostunnelin seinämien läpi peruskalliosta lämmönkeruunesteenä käytettävään kaivosveteen (Kuva 18).



Kuva 18. Vedellä täyttyneen kaivostunnelin käyttö lämmöntalteenottoon. Kaivostunnelin päästä päähän virtaava vesi lämpenee, kun peruskallio on tunnelissa virtaavaa vettä lämpimämpi eli $T_{\text{kallio}} > T_{\text{vesi}}$. Tällöin tunnelin seinämien läpi virtaa lämpövuoto q_{kallio} , joka lämmittää vettä. Maanpinnalla lämpöpumpulla lämpötilaerosta $T_{\text{ylös}} - T_{\text{alas}}$ saadaan lämpöteho Q_{kaivos} .

Kalliosta veteen siirtyvä lämpövuoto q_{kallio} (W/m^2) on

$$q_{\text{kallio}} = h \cdot (T_{\text{kallio}} - T_{\text{vesi}}), \quad (1)$$

joka riippuu sekä lämmönsiirtokertoimesta h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), että kallion ja veden lämpötilaerosta $T_{\text{kallio}} - T_{\text{vesi}}$ (K). Lämmennyt kaivosvesi pumpataan tunnelin

toisesta päästä maanpinnalle, jossa lämpöpumpulla kaivostunnelissa lämmenteestä vedestä saatava lämpöteho Q_{kaivos} (W) on

$$Q_{\text{kaivos}} = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot (T_{\text{ylös}} - T_{\text{alas}}), \quad (2)$$

jossa ρ on veden tilavuus (kg/m^3), \dot{V} on veden tilavuusvirta (m^3/s), C_p on veden ominaislämpökapasiteetti (J/kgK) ja $T_{\text{ylös}} - T_{\text{alas}}$ (K) on tunnelissa lämmenteen ja tunneliin takaisin syötettävän veden lämpötilaero.

Kaivoksesta saatava lämpöteho on sitä suurempi, mitä suurempia veden tilavuusvirta \dot{V} ja lämpötilaero $T_{\text{ylös}} - T_{\text{alas}}$ ovat. Tilavuusvirran kasvattaminen kuitenkin pienentää kaavan (1) lämmönsiirtokerrointa h , koska sen suuruus on sitä pienempi, mitä suurempi tilavuusvirta on. Jos virtaamaa kasvatetaan, tunnelissa virtaavaan veteen siis siirtyy yhä vähemmän lämpöä, ja ylös pumpattavan veden lämpötila $T_{\text{ylös}}$ pienenee. Lämpöpumpullakaan ei lämpötilaeroa voida kasvattaa, koska lämmönkeruuneste on vettä, ja tunneliin syötettävän veden lämpötilan T_{alas} täytyy olla riittävästi yli $0\text{ }^\circ\text{C}$. Tilavuusvirralle on löydettävissä optimiarvo, jolla kaivoksesta saadaan suurin lämpöteho. Tilavuusvirran pienentäminen tai suurentaminen tästä optimiarvosta laskee saatavaa lämpötehoa.

