

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Patrick Yliluoto

**SELVITYS JA TEKNINEN
VERTAILU SUOMEEN
RAKENNETUISTA JA
RAKENTEILLA OLEVISTA
LUOLALÄMPÖVARASTOISTA**

Patrick Yliluoto

SELVITYS JA TEKNINEN VERTAILU SUOMEEN RAKENNETUISTA JA RAKENTEILLA OLEVISTA LUOLALÄMPÖVARASTOISTA

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää ja teknisesti vertailla Suomeen rakennettuja ja rakenteilla olevia luolalämpövarastoja (Rock Cavern Thermal Energy Storage, CTES). Tavoitteena oli koostaa aineisto Suomen luolalämpövarastoista ja tarkastella luolalämpövarastoiden yleispiirteitä, toimintaprosessia, teknisiä ominaisuuksia sekä kallioperän ominaisuuksia.

Tutkimusaineistoa kerättiin lähdeaineistoja ja asiantuntijahaastatteluja käyttämällä. Työ on aineistolähtöinen ja ohjautunut sen mukaan, kuinka lähdeaineistoa on ollut saatavilla tutkimustyön aikana. Asiantuntijahaastatteluita on tehty jokaiseen Suomen CTES-kohteeseen niin rakennettuihin kuin rakenteilla oleviinkin.

Luolalämpövarastot ovat maanalaisia lämpöenergian kausivarastoja, jotka on sijoitettu pääasiassa olemassa oleviin kallioluoliin. Varastojen tarkoituksena on varata suuri määrä lämpöenergiaa, jota hyödynnetään lämmöntuotannossa kulutushuippujen tasaamiseksi. Varastot kykenevät hyödyntämään lämpöenergiaa muun muassa hukkalämmöistä, uusiutuvan energian lähteistä ja teollisuudesta. Luolalämpövaraston toimintaan vaikuttavat muun muassa varastomateriaalina veden lämpötilakerrostuneisuus, lämpövaraston hukkalämmöt, varaston korkeus–leveyssuhde sekä lämpöisemmän ja viileämmän veden prosessointi.

Selvityksen perusteella Suomessa on toiminnassa kolme luolalämpövarastoa, ja kaksi muuta on rakenteilla, joista rakenteilla olevat luolalämpövarastot ovat valmistumassa noin 2020-luvun puolessavälissä. Luolalämpövarastot sijoittuvat Ouluun, Vaasaan, Vantaalle sekä Helsinkiin. Näistä Oulun CTES on ensimmäiseksi otettu käyttöön. Vantaalle suunnitella oleva maailman suurin CTES poikkeaa muista luolalämpövarastoista erityisesti korkean toimintalämpötilan vuoksi niin rakennettuihin luolalämpövarastoihin kuin rakenteilla olevaan Helsingin Kruunuvuoren rannan CTES:ään verrattuna.

ASIASANAT:

Luolalämpövarasto (CTES), Maanalainen lämpöenergian varastointi, Tuntuvan lämpöenergian varastointi, Lämpöenergian kausivarastointi, Kaukolämpöverkko

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and environment engineering

2022 | 57 pages, 1 page in appendices

Patrick Yliluoto

SURVEY AND TECHNICAL COMPARISON OF ROCK CAVERN THERMAL ENERGY STORAGES BUILT AND UNDER CONSTRUCTION IN FINLAND

The purpose of this thesis was to survey and technically compare the rock cavern thermal energy storages (CTES) built as well as under construction in Finland. The aim was to compile material from Finland's CTESs and to examine the general features, operating process, technical properties and bedrock properties of the systems.

In this thesis, research data was collected using source material and expert interviews. The thesis was material-driven and guided according to how the source material was available during the research process. Expert interviews were conducted at every site in Finland's CTESs, both built and ones under construction.

CTESs are underground seasonal thermal energy storages that are mainly located in existing rock caves. The purpose of the CTES is to reserve a large amount of thermal energy, which is then used in heat production to even out peak consumption. The CTESs are able to utilize thermal energy from waste heat, renewable energy sources and industry, among other things. The operation of the CTES is influenced by the thermal stratification of the storage material (water), thermal losses, height-width ratio, and the processing of warmer and cooler water, among other things.

According to the survey, three CTESs are in operational in Finland, and two others are under construction. Those CTESs that are under construction are expected to be completed around the mid-2020s. The CTESs are located in Oulu, Vaasa, Vantaa and Helsinki. Out of these, the CTES in Oulu was commissioned first. The CTES planned in Vantaa is the world's largest and has the highest operating temperature compared to other CTES's in Finland, which are built or under construction.

KEYWORDS:

Rock Cavern Thermal Energy Storage (CTES), Underground Thermal Energy Storage (UTES), Sensible Heat Storage (SHS), Seasonal Thermal Energy Storage (STES), District Heating Network

SISÄLTÖ

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	7
1 JOHDANTO	9
2 LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI	11
2.1 Lämpöenergian varastointimenetelmät	13
2.1.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi	13
2.1.2 Latentin lämpöenergian varastointi	15
2.1.3 Termokemiallisen lämpöenergian varastointi	17
2.2 Kausivarastointiin liittyviä teknologioita	18
2.2.1 Pohjavesilämpövarasto (ATES)	18
2.2.2 Porareikälämpövarasto (BTES)	19
2.2.3 Faasimuunnosmateriaalien energian varastointi (PCMES)	19
2.2.4 Vesiallaslämpövarasto (PTES)	20
2.2.5 Säiliölämpövarasto (TTES)	20
3 LUOLALÄMPÖVARASTO (CTES)	21
3.1 Luolalämpövarastoja Ruotsista	22
3.2 Maankamaran ominaisuuksia	23
3.3 Vesi varastomateriaalina	25
3.3.1 Veden ominaisuuksia	25
3.3.2 Lämpötilakerrostuneisuus ja hukkalämpö	27
3.4 Korkeus–leveyssuhde ja lämpötilakerrostuminen	28
3.5 Varastojärjestelmän prosessikuvaus	30
3.6 Varastojärjestelmään liittyviä laskentamenetelmiä	31
3.7 Mahdolliset epäpuhtaudet ja niiden ehkäiseminen	32
3.8 Lämpöenergian saanti ja käyttö	33
4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA HAASTATTELUT	34
4.1 Aineisto	34
4.2 Asiantuntijahaastattelu	35
4.2.1 Asiantuntijahaastatteluiden aineistot	35
5 SELVITYS SUOMEN LUOLALÄMPÖVARASTOISTA	38
5.1 CASE Helsingin Kruunuvuorenranta	38

5.2 CASE Helsingin Mustikkamaa	40
5.3 CASE Oulu	42
5.4 CASE Vaasan Vaskiluoto	44
5.5 CASE Vantaan Kuusikonmäki	46
6 TEKNINEN VERTAILU	49
7 YHTEENVETO	52
LÄHTEET	54

LIITTEET

Liite 1. Luolalämpövarastojen sijainnit Suomessa.