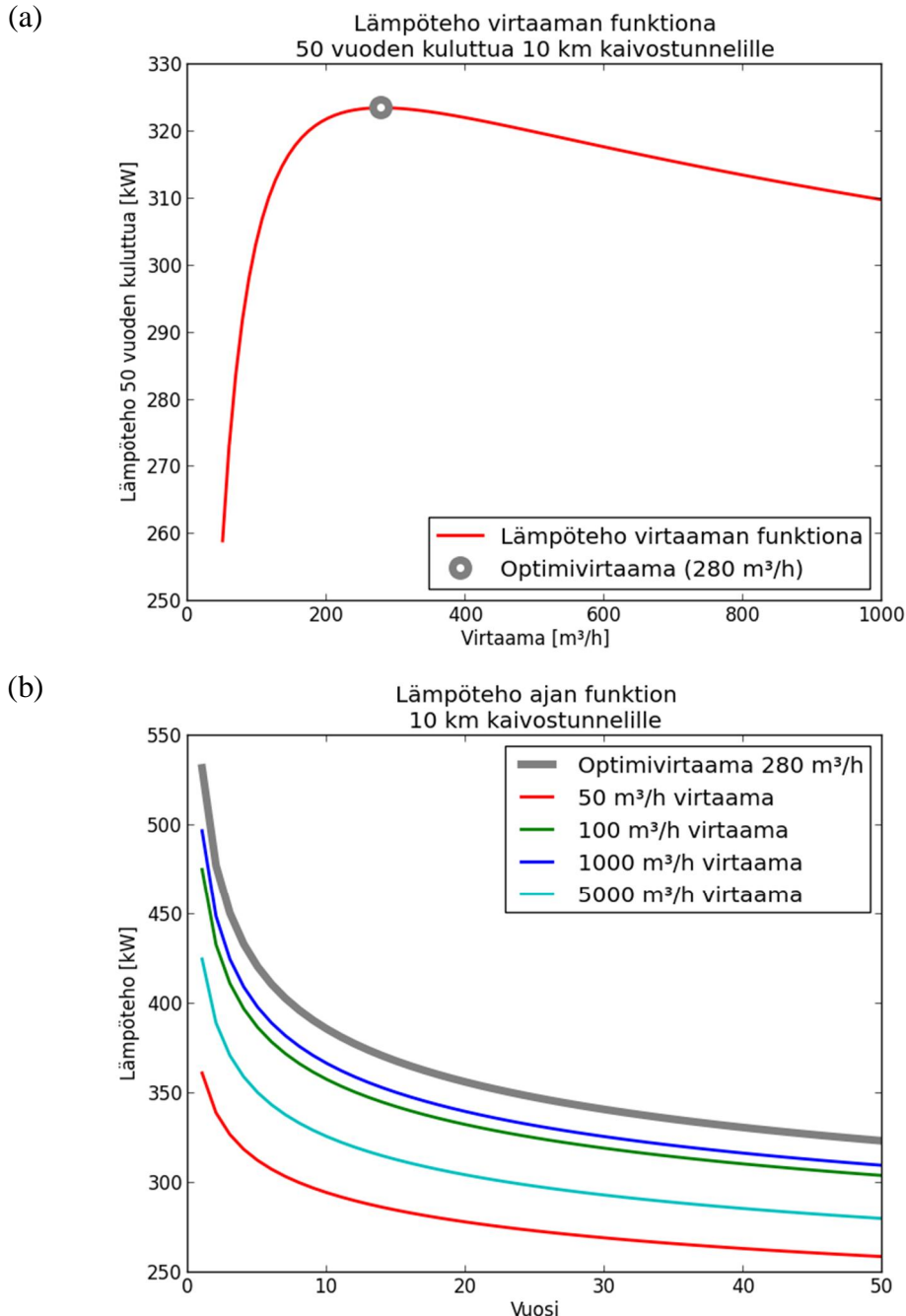
Seuraavassa tarkastellaan laskennallisesti Outokummun vinotunnelia VT1 vastaavasta kaivostunnelista saatavaa lämpötehoa Q_{kaivos} . Laskentamenetelmällä (Rodríguez and Díaz 2009) voidaan arvioida kuinka paljon kaivosvesi lämpenee tunnelissa, kun syötettävän veden lämpötila T_{alas} , veden tilavuusvirta \dot{V} ja peruskallion lämpötila T_{kallio} sekä veden ja kallion lämpöominaisuudet tunnetaan. Menetelmä huomioi myös että kallion lämpötila laskee ajan funktiona, kun kallioista otetaan yhä enemmän lämpöä. Tarkastelujakso on 50 vuotta ja lämmityskauden pituudeksi oletetaan yhdeksän kuukautta. Kesäaikana kaivosveteen latautuu kallioperästä lämpöä kolme kuukautta. Alasvirtaavan veden lämpötilaksi on arvioitu $2\text{ }^\circ\text{C}$. Tunneli sijaitsee 400 m :n syvyydellä, jossa peruskallion lämpötila on noin $10\text{ }^\circ\text{C}$ (Kukkonen, 2011). Tunnelin pinta-alaksi oletettiin $5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$. Taulukko 6 esittää laskuissa käytettyjä peruskallion ja veden lämpöominaisuuksia.

Taulukko 6. Laskennallisissa tarkasteluissa käytetyt lämpöominaisuudet vedelle ja peruskalliolle.

Ominaisuus	Lukuarvo
Kallion tiheys	2850 kg/m^3
Kallion lämmönjohtavuus	3.2 W/mK
Kallion ominaislämpökapasiteetti	850 J/kgK
Veden tiheys	1000 kg/m^3
Veden lämmönjohtavuus	0.58 W/mK
Veden ominaislämpökapasiteetti	4186 J/kgK
Veden kinemaattinen viskositeetti	$1.3 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$

Kuva 19 esittää optimivirtaaman vaikutusta 10 km pitkstä kaivostunnelista saatavaan, kaavasta 2 laskettuun lämpötehoon Q_{kaivos} . Kuvan kaavio (a) esittää lämpötehoa 50 vuoden kuluttua virtaaman funktiona. Optimivirtaama on noin $280\text{ m}^3/\text{h}$. Kaavio (b) esittää sitä tosiseikkaa, että jos virtaama ei ole optimiarvossaan,

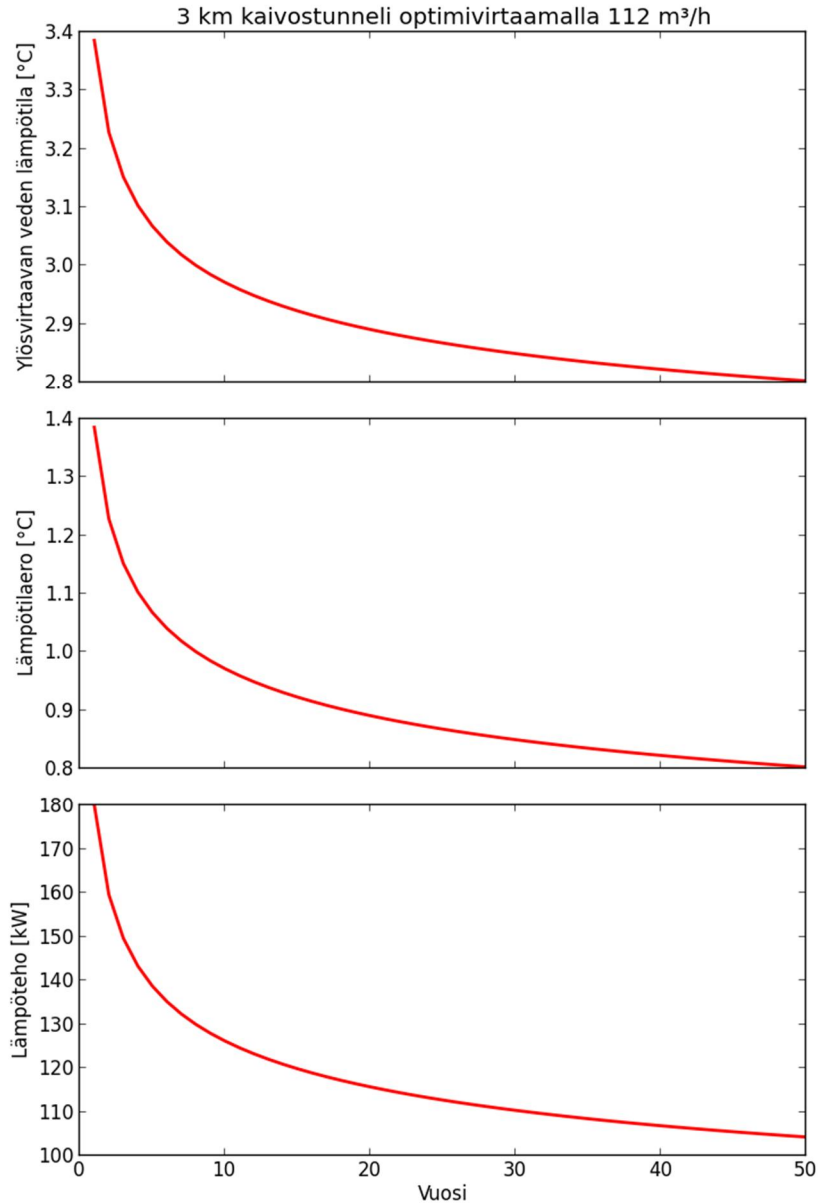
kaivostunnelista ei saada suurinta mahdollista lämpötehoa. Virtaaman kasvattaminen yli optimiarvon ei siis lisää kaivoksesta saatavaa lämpötehoa. Kuvasta nähdään myös miten kaivoksesta saatava lämpöteho laskee logaritmisesti ajan funktiona.