KAAVAT

Kaava 1. Varastomateriaalin lämpökapasiteetin laskentakaava (Cabeza 2014, 3).	14
Kaava 2. Varastoituneen lämpöenergia määrä LHS-järjestelmässä (Cabeza 2014, 7).	16
Kaava 3. Maankamaran keskilämpötilan määrittäminen (GTK 2019, 52).	23
Kaava 4. Tilavuuslämpökapasiteetin laskentakaava (GTK 2019, 60).	24
Kaava 5. Termisen diffusiviteetin laskentakaava (GTK 2019, 60).	24
Kaava 6. Luolalämpövaraston korkeus–leveysuhde	29
Kaava 7. Luolalämpövaraston teoreettinen kapasiteetti (Viksten 2018, 4; 23).	31
Kaava 8. Luolalämpövaraston teho.	31
Kaava 9. Luolalämpövaraston hyötysuhde (Berglund 2020, 6).	32

KUVAT

Kuva 1. Luolalämpövarastojen sijainnit Ruotsissa (Hellström 2015).	22
Kuva 2. Ruotsin Lyckebon luolalämpövaraston pohjapiirustus (Park ym. 2013, 202).	29
Kuva 3. Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövarasto (Helen Oy 2018).	39
Kuva 4. Helsingin Mustikkamaan luolalämpövarasto (Arponen 2018).	41
Kuva 5. Perspektiivikaavio Oulun luolalämpövarastosta (Ritola & Sipilä 1989, 3).	43
Kuva 6. Vaasan Vaskiluodon luolalämpövarasto (EPV Energia Oy 2020).	45
Kuva 7. Vantaan Kuusikonmäen alustava hahmotelma luolalämpövarastosta (Vantaan Energia n.d).	47

KUVIOT

Kuvio 1. TES-järjestelmän varastointisykli (Cabeza 2014, 1).	12
Kuvio 2. Veden tiheys lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 33).	26
Kuvio 3. Veden lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 34).	26
Kuvio 4. Veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 34).	26
Kuvio 5. Veden kinemaattinen viskositeetti lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 33).	27
Kuvio 6. Veden lämpötilakerrostuminen luolalämpövarastossa (Park ym. 2014a, 173).	27
Kuvio 7. Lämpötilakerrostuneisuuteen vaikuttavat tekijät (Park ym. 2014a, 172).	28
Kuvio 8. Luolalämpövarasto (CTES) (Nordell 2000, 6).	30

TAULUKOT

Taulukko 1. Tyypillisimmät materiaalit tuntuvan lämpöenergian varastoinnissa (Cabeza 2014, 6).	14
Taulukko 2. Latentin lämpöenergian varastoinnissa tyypillisimmät käytetyt materiaalit (Cabeza 2014, 7).	16
Taulukko 3. Mittaustuloksia kivilajeittain Helsingistä ja Suomesta (GTK 2019, 58; 60).	24
Taulukko 4. Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).	40
Taulukko 5. Helsingin Mustikkamaan luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).	42
Taulukko 6. Oulun luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).	44
Taulukko 7. Vaasan Vaskiluodon luolalämpövaraston kallioperän kivilaji ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).	46
Taulukko 8. Vantaan Kuusikonmäen luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).	48
Taulukko 9. Luolalämpövarastoiden tekninen ja kallioperän kivilajityyppien vertailu kohteittain.	50

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit	Selite	Yksikkö
Δ	muutos	[-]
CO ₂	hiilidioksidi	[-]
Q	lämmön määrä	[J]
m	massa	[kg]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
T	lämpötila	[°C]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
C	tilavuuslämpökapasiteetti	[MJ/m ³ K]
h	faasimuunnoksen entalpia	[J/kg]
q	geoterminen lämpövuoto maanpinnalla	[W/m ²]
z	syvyys	[m]
k	maankamaran lämmönjohtavuus	[W/mK]
T_0	maankamaran keskilämpötila	[°C]
α	terminen diffusiviteetti	[m ² /s]
E_c	kapasiteetti	[kWh]
$E_{discharge}$	puretun energian määrä	[kWh]
E_{charge}	ladatun energian määrä	[kWh]
V	tilavuus	[m ³]
Φ	teho	[kW]
η	hyötysuhde	[-]
t	aika	[h]

Lyhenteet

ATES	Aquifer Thermal Energy Storage, pohjavesilämpövarasto (Fleuchaus ym. 2018, 861)
BTES	Borehole Thermal Energy Storage, porareikälämpövarasto (Fleuchaus ym. 2018, 861)
CHC	Combined Heating and Cooling (Helen Oy 2018)
CHP	Combined Heat and Power (CORDIS 1999)
CTES	Rock Cavern Thermal Energy Storage, luolalämpövarasto (Park ym. 2014b, 142)
GTK	Geologian tutkimuskeskus (GTK 2019, 3)
LHS	Latent Heat Storage, latentin lämpöenergian varastointi (Cabeza 2014, 3)
PCM	Phase Change Material, faasimuutosmateriaali (Cabeza 2014, 4)
PCMES	Phase Change Material Energy Storage, faasimuutosmateriaalin energian varastointi (Lautkankare ym. 2020, 8)
PTES	Pit Thermal Energy Storage, allaslämpövarasto (Yang ym. 2021, 5)
SHS	Sensible Heat Storage, tuntuvan lämpöenergian varastointi (Cabeza 2014, 3)
STES	Seasonal Thermal Energy Storage, lämpöenergian kausivarasto (Yang ym. 2021, 1)
TCM	Thermo-Chemical Material, termokemiallinen materiaali (Devrim ym. 2015, 357)
TES	Thermal Energy Storage, lämpöenergian varasto (Park ym. 2013, 201)
THS	Thermochemical Heat Storage, termokemiallisen lämpöenergian varastointi (Cabeza 2014, 3)
TTES	Tank Thermal Energy Storage, säiliölämpövarasto (Yang ym. 2021, 5)
UTES	Underground Thermal Energy Storage, maanalainen lämpöenergian varasto (Park ym. 2013, 201)
VECTES	Vantaa Energy Cavern Thermal Energy Storage (Vantaan Energia Oy 2021a, 2)

1 JOHDANTO

Energian kysynnän lisääntyvästä kasvusta ja ilmastonmuutoksen aiheuttamasta päästöjen vähentämisen tarpeesta johtuen energian varastointi on yksi relevanteista teknologisista ratkaisuista, joilla pystytään alentamaan päästöjä sekä kasvattamaan energiajärjestelmien tehokkuutta ja luotettavuutta. Energian varastointijärjestelmien pääasiallinen tehtävä on energian kerryttäminen ja jakelu tasapainottaen kysynnän ja tuotannon eroa. Tämän lisäksi varastointijärjestelmät mahdollistavat tehokkaamman uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämisen. Luolalämpövarasto on yksi energian varastointijärjestelmien ratkaisuista, joilla pyritään vastaamaan energiajärjestelmiin ja ilmastonmuutokseen kohdistuviin haasteisiin.

Lämpöenergian kausivarastointi luolalämpövarastoihin on aloitettu Suomessa arviolta 1990-luvun lopulla ja kiinnostus teknologian käyttöönottoon on ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi ollut selvässä kasvussa 2020-luvulla. Suomessa on käyttöönotettu kaksi luolalämpövarastojärjestelmää 2020-luvun alkupuolella ja kahden seuraavan järjestelmän käyttöönotto on odotettavissa vuosikymmenen puolenvälin tienoilla. Uusien varastojen myötä Suomessa on yhteensä viisi eri luolalämpövarastojärjestelmää, jotka sijaitsevat Oulussa, Vaasassa, Vantaalla ja kaksi Helsingissä.

Kustannuksellisista syistä luolalämpövarastot ovat pääasiallisesti sijoitettu entisiin öljyvarastoihin, jolloin on pystytty hyödyntämään olemassa olevaa tilaa sen sijaan, että olisi louhittu uusi tila kallioperään. Kallioluolissa sijaitsevien öljyvarastojen alkuperäiskäyttötarkoituksen päätyttyä kallioluolat on täytetty vedellä, jossa kallioperä toimii myös eristeenä maanalaiselle lämpöenergian kausivarastoinnille. Kallioperässä sijaitsevien luolien tilavuuden suuruusluokka lämpöenergian varastoinnin näkökulmasta on niin suuri, että puhutaan tuntuvan lämpöenergian varastointimenetelmästä. Luolalämpövarastoissa varastomateriaalina vesi on yleisimmin käytetty sekä kustannustaloudellisin.

Luolalämpövaraston toimintaan vaikuttavat muun muassa varastomateriaalin lämpötilakerrostuneisuus, lämpövaraston hukkalämmöt, varaston korkeus–leveyssuhde sekä lämpöisemmän ja viileämmän veden prosessointi. Järjestelmää operoitaessa lämpötilakerrostuneisuuden jakautuminen ja ylläpitäminen latauksen, purun ja varastoinnin aikana on tärkeää järjestelmän suorituskyvyn kannalta.

Työssä selvitetään ja teknisesti vertaillaan Suomeen rakennettuja ja rakenteilla olevia luolalämpövarastoja sekä taustoitetaan tutkimusaihetta lähdeaineistoilla, jotka käsittelevät lämpöenergian varastointia ja menetelmiä, kausivarastointiin liittyviä teknologioita sekä luolalämpövarastointia. Taustoituksessa käsitellään tarkemmin luolalämpövarastointiin liittyviä yleispiirteitä, teknisiä ominaisuuksia, toimintaprosessia, varastomateriaalina veden ominaisuuksia, laskentamenetelmiä sekä ympäröivää kallioperää. Selvityksessä kootaan luolalämpövarastoihin liittyvää tietoa yleisellä ja teknisellä tasolla. Teknisessä vertailussa esitetään selvitettyjen kohteiden tekniset piirteet kootusti taulukossa ja käsitellään kohteiden välisiä eroja.

2 LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI

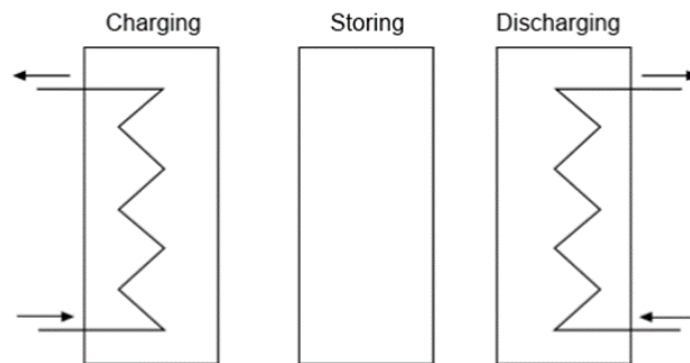
Energian varastointijärjestelmät on suunniteltu energian varastointiin ja sen jakamiseen. Kysynnän ylittäessä tuotannon määrän, energiavarastoilla pystytään tasoittamaan energian jakelun ja kysynnän eroa, hyödyntäen samalla uusiutuvia energialähteitä, kuten aurinkovoimaa ja tuulivoimaa. Lisäksi varastointimenetelmä nostaa energiajärjestelmän tehokkuutta ja alentaa hiilidioksidipäästöjä (CO₂). (IRENA 2013, 5; Sarbu & Sebarchievici 2018, 1.) Energian varastoinnin teknologiat ovat välttämättömyys energian varastoinnin tehokkaassa hyödyntämisessä. Lämpöenergian varastointi (Thermal Energy Storage, TES) on yksi mahdollisista energiavarastoinnin teknologioiden vaihtoehdoista ja sitä voidaan hyödyntää lämmitys- ja viilennysjärjestelmissä. Pääasiassa lämpöenergiavarastointien sovelluksia on käytetty ja tutkittu rakennusten lämmittämiseen, viilentämiseen ja ilmastointiin, ja varastojen tarkoitus on ollut tasapainottaa ja kaventaa eroa energian jakelun ja kysynnän välillä. (Park ym. 2013, 201.)

TES-järjestelmillä pystytään tuottamaan sekä ympäristöllistä että taloudellista hyötyä alentamalla polttoaineiden käyttöä. Järjestelmien tarkoituksena on estää lämpöenergian hukkaa varastoimalla ylimääräinen lämpöenergia myöhempää kulutusta varten. (Guruprasad ym. 2018, 348.) Koska järjestelmä mahdollistaa energian uudelleenikäytön ilman fossiilisten polttoaineiden käyttöä tai muita kasvihuonekaasuja tuottavia energialähteitä, alentaa prosessi hiilidioksidipäästöjä (Cabeza 2014, 20). Muita etuja ympäristön ja talouden lisäksi ovat energian varastoinnissa korkeampi tehokkuus energian käytössä, korkeampi järjestelmän suorituskyky ja luotettavuus (Cabeza 2014, 2).

Energian varastointia voidaan kuvata seuraavilla määritelmillä: kapasiteetti, teho, hyötysuhde, varastoinnin kesto, purun ja latauksen kesto sekä kustannukset. Kapasiteetti määrittelee varastoidun energian määrän varastossa ja on riippuvainen varaston prosessista, varastomateriaalista sekä varaston tilavuudesta. Teho määrittelee, kuinka nopeasti varastoitu energia voidaan purkaa tai ladata. Hyötysuhde on suhde, jossa varastosta puretun energian määrä jaetaan sillä energian määrällä, joka tarvitaan varaston uudelleen lataukseen. Varastoinnin kesto määrittelee, kuinka pitkään energia on varastoituneena ja kesto ilmoitetaan joko tunteina tai jopa kuukausina riippuen kehosta. Lataus ja purku määrittelevät, kuinka paljon aikaa tarvitaan järjestelmän lataukseen tai purkuun. Kustannukset voidaan määritellä varastojärjestelmän kapasiteetin (€/kWh) tai tehon (€/kW) mukaan ja on riippuvainen varastoon käytetyistä materiaaleista ja varaston

käyttöiästä aiheutuvista pääoma- ja operointikustannuksista. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 3; IRENA 2013, 5.) Työn osalta tärkeimmät lämpöenergian varastointiin liittyvät ominaispiirteet ovat kapasiteetti, teho, hyötysuhde, varastoinnin kesto sekä purun ja latauksen kesto. Työssä ei käsitellä tarkemmin kustannuksiin liittyviä seikkoja.