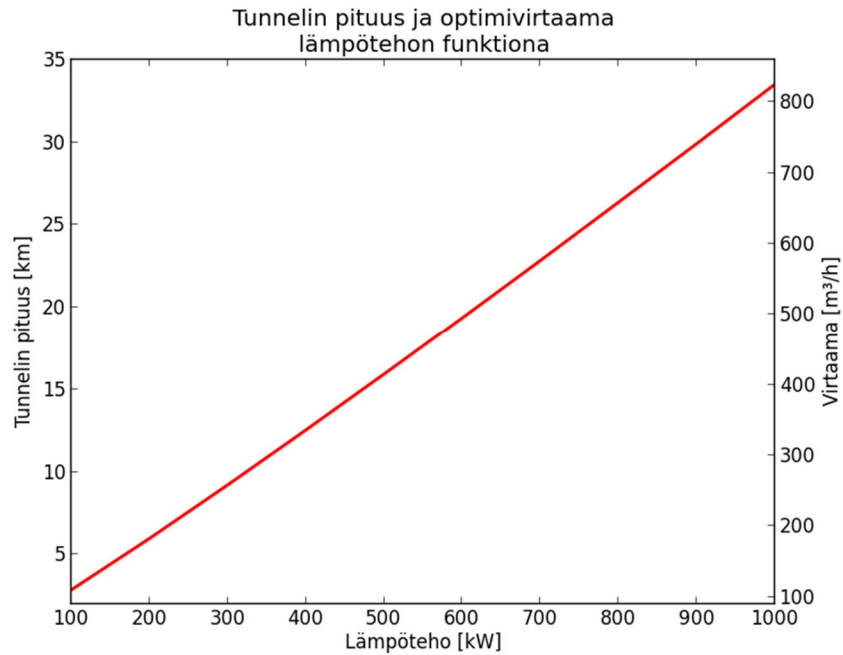
Kuva 19. Optimivirtaaman vaikutus 10 km pitkstä kaivostunnelista saatavaan lämpötehoon. (a) Lämpöteho 50 vuoden kuluttua virtaaman funktiona. (b) Lämpöteho ajan funktiona eri virtaamien arvoille.

Outokummun vinotunnelin VT1 vedellä täyttynyt pituus on noin 3 km. Tässä tapauksessa saataisiin alla olevassa kuvassa esitetyt tulokset optimivirtaamalla $112 \text{ m}^3/\text{h}$ (Kuva 20). Ensimmäisen vuoden jälkeen lämpötilaerosta $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$ saataisiin lämpöteho 180 kW . Viidenkymmenen vuoden päästä lämpötilaero olisi enää $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lämpötehoa saataisiin enää noin 100 kW . Seuraavassa kuvassa

(Kuva 21) on esitetty tunnelin pituus ja optimivirtaama lämpötehon funktiona. Jos kaivoksesta haluttaisiin vähintään 1 MW:n lämpöteho 50 vuoden tarkastelukaudeksi, tunnelin pitäisi olla noin 33.5 km pitkä ja virtaaman noin 13.8 m³/h.