TES-tekniikalla varastoitavaan aineeseen kerrytetään lämpöenergiaa lämmittämällä tai viilentämällä varastomateriaalia. Varastoitunutta energiaa voidaan käyttää myöhemässä vaiheessa lämmittämiseen, viilentämiseen tai sähkön tuottamiseen. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 1.) Varastomateriaalin prosessia voidaan kuvata lataus (charging) – varastointi (storing) – purku (discharging) syklikaaviolla, jossa prosessin vaiheet ovat esitettynä vasemmalta oikealle (Cabeza 2014, 1). Prosessin kuvaus on esitettynä kuviossa 1.



Kuvio 1. TES-järjestelmän varastointisykli (Cabeza 2014, 1).

Lämpöenergian varastointitekniikat voidaan jaotella esimerkiksi lämpötilan, sijoituspaikan sekä varastointiajan mukaan. Lämpötila jakautuu matalaan-, keski- ja korkeaan lämpötilaan, sijoituspaikka jakautuu maanpäällisiin- ja maanalaisiin varastoihin ja varastointiaika jakautuu lyhyeen (tunneista–viikkoihin) tai pitkään (kuukausista–kausiin) varastointiaikaan. Lyhyitä varastointiaikoja käytetään huippukuormien hallintaan ja hyödyntämään energiakustannusten hintaeroja. Keskipitkiä tai pitkiä varastointiaikoja käytetään, kun hyödynnetään muun muassa hukkalämmön ja vuodenaikojen vaihtelun aiheuttamia kuormanvaihteluita. Maanalaiset lämpöenergian varastot (Underground Thermal Energy Storage, UTES) luokitellaan pitkäaikaisiin TES-järjestelmiin, jos varaston kapasiteetin suuruusluokka on suuri. (Alanen ym. 2003,12; Park ym. 2013, 201.)

2.1 Lämpöenergian varastointimenetelmät

Cabezan (2014, 3) mukaan lämpöenergian varastointimenetelmät voidaan jaotella kolmeen eri kategoriaan: tuntevan lämpöenergian varastointiin (Sensible Heat Storage, SHS), latentin lämpöenergian varastointiin (Latent Heat Storage, LHS) sekä termokemialliseen lämpöenergian varastointiin (Thermochemical Heat Storage, THS). Työssä tarkastellaan laajemmin tuntevan lämpöenergian varastointia. Lisäksi latentin lämpöenergian varastointia tarkastellaan vertailun vuoksi laajemmin.

2.1.1 Tuntevan lämpöenergian varastointi

Tuntevan lämpöenergian varastointi on yksinkertaisin tapa varastoida energiaa lämmitämällä tai viilentämällä nestemäistä tai kiinteää varastomateriaalia. Lisäksi SHS-järjestelmä on kolmesta varastointimenetelmästä yleisin ja varastomateriaalina vesi on yleisimmin käytetty sekä kustannustaloudellisin. Varastomateriaaleina voidaan käyttää veden lisäksi muun muassa hiekkaa, savea, sulaa suolaa, kiviä, betoniharkkoja, lämpööljyä tai nestemäistä metallia. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 5; Bortolotti 2017, 94; Guruprasad ym. 2018, 349–352.)

Cabezan (2014, 31) mukaan varastomateriaalilla tulee olla korkea ominaislämpökapasiteetti ja korkea tiheys, jotta saavutetaan korkea tilavuuslämpökapasiteetti. Taulukossa 1 on annettu tarkemmat lukuarvot yleisimpien varastomateriaalien tiheyksistä ρ , ominaislämpökapasiteeteista c_p sekä tilavuuslämpökapasiteeteista C . Taulukosta havaitaan, että vesi varastomateriaalina sisältää korkeimman ominaislämpökapasiteetin ja tilavuuslämpökapasiteetin.

Taulukko 1. Tyypillisimmät materiaalit tuntevan lämpöenergian varastoinnissa (Cabeza 2014, 6).

Materiaali	ρ (kg/m^3)	c_p (J/kgK)	C (MJ/m^3K)
Alumiini	2710	896	2,43
Betoni	2000	880	1,76
Hiekkakivi	2200	712	1,57
Lasi	2710	837	2,27
Magnetiitti	5177	752	3,89
Puu	700	2390	1,67
Rauta	7900	452	3,57
Savi	1458	879	1,28
Sorainen maa	2050	1840	3,77
Teräs	7840	465	3,68
Tiili	1800	837	1,51
Vesi	998	4182	4,17

SHS-järjestelmä hyödyntää varastomateriaalin lämpökapasiteettia ja lämpötilan muutosta lämpöakun latauksessa ja purkauksessa. Varastoituneen lämmön määrä riippuu varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetista, lämpötilan muutoksesta ja varastomateriaalin määrästä. Lämpöenergian absorptioprosessin aikana varastomateriaaleihin kohdistuu lämpötilan kohoamista, mutta ei olomuodon muutosta. Varastoituneen lämmön määrä ilmaistaan jouleina J , joka on suoraan verrannollinen varastomateriaalin massa, ominaislämpökapasiteettiin ja lämpötilan muutokseen. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 5; Guruprasad ym. 2018, 349.)

Varastomateriaalin lämpökapasiteetin määrä lasketaan kaavalla 1, jossa Q [J] on materiaaliin varastoituneen lämmön määrä, m [kg] on varastomateriaalin massa, c_p [J/kgK] on varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti ja T [K] on lämpötilanmuutos (Cabeza 2014, 3).

$$Q = mc_p\Delta T$$

Kaava 1. Varastomateriaalin lämpökapasiteetin laskentakaava (Cabeza 2014, 3).

SHS-järjestelmät voidaan jaotella lyhyen, keskipitkän tai pitkän aikavälin varastoihin. Lyhyen aikavälin varastot luetaan rakennus- ja prosessilämpövarastoihin, jotka voivat olla

esimerkiksi asuintalojen kuumavesivaraajia, joilla tasataan kulutushuippuja (Alanen ym. 2003, 22; IRENA 2020, 54.) Keskipitkän aikavälin varastot luetaan alueellisiin ja keskitettyihin järjestelmiin, jossa lämpövarastoa hyödynnetään lämmön kysynnän hallintaan. Lämpövarastot voivat olla osana kaukolämpöjärjestelmää, toimia tehoreservinä tuotantohäiriöissä, toimia vesireservinä putkivauriutilanteissa sekä toimia paisuntasäiliönä verkoston paineen säädössä. (Alanen ym. 2003, 30.) Pitkän aikavälin varastot luetaan suuriin maanalaisiin lämpövarastoihin, joiden varastointijakson kesto on kuukausista kausiin. Suuret järjestelmät vaativat suuria varastointikapasiteetteja ja varastointijärjestelmiä. Kuitenkin suurten järjestelmien etuna ovat pienet lämpöhäviöt. Lämpöhäviöitä tapahtuu konduktiolla eli johtumisella, jossa lämmönjohtavuus $k \sim 1 - 5 (W/mK)$ tai konvektiolla. Pitkän aikavälin varastotyypit voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan: virtausvarastoihin, johtumiseen perustuviin varastoihin sekä sekoitettuihin varastoihin. (Alanen ym. 2003, 42; Park ym. 2013, 201.)