Kuva 20. Ylösvirtaavan veden lämpötila, ylös- ja alasvirtaavan veden lämpötilaero ja 3 kilometriä pitkstä kaivostunnelista optimivirtaamalla 112 m³/h saatava lämpöteho ajan funktiona.



Kuva 21. Kaivostunnelin pituus ja optimivirtaama tunnelista saatavan lämpötehon funktiona.

Keretin alueella kallioperässä on runsaasti rakoja ja ruhjeita joissa pohjavesi pääsee virtaamaan. Oletettavaa on, että veden kierto lämmön talteenoton jälkeen takaisin vinotunneliin ja edelleen pinnalle kestää erittäin kauan. Kaivokseen tulee korvaavaa pintavettä, joka edesauttaa viilenneen veden sekoittumista.

Louhitut tilat kattavat koko Outokummun keskustan alueen. Vedellä täyttyneiden tunneleiden pituus on kymmeniä kilometrejä ja louhoksella täytettyjä tiloja on vielä moninkertaisesti enemmän. Laskennassa arvioitua tunnelin pituutta on siis riittävästi jopa megawatin tuottamiseen riittävästi.

Pinnankorkeuden aleneminen Altona Miningin mahdollisen kaivostoiminnan vuoksi ei sinällään ole riski energian saatavuudelle, jos pumppausasema sijoitetaan riittävän syväälle tai jos sitä voidaan tarvittaessa siirtää. Avointa järjestelmää käytettäessä pumppauskustannukset ovat merkittävin kuluerä ja ne tulisi arvioida. Nostokorkeus on merkittävin tekijä ja vaatii pumppaustehoa.

KWH Pipen lämmönvaihdin (Kuva 17) on suunniteltu toimivaksi suurilla virtausmäärillä (esim. 700 l/s) jolloin se voisi tuottaa kaivosvedestä jopa 1 MW lämpötehoa. Jatkuvan tehon saaminen edellyttäisi että vaihtimeen syötettävän veden lämpötila pysyy täysin vakiona eikä laske. Jos kaivokseen palautettavan veden lämpötila laskisi vaihtimella 8 °C (teholla 1 MW), tulisi kallioperästä saada lämpötilan pudotusta vastaava määrä korvaavaa lämpöä tilalle. Vuosien myötä kallio alkaa vääjäämättä jäähtyä ja se ei enää pysty nostamaan veden lämpötilaa riittävästi.

KWH Pipen vaihdinta optimaalisesti hyödyntävän lämpöpumpun tuottaman energian hintaa tarkasteltiin eri nostokorkeuksilla (Taulukko 7). Sähkön hintana käytettiin 100 €/MWh. Tuotetun energian hinta on suoraan verrannollinen sähkön hintaan. Virtaus vaihtimelle oli 83 l/s, jolloin lämpöpumpun teoreettinen teho on 530 kW. Huomataan, että nostokorkeuden kasvaessa pumppauskustannukset

kasvat ja tuotetun energian hinta ylittää sähköhinnan, tämän vuoksi kaivosvesi tulisikin pumpata läheltä pintaa.

Taulukko 7. Nostokorkeuden vaikutus tuotetun energian hintaan, Outokummun vinotunneli

Nostokorkeus, m	20	50	100
Pumppausteho, kW	19	48	96
Tuotetun energian hinta, €/MWh	62	101	166

Jos satojen kilowattien tai jopa megawatin lämpötehon tuottaminen Outokummussa ei ole kustannustehokasta, niin Keretin alueen kuilut soveltuisivat kuitenkin paikalliseen pienimuotoiseen energiantuotantoon. Lämpöenergian talteenotto tulisi tällöin tehdä kuiluista suljettua keruuputkijärjestelmää ja lämpöpumppua hyödyntäen. Kuilujen pinnankorkeuden laskeminen mahdollisen uuden kaivostoiminnan myötä olisi tällaiselle suljetulle järjestelmälle suuri riski. Geologian tutkimuskeskus suorittaa Vuonoksen avolouhoksen alueella tarkempia lämpötilamittauksia 2013 aikana. Mondo Minerals Vuonoksen tehdas pumppaa pinnansäätelyn takia avolouhoksen vettä jatkuvasti tehtaan sisällä olevasta kuilusta, joten avointa kiertoa hyödyntävä lämmön talteenottojärjestelmä on otettu tarkasteluun.

7 Liiketoimintamallit

Tekesin rahoittamassa Geoener-hankkeessa (2008-2010) selvitettiin liiketoiminta- ja ansaintamalleja geoenergialle. Näiden pohjalta MINERES-hankkeessa arvioitiin millaisia liiketoimintamalleja kaivoksista tuotettu geoterminen energia voisi tarjota eri osapuolille. Liiketoimintamallin olennaisin tehtävä on määrittellä yrityksille tärkeimmät prosessit ja tavat, joilla nämä prosessit tuottavat voittoa. Alla olevassa taulukossa on kuvattu mahdollisuuksia ja riskejä energialaitokselle, kaivosyhtiölle ja lämmöntalteenottojärjestelmän toimittajalle.

Taulukko 8. Liiketoimintamahdollisuudet ja –riskit eri toimijoille

TOIMIJA	(Kaupungin) energialaitos Liiketoimintavaikutukset	Kaivosyritys Liiketoimintavaikutukset	Järjestelmätoimittajat Liiketoimintavaikutukset
EDUT JA MAHDOLLISUUDET	Uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen energiantuotannossa. Energiantuotannon optimaalinen hallinta; parempi energiaomavaraisuus ja pienemmät päästöt (riippuen kaukolämmön alkuperäisestä tuotantotavasta).	Kaivoksen lämmitykseen tarvittavan ostoenergian ja lämmityskustannusten pienentäminen. Kaivoksen energiankäytön ympäristövaikutusten pienentäminen. Kaivosyhtiön vihreän imagon nosto (green bonus). Kaivoslain mukaan kaivosyhtiö on vastuussa kaivoksesta myös sen sulkemisen jälkeen: mahdollisuus saada hyötyä kaivoksesta myös sen sulkemisen jälkeen.	Uudet liiketoimintamahdollisuudet ja asiakkaat.
HAITAT JA RISKIT	Toimivuusriskit, huoltovarmuus. Jos lämpöpumpun kuluttaman sähkön tuotanto on hyvin ympäristökuormittava, tai sähköä joudutaan hankkimaan ulkomailta, ympäristövaikutukset voivat nousta suuremmiksi kuin vaihtoehtoisella polttoaineella tuotetulla kaukolämmöllä. Kaivoksesta tuotetun energian riittävyys myös pitkällä aikavälillä. Huonompi vaihtoehto kaupungin näkökulmasta alueella, jossa valmis kaukolämpöverkosto.	Voi kasvattaa toimivuus- vastuuongelmia. Energian riittävyys pitkällä aikavälillä, sitoutuuko järjestelmätoimittaja tähän?	Järjestelmän toimivuuden takaaminen asiakkaalle: energian riittävyys pitkällä aikavälillä.

8 Yhteenveto

8.1 Johtopäätökset

Kaivosten kuivanapitovesien energiapotentiaalia ei usein huomioida tai se rajataan tarkastelujen ulkopuolelle ilman varsinaista tarkastelua. Investointipäätösten tueksi olisi pystyttävä nopeasti laskemaan arvioita kuivanapitovesien energiapotentiaalista ja millä ratkaisuilla energiapotentiaalia voitaisiin hyödyntää. Investoinnin takaisinmaksuajan laskemiseksi tarvitaan luotettava arvio kaivoksen energiapotentiaalista ennen sen käyttöönottoa sekä vuosien päästä.