Virtausvarastot luokitellaan kaivantovarastoon tai kallioon louhittuun luolaan. Johtumiseen perustuva varasto voi olla pysty- tai vaakasuora lämmönvaihdin maaperässä tai kalliossa, jolloin kyseessä on putki- tai porareikävarasto. Sekoitettu varasto voi olla pohjavesiesiintymä tai sora-vesikaivanto, jossa varastoitavana väliaineena on maata ja vettä. (Alanen ym. 2003, 42.) Työssä keskitytään edellä mainituista varastointityypeistä virtausvarastoon ja sen alaluokkaan kallioon louhittuun luolavarastoon (luolalämpövarasto, CTES). Luolalämpövaraston tarkempi käsittely aloitetaan kappaleessa kolme.

2.1.2 Latentin lämpöenergian varastointi

Latentin lämpöenergian varastoinnin (Latent Heat Storage, LHS) mahdollisia materiaaleja on tutkittu jo useamman vuosikymmenen ajan ja ne voidaan jaotella lämpötila-alueen ja faasimuutosvaiheen mukaan. Lämpötila-alueen mukaan faasimuutosmateriaalit jaetaan kolmeen pääryhmään, jossa pääryhmät ovat matalan lämpötilan faasimuutosmateriaaleja ($< 15 \text{ }^\circ\text{C}$), keskilämpötilan faasimuutosmateriaaleja ($15 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$) ja korkean lämpötilan faasimuutosmateriaaleja ($> 90 \text{ }^\circ\text{C}$). Faasimuutosvaiheen mukaan faasimuutosmateriaalit jaetaan neljään pääryhmään, jossa pääryhmät ovat kaasusta–nesteeksi, kiinteästä–kaasuksi, kiinteästä–nesteeksi ja kiinteästä–kiinteäksi. (Pielichowska & Pielichowski 2014, 71.)

Useita materiaaleja on tutkittu potentiaalisena faasimuutosmateriaalina, joista vain muutama on valittu kaupallistettavaksi. Tunnetuin ja käytetyin faasimuutosmateriaali on vesi,

ja sen faasimuutoksen muotoa jäätä, on käytetty kylmävarastoissa jo pitkän ajan. Yleisimpiä materiaaleja, joita on käytetty faasimuutosmateriaaleina, on esitetty taulukossa 2. Taulukko sisältää varastomateriaalin sulamislämpötilan ja sulamisentalpian tilavuuden suhteen. (Cabeza 2014, 7.)

Taulukko 2. Latentin lämpöenergian varastoinnissa tyypillisimmät käytetyt materiaalit (Cabeza 2014, 7).

Materiaali	Sulamislämpötila (°C)	Sulamisentalpia (MJ/m ³)
Vesi-suolaliuos	-100 – 0	200 – 300
Vesi	0	330
Klatraatti	-50 – 0	200 – 300
Parafiinit	-20 – 100	150 – 250
Suolahydraatit	-20 – 80	200 – 600
Sokerialkoholit	20 – 450	200 – 450
Nitraatit	120 – 300	200 – 700
Hydroksidit	150 – 400	500 – 700
Kloridit	350 – 750	550 – 800
Karboniitit	400 – 800	600 – 1000
Fluoridit	700 – 900	> 1000

Varastoituneen lämpöenergian määrä LHS-järjestelmässä lasketaan kaavalla 2, jossa Q [J] on materiaaliin varastoituneen lämmön määrä, m [kg] on varastomateriaalin massa ja Δh [J/kg] on faasimuunnoksen entalpia (Cabeza 2014, 7).

$$Q = m\Delta h$$

Kaava 2. Varastoituneen lämpöenergia määrä LHS-järjestelmässä (Cabeza 2014, 7).

Pielichowskan & Pielichowskin (2014, 70) mukaan latentin lämpöenergian varastointi (LHS) on tehokkain tapa varastoida lämpöenergiaa. LHS-järjestelmä perustuu lämpöenergian absorptioon tai vapautumiseen, kun faasimuutosmateriaali prosessoidaan kiinteästä–nesteeksi tai nesteestä–kaasuksi tai päinvastoin. (Sharma ym. 2009, 320). Materiaaleja, joita käytetään LHS-järjestelmässä, kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi (Phase Change Materials, PCM). Yleensä käytetään varastomateriaalin kiinteästä–nesteeksi faasimuutosta sulattamalla ja jähmettämällä varastomateriaalia. Kun faasimuutos tapahtuu vakio- ΔT -tilassa, on tällöin mahdollista varastoida suuria lämpömääriä

pienellä lämpötilaerolla. (Cabeza 2014, 4; Alanen ym. 2003, 14.) Lisäksi LHS-järjestelmä mahdollistaa paljon suuremman varastointitiheyden kapeammalla lämpötilavaihtelulla lämmön varastoinnin ja vapauttamisen välillä, kuin SHS-järjestelmä (Pielichowskan & Pielichowskin 2014, 70).

2.1.3 Termokemiallisen lämpöenergian varastointi

Termokemiallisen lämpöenergian varastoinnin kehitysprosessi on vielä alkuvaiheessa ja suurin osa tutkimuksista on suoritettu laboratorion kaltaisissa olosuhteissa. Termokemiallisen lämpöenergian varastoinnissa lämpöenergian hukka on vähäinen, koska lämpöenergia on varastoitu ympäristön lämpötilaan. (Desai ym. 2021, 3.) Termokemiallinen energian varastointi syntyy, kun energian varastointiin käytetään kemiallista reaktiota, jossa korkea määrä energiaa on osallisena. (Cabeza 2014, 7).

Termokemiallisen lämpöenergian varastointi (Thermochemical Heat Storage, THS) on tehokkain varastointimenetelmä verrattuna SHS-järjestelmään ja LHS-järjestelmään ja lisäksi energiatihein varastointimenetelmä. Termokemiallisen lämpöenergia varastoinnissa käytettyjen termokemiallisten materiaalien (Thermo-Chemical Materials, TCM) varastointitiheys on noin 8–10 kertaa suurempi kuin SHS-järjestelmän varastomateriaaleilla ja noin kaksi kertaa suurempi kuin LHS-järjestelmän varastomateriaaleilla. (Devrim ym. 2015, 357.)

THS-järjestelmä käyttää termokemiallisia materiaaleja, jotka varastoivat ja vapauttavat lämpöä palautuvilla absorptio- ja vapautusreaktioprosesseilla. Absorptio on termokemiallinen reaktio, jolla pystytään varastoimaan lämpöä tai kylmää sekä säätämään kosteuden tasoa. THS prosessin periaate on samanlainen kuin lämpöenergian varastoinnissa eli varastossa tapahtuu lataus–purku syklejä. Tämä prosessi kuitenkin eroaa aikaisemmasta SHS-järjestelmästä. Latausprosessissa lämpöä siirretään materiaaliin, jolloin materiaali jakautuu kahdeksi eri faasiksi. Materiaalista muodostuneet faasit erotetaan ja varastoidaan purkuprosessia varten. Purkuprosessissa faasit sekoitetaan sopivassa lämpötilassa ja paineessa, jolloin energiaa vapautuu. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 22; Guruprasad ym. 2018, 359; IRENA 2013, 10.)