Kaivosten hyödyntämiseen liittyvä lainsäädäntö ja säädökset on huomioitava tarkastelussa. Kaivoksen omistaja omistaa pääsääntöisesti maapälliset alueet, kulkuväylät ja muut yhteydet kaivostiloihin. Tilanne, jossa kaivostiloihin saataisiin yhteys esim. poraamalla kaivosalueen ulkopuolelta ja energiaa saataisiin tällä tavoin siirrettyä, vaatisi oman lakitieteellisen tarkastelunsa.

Raaka-aineiden kysynnän kohotessa vanhoja malmioita harkitaan avattaviksi ja niitä on myös avattu uudestaan. Energiantuotannon kriteerit täyttävän potentiaalisen kaivoskohteen palautuminen tuotantoon sulkee osin pois kaivoksen hyödyntämismahdollisuuksia mutta toisaalta voi avata aivan uusiakin mahdollisuuksia kaivoksen tuotantoprosessin ja tilojen energiantarpeesta riippuen. Kun hylätyn malmion uudelleen avausta suunnitellaan, kaivosveden energian hyödyntäminen kannattaa huomioida sekä kaivostoiminnassa että kaivostoiminnan päättyessä. Tässä raportissa esitellyt kaivospaikkakunnat ovat Suomen oloissa sikäli poikkeuksellisia, että kaivokset sijaitsevat kohtuullisen lähellä asutuskeskuksia, jotka voisivat hyödyntää kaivosvesien energiaa.

Kaivos vaikuttaa toimiessaan ja edelleen sulkemisensa jälkeen ympäristöönsä. Parhaimmassa tapauksessa kaivoksen ns. ”jälkihoito” sekä energian talteenotto voidaan yhdistää toimivalla ja ympäristölle riskittömällä tavalla. Varautuminen talteenottojärjestelmän vikaantumiseen ja siitä johtuviin poikkeustilanteisiin on luonnollisesti huomioitava järjestelmän suunnittelussa.

8.2 Ehdotuksia jatkotarkasteluille

MINERES-hankkeen tavoitteena oli selvittää yleisiä suuntaviivoja kaivoksen geotermisen energian hyödyntämiseksi. Hankkeen jatkoksi ehdotetaan seuraavassa erilaisia tarkempia tutkimuksia kullakin kaivospaikkakunnalla.

Pyhäsalmissa voisi tarkastella mahdollisuuksia poistoilman lämmöntalteenottoon ja talteenotetun lämmön hyödyntämiseen. Talteenotettu lämpö voitaisiin siirtää eri käyttökohteisiin rakentamalla alueelle sisäinen lämmönjakoverkosto.

Laguna-hankkeen (hiukkaskiihdyttimen sijoitus kaivokseen) toteutuessa kaivoksen hyödyntämistä yhdyskunnan energiantuotannossa tulisi tutkia jotta hiukkaskiihdyttimen jäähdyttämisessä syntyvä lämpöenergia saisi hyödynnettyä.

Lohjalla pitkällä tähtäimellä suurin kaivoslämmön talteenottopotentiaali olisi Nordkalkin Tytyrin kaivoksen kuiluissa, joista osa sijaitsee Lohjan kaupungin alla. Nordkalkin pumppaamasta lämpötilatasot ovat paljon korkeampia kuin

Ojamossa. Veden laatuominaisuudet ovat hyvät ja vuotuinen kuivanapitovesivirta on Nordkalkin mukaan noin 1 100 000 m³. Kuivanapitoveden keskimääräinen lämpötila on 5-10 °C vuodenaikasta riippuen, kesällä lämpötila voi olla jopa 15 °C. Käytöstä poistettuja kuiluja käytetään tällä hetkellä voimalaitostuhkan loppusijoitukseen. Nordkalk ei ole kiinnostunut luovuttamaan kaivoskäytäviä muuhun käyttöön niin kauan kuin toiminta jatkuu. Kuilut voisivat olla käytettävissä noin 50 vuoden kuluttua. Kuivanapitovedestä voitaisiin selvittää esim. paljonko olisi saatava lämpöteho kaukolämmön paluueden esilämmitykseen. Tytyrin lähellä ei tällä hetkellä ole lämmitettävää kiinteistömassaa.