2.2 Kausivarastointiin liittyviä teknologioita

Kausivarastoinnin pääasiallinen tehtävä on tasapainottaa lämmön jakelun ja kysynnän eroa. (Doczekal 2019, 4). Kausivarastoinnissa energiavaraston tehtävänä on energian varastoiminen tai purkaminen, missä syklin pituus on usein yksi vuosi tai vaihtoehtoisesti jokin muu mahdollinen ajanjakso (Lautkankare ym.2020, 4). Kausivarastointi (Seasonal Thermal Energy Storage, STES) voidaan jaotella maanalaisiin varastojärjestelmiin (Underground Thermal Energy Storage, UTES) ja muihin varastojärjestelmiin. Maanalaisiin varastojärjestelmiin luokitellaan pohjavesilämpövarasto (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES), porareikälämpövarasto (Borehole Thermal Energy Storage, BTES), luolalämpövarasto (Rock Cavern Thermal Energy Storage, CTES) ja vesiallasvarasto (Pit Thermal Energy Storage, PTES). Muihin varastojärjestelmiin voidaan luokitella vesisäiliövarasto (Tank Thermal Energy Storage, TTES) sekä faasimuunnosmateriaalin energian varastointi (Phase Change Materials Energy Storage, PCMES). (Lautkankare ym. 2020, 3; Sarbu & Sebarchievici 2018, 8.) Työssä, edellä mainituista maanalaisista lämpöenergian kausivarastointiteknologioista, käsitellään tarkemmin luolalämpövarastointia (CTES) kappaleessa kolme.

2.2.1 Pohjavesilämpövarasto (ATES)

Avoimen kierron järjestelmissä, kuten pohjavesilämpövarastoissa (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES) lämpöä ja kylmää säilytetään maan pinnanalla väliaikaisesti pohjavedessä, josta lämpö tai kylmä otetaan varastosta tai siirretään varastoon. ATES-järjestelmät soveltuvat erinomaisesti suuren luokan käyttökohteiksi, koska järjestelmien varastokapasiteetti on korkein maanalaisista varastointiteknologioista. (Fleuchaus ym. 2018, 861–862.). Järjestelmä sisältää yhden tai useamman kaivon pohjavesikerroksessa, lämmön latausta tai purkua varten. Järjestelmän tehtävä on varastoida ylijäämä-lämpöä ja -kylmää pohjaveteen, joka toimii lämmön varaajana ja siirtäjänä. Varastoitu lämmin tai kylmä ilma siirretään varaston kohteeseen. Järjestelmiä voidaan integroida useisiin sovelluksiin ja niiden hyödyntäminen sekä lyhyt- että pitkäaikaisissa varastoinneissa on mahdollista. Kuitenkin hydrogeologiset olosuhteet tulee huomioida ATES-järjestelmiä asennettaessa. Maailmanlaajuisesti melkein kaikki ATES-järjestelmät operoivat alhaisessa lämpötilassa (< 25 °C) ja järjestelmiä on alettu muuttamaan alueellisemmiksi. (Yang ym. 2021, 6.)

2.2.2 Porareikälämpövarasto (BTES)

Suljetun kierron järjestelmät, kuten porareikälämpövarastot (Borehole Thermal Energy Storage, BTES) ovat vähemmän alttiita maaperän läpäisevyyden ja huokoisuuden aiheuttamille virtauksille kuin pohjavesilämpövarastot. (Fleuchaus ym. 2018, 861). BTES-järjestelmän tehtävänä on varastoida ylijäämälämpöä ja -kylmää maaperään. Varastointi tapahtuu porareikien tai paalujen avulla maaperään. Porareikien syvyys vaihtelee karkeasti noin 30 metristä aina yli 2000 metriin asti. Järjestelmät voidaan luokitella regeneroitaviksi energiakaivoiksi, joissa on vain yksi tai muutama porareikä tai lämpövarastoksi, mikäli porareikiä on riittävästi ja riittävän tiheään asennettuna (yleensä yli 10 reikää ja reikien välinen etäisyys 2–5 metriä) ja reikiin tai kenttään ladataan ylijäämälämpöä. Lämpö varastoidaan porareikään tai paaluun lämmönsiirtimien avulla, jonka jälkeen energia saadaan käyttöön. Kuitenkin järjestelmän tehokkuus on alhainen ensimmäisinä vuosina ja nousee, kun maaperä on lämmennyt porareikien läheisyydessä (3–4 vuotta). Järjestelmien soveltuvuus on laaja ja ne soveltuvat sekä pieniin että suuriin kohteisiin. Lisäksi ne voidaan integroida lämpöpumppuun sekä käyttää lämmityksessä ja jäähdytyksessä. (Lautkankare ym. 2020, 6; Yang ym. 2021, 6.)

2.2.3 Faasimuunnosmateriaalien energian varastointi (PCMES)

Faasimuunnosmateriaaleja hyödynnetään sekä tuntuvan että latentin lämpöenergian varastoinnin menetelmissä. Näistä latentin lämpöenergian varastointi tuottaa suuremman energian varastointitiheyden pienemmällä lämpötilaerolla lämmön varastoinnin ja luovuttamisen välillä kuin tuntuvan lämpöenergian varastointi. (Pielichowska & Pielichowski 2014, 67–68.) SHS-menetelmässä lämpöenergian määrää kasvatetaan nostamalla kiinteän tai nestemäisen materiaalin lämpötilaa. Menetelmä perustuu materiaalin lämpökapasiteetin ja lämpötilan muutokseen lataus–purkuprosessin aikana. LHS-menetelmä perustuu varastomateriaalin lämmön absorptioon tai vapautumiseen, kun materiaaliin kohdistuu faasimuutos kiinteästä–kiinteäksi, kiinteästä–nesteeksi, nesteestä–kaasuksi tai päinvastoin. (Pielichowska & Pielichowski 2014, 70.) Faasimuunnosmateriaaleja ja siihen liittyviä prosesseja on käsitelty laajemmin edellä kappaleessa 2.1.2.