Ojamosta talteenotettua lämpöä voisi hyödyntää myös asuinalueen lämmityksessä, esimerkiksi lähellä sijaitsevan Haikarin puutaloalueella. Ojamon louhoksella esilämmitetty kiertovesi voitaisiin johtaa kullekin rakennukselle, joissa kiertoveden lämpötilan nostettaisiin kiinteistökohtaisella lämpöpumpulla halutulle tasolle. Ratkaisu toisi perinteiseen maalämpöjärjestelmään verrattuna investointisäästöä koska maalämpökaivoja ei tarvittaisi. Esimerkiksi Lohjan Energiahuolto voisi hoitaa kaivosveden pumppaamisen ja palautuksen. Tarkastelussa selvitetäisiin voitaisiinko kaivoslämmöllä kattaa koko puutaloalueen lämmöntarve, vai pitäisikö kulutushuippuja varten olla jokin muu lämmitysmuoto rinnalla, esim. kaukolämpö. Tarkastelun voisi tehdä sekä nykyiset rakennusmääräykset täyttävillä että hyvin energiatehokkailla taloilla.

Outokummussa vinotunnelin VT1 vieressä sijaitsee kerrostaloalue, jolla on energiaremontin tarpeessa olevia 60-70-luvun taloja. Yksi vinotunnelista talteenotetun lämpöenergian hyödyntämismahdollisuus olisi tarkastella riittäisikö vinotunnelista saatava lämpötilataso jopa lähes nollaenergiatasolle peruskorjattujen talojen tilalämmitykseen. Lämmin käyttövesi voitaisiin yhä tuottaa olemassa olevasta kaukolämpöverkosta. Vinotunnelia voisi kesäaikana ladata esimerkiksi aurinkolämmöllä. Osa vinotunnelin yhdyskuiluista on aukaistavissa, joten näistä voisi mitata lämpötilat esim. GTK:n valokuitumittausjärjestelmällä.

Lähdeviitteet

Choi, M., Jacobs, J.M., Kustas, W.P., 2008. Assessment of clear and cloudy sky parameterizations for daily downwelling longwave radiation over different land surfaces in Florida, USA. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L2042.

Finch, J., Calver, A. 2008. Methods for the quantification of evaporation from lakes. Prepared for the World Meteorological Organization's Commission for Hydrology. CEH Wallingford, UK.

Ghoreishi, S., Ghomsei, M., Hassani, F-P. ja Abbasy, F. 2012. Sustainable heat extraction from abandoned mine tunnels: A numerical model. *Journal of renewable and sustainable energy*. Volume 4, issue 3. Luettavissa <http://link.aip.org/link/doi/10.1063/1.4712055>.

Jessop, A., Macdonald, J. ja Spence, H. 1995. Clean energy from abandoned mines at Springhill, Nova Scotia. *Energy Resources*, volume 17, s. 93-106.

Kauppi, P., Räisänen, M-L. ja Myllyoja, S. (toim.) 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristökeskus.

Korhonen, J. 2002. Suomen vesistöjen lämpötilaolot 1900-luvulla. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. Suomen ympäristö, 566, 116 s.

Kukkonen, I., 1986. Menneisyyden ilmastomuutosten vaikutus kallion lämpötilaan ja lämpötilagradienttiin Suomessa. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, Tiedonanto YST-51, 70(+21) s.

Penttinen, P., 2009. Teollisuuden paineilmaenergia-analyyseissä havaittujen säästötoimenpiteiden toteutusaste ja saavutettu säästö. Teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan laitos. Diplomityö. 121 s + liitteet 31 s.

Rodriguez, R. ja Diaz, M. 2009. Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method. *Renewable energy*, volume 34, s. 1716-1725.

Self, S., Reddy, B. ja Rosen, M. 2013. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied energy*, volume 10, s. 341-348.

Wolkersdorfer, C., 2008. Water management at abandoned underground mines. 465 s. ISBN 978-3-540-77331-3