2.2.4 Vesiallaslämpövarasto (PTES)

Vesiallaslämpövarasto (Pit Thermal Energy Storage, PTES) on kehittynyt teknologia SHS-menetelmänä korkean energiatiheuden ja järjestelmätehokkuuden vuoksi. PTES-järjestelmän toiminnan kannalta yksi tärkeimmistä tekijöistä on tehokas eristys, jolla kyetään estämään järjestelmän hukkalämpöjä (Yang ym. 2021, 5). PTES-järjestelmät sopivat kausivarastointiin ja toimivat lämpötila-alueella 5–95 °C. Järjestelmän varastomateriaalina voi olla joko vesi tai savi–vesi yhdistelmä. Altaiden varastointikapasiteetti on tyypillisesti satoja tuhansia kuutioita ja varastomateriaali lämmitetään sekä auringon avulla suoraan että aurinkokeräimien avulla välillisesti. Järjestelmän etuja ovat korkea lataus–purku kapasiteetti ja alhaiset investointikustannukset. Haittapuolena on järjestelmän vaatima suuri pinta-ala ja tämän vuoksi esimerkiksi Itävallassa on harkittu varastojen sijoittamista käyttämättömälle maalle moottoritien varsille. (Doczekal 2019, 8; Lautkan-kare ym. 2020, 7.)

2.2.5 Säiliölämpövarasto (TTES)

Lämpöenergian varastointi vesisäiliöön (Tank Thermal Energy Storage, TTES) on kehittynyt ja laajasti kaupallistettu kustannustehokas teknologia, joka soveltuu niin pienen kuin ison kapasiteetin omaaviin järjestelmiin. TTES-järjestelmät soveltuvat myös niin lyhytaikaisiin kuin pidempiaikaisiin varastointeihin. Kuitenkin järjestelmä kohtaa haasteita hukkalämmön osalta, mitä suuremaksi säiliön tilavuus kasvaa. Hukkalämpöjä tapahtuu vesikerrosten sekoittumisessa ja aineiden välisessä johtumisessa. Hukkalämpöjä voidaan ehkäistä optimaalisemmalla vesikerrostuneisuudella ja tehokkailla lämmöneristyksillä. Järjestelmän operointiperiaate on vastaavanlainen luolalämpövarastoihin verrattuna eli lämpöenergia tuodaan säiliöön tai poistetaan säiliöstä pumppaamalla vesi ulos säiliöstä tai sisään säiliöön. (Yang ym. 2021, 5; Sarbu & Sebarchievici 2018, 5, 8.)

3 LUOLALÄMPÖVARASTO (CTES)

Luolalämpövarastot (Rock Cavern Thermal Energy Storage, CTES) sijoitetaan maaperään joko jo olemassa oleviin luoliin tai luola louhitaan lämpöenergian varastointia varten. Jo olemassa olevat luolat voivat olla entisiä kaivoksia tai muita louhittuja tiloja, joilla ei ole enää alkuperäiskäyttötarvetta. Suuren kokoluokan luolalämpövarastot mahdollistavat lämpöenergiavarastoinnin hyötykäytön, turvallisen käytön ja taloudellisen käytön. CTES-järjestelmät luokitellaan tuntuvan lämpöenergian varastoihin (SHS) ja niitä voidaan hyödyntää kausivarastoinnissa (STES). Järjestelmissä varastomateriaalina käytetään yleisesti vettä, koska se on ominaislämpökapasiteetiltään korkea, myrkytön, laajasti saatavilla, taloudellinen sekä helppo käsitellä. Vesi varastoituu kaivettuihin luoliin tai luonnollisesti muotoutuneisiin luoliin lämpötilakerroksittain eri lämpötiloihin tiheyden mukaan. Kun suuren vesimäärän sisältävä CTES täytetään useilla tuhansilla kuutioilla vettä, on tärkeää säilyttää lämpökerrostuma lämpövarastossa. Varastoa operoidaan, niin että kuumavesi tuodaan varaston yläosaan tai viedään varaston yläosasta, ja kylmävesi otetaan varaston alaosaan tai tuodaan varaston alaosaan, pumpaamalla. Järjestelmän operointiperiaate on vastaavanlainen vesisäiliöihin (TTES) verrattuna. Koska energian lataus-purku voi tapahtua suurella teholla, tuottaa varasto suuria lämpötehoja ja järjestelmä soveltuu parhaiten kohteisiin, joissa korkeita lämpötehoja tarvitaan. (Lautkankare ym. 2020, 6; Fleuchaus ym. 2018, 861; Sarbu & Sebarchievici 2018, 8; Park ym. 2014a, 171–172.)

Luolalämpövarasto voi olla tehokkaampi suuren kokoluokan lämpöenergian varastointijärjestelmä kuin maanpäälliset lämpöenergian varastointijärjestelmät. Luolalämpövarastoa ympäröivän kallion tehtävänä on toimia lämmöneristäjänä, koska kalliolla on suhteellisen alhainen termien johtavuus. (Park ym. 2014a, 171.) Luolalämpövarastoissa kertyvät hukkalämmöt ovat huomattavasti alhaisemmat operointiaikana kuin maanpäällisissä lämpövarastoissa, koska ympäröivä kallio lämpenee ja lämpögradientti vähenee kallion ja varastomateriaalin välillä. Pitkäaikaisen varastoinnin aikana, hukkalämmön määrä CTES-järjestelmässä on vähemmän vaikutteisempi ja riippuvaisempi eristeen suorituskyvystä kuin maanpäällinen varastojärjestelmä. (Park ym. 2014b, 142.) Lämmöneristävyyden maanpinnalla lämpöenergian varastointijärjestelmissä on haastavampi toteuttaa, koska hukkalämpöön vaikuttavat myös ympäristön sääolosuhteet. Vaikka kallioluolat mahdollistavat suurten lämpöenergiamäärien varastoinnin CTES-järjestelmiin, on niiden investointikustannukset korkeat ja tämä vaikuttaa itse varastojärjestelmän mahdolliseen

toteutukseen. (Park ym. 2014a, 172.) Työssä ei tarkastella CTES-järjestelmien rakennus- ja ylläpitokustannuksia, käyttöikää eikä mahdollista lisäeristystä kalliion lisäksi.

3.1 Luolalämpövarastoja Ruotsista

Vertailun vuoksi työssä tuodaan esille Ruotsissa rakennettuja luolalämpövarastoja. Maailmanlaajuisesti CTES-järjestelmiä on vain joitakin ja niistä kaksi ensimmäistä rakennettiin Ruotsissa 1980-luvulla. Ruotsin luolalämpövarastot sijaitsevat Avestassa, Lyckeboossa ja Oxelösundissa. Avestassa sijaitseva luolalämpövarasto on tilavuudeltaan 15 000 m³ ja varasto rakennettiin polttoainelaitoksen lämmöntuotannon lyhytaikaiseksi varastoksi vuonna 1981. Lyckebon luolalämpövarasto aloitti operoinnin 1983 ja on osana Uppsalan kaukolämpöverkostoa. Sen tilavuus on noin 115 000–120 000 m³. CTES-järjestelmä on yhdistettynä aurinkoenergiajärjestelmään, joka toimii osalämmittäjänä luolalämpövaraston vedelle. Oxelösundin luolalämpövarasto muutettiin öljyvarastosta kuumavesivarastoksi vuonna 1988 varastoimaan teollisuuden ylijäämälämpöä SSAB terästehtaalta. Kuitenkin tilavuudeltaan 200 000 m³ luolalämpövarasto ei ole enää käytössä. (Nordell 2012, 3; Nordell 2000, 6.) Hornsbergin luolavarasto tilavuudeltaan 70 000 m³ on valmistunut vuonna 2009 ja sen tarkoituksena on toimia kaukokylmän päivittäisenä varastona (Hellström 2015).



Kuva 1. Luolalämpövarastojen sijainnit Ruotsissa (Hellström 2015).

3.2 Maankamaran ominaisuuksia

Suomen maanpinnan vuosittainen keskilämpötila vaihtelee Etelä-Suomen 6–8 °C ja Pohjois-Suomen 2–3 °C välillä (SKGK 2019). Maankamaran lämpötila noin 20 metrin syvyydessä ei muutu kausittaisista lämpötilamuutoksista, joita esiintyy maanpinnalla, ja on vuosittaisen keskilämpötilan luokkaa. Kuitenkin lämpötila nousee geotermisen energian vaikutuksesta, kun mennään syvemmälle, jolloin vaikutus on noin 1,0–1,5 °C/100m. Lämpötila kasvaa, kun etäisyys maanpinnasta kasvaa ja kasvunopeuteen vaikuttavat maankamaran lämmönjohtavuus ja geoterminen lämpövuoto. Kun maankamara oletetaan homogeeniseksi, voidaan keskilämpötila laskea noin tuhannen metrin syvyyteen. (GTK 2019, 51–52.)

Maankamaran keskilämpötilan lasketaan kaavalla 3, jossa T [°C] on maankamaran lämpötila, z [m] on syvyys, T_0 [°C] on maanpinnan keskilämpötila, q [W/m²] on geoterminen lämpövuoto maanpinnalla ja k [W/mK] on maankamaran lämmönjohtavuus (GTK 2019, 51–52).

$$T_{(z)} = T_0 + \frac{q}{k}z,$$

Kaava 3. Maankamaran keskilämpötilan määrittäminen (GTK 2019, 52).

Suomessa eri kivilajien termisessä johtavuudessa on eroja. Suurimpia tekijöitä, jotka vaikuttavat kallioperän lämpöominaisuuksiin ovat kallioperän koostumus, rikkonaisuus ja pohjaveden liikkeet. Varsinkin maanalaisen lämpöenergian varastoinnin kannalta, pohjavesi ja kallioperän rikkonaisuus vaikuttavat lämmön säilymiseen varastossa, koska pohjavesi ja kallioperän rikkonaisuus tehostavat lämmön siirtymistä maankamarassa. (Ympäristöministeriö 2013, 4.)

Geologian tutkimuskeskuksen toimesta suoritettiin kivilajien ominaisuuksien mittauksia Helsingin alueella. Otetuista kivilajien näytteistä on määritetty ominaislämpökapasiteetti [c_p], lämmönjohtavuus [k] ja tiheys [ρ] laboratoriossa. Tilastollinen analyysi ei käsitä spatiaalista korrelaatiota, jolloin parametrit on oletettu vakioiksi kunkin kivilajin alueella. Lisäksi kivilajien tilavuuslämpökapasiteetti [C] ja terminen diffusiviteetti [α] on määritetty laskemalla ja laskentakaavat ovat esitettyinä jäljempänä. Taulukossa 3 edellä mainitut parametrit ovat esitettyinä kivilajityypittäin ja suluissa olevat lukuarvot viittaavat Peltoniemen & Kukkosen (1995) laatimiin koko Suomen kattavalle aineistolle laskettuja

keskiarvoja. Taulukon lukuarvot ovat keskiarvoja kaikista mittaustuloksista kivilajityypittäin. (GTK 2019, 57–58; 60.) Peltoniemen ja Kukkosen (1995) mittaustutkimus on haettavissa lähdeluettelosta.

Tilavuuslämpökapasiteetin lasketaan kaavalla 4, jossa $C [J/m^3K]$ on tilavuuslämpökapasiteetti, $\rho [kg/m^3]$ on tiheys ja $c_p [J/kgK]$ on ominaislämpökapasiteetti (GTK 2019, 60).

$$C = \rho * c_p$$

Kaava 4. Tilavuuslämpökapasiteetin laskentakaava (GTK 2019, 60).

Termisen diffusiviteetin lasketaan kaavalla 5, jossa $\alpha [m^2/s]$ on termisen diffusiviteetti, $k [W/mK]$ on lämmönjohtavuus, $\rho [kg/m^3]$ on tiheys ja $c_p [J/kgK]$ on ominaislämpökapasiteetti (GTK 2019, 60).

$$\alpha = \frac{k}{\rho * c_p}$$

Kaava 5. Termisen diffusiviteetin laskentakaava (GTK 2019, 60).

Taulukko 3. Mittaustuloksia kivilajeittain Helsingistä ja Suomesta (GTK 2019, 58; 60).

Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$C_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Amfiboliitti	2,66 (2,63)	731	2906 (2963)	2,106	1,190
Gabro	3,25 (2,71)	712	2804 (2937)	1,996	1,628
Graniitti	3,20 (3,61)	721	2640 (2670)	1,905	1,682
Grano- ja kvartsidioriitti	3,17 (3,61)	731	2675 (2699)	1,952	1,612
Kiillegneissi	2,87 (2,86)	725	2707 (2758)	1,967	1,442
Kvartsi-maasälpagneissi	3,10 (3,59)	723	2794 (2673)	2,021	1,551

Edellä mainitut parametrit kuvaavat kallion lämmönsiirto- ja lämmönvarastointiominaisuuksia. Lämmönjohtavuus kuvastaa kallion kykyä johtaa lämpöä. Mitä alhaisempi lämmönjohtavuus on, sitä heikommin lämpö johtuu kalliosta. Kallion kykyä varastoida lämpöä kuvastetaan ominais- ja tilavuuslämpökapasiteetilla. Mitä alhaisempi kallion lämpökapasiteetti on, sitä hiekommin kallio kykenee varastoimaan lämpöä. Termisen

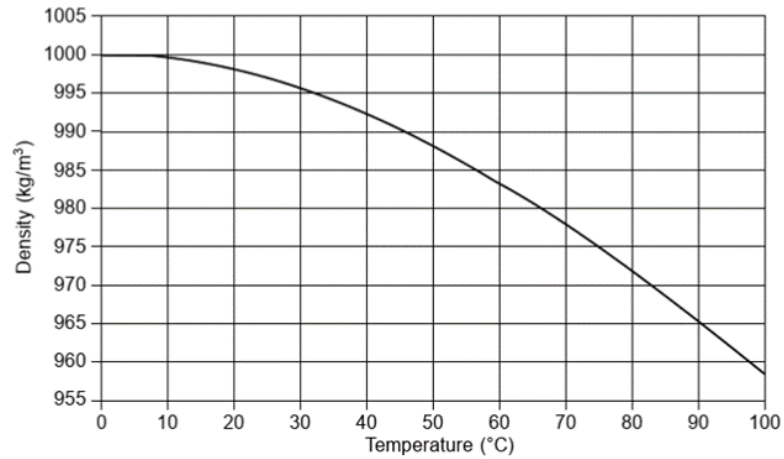
diffusiviteetti kuvastaa, kuinka nopeasti kallio reagoi lämpötilamuutoksiin. Mitä alhaisempi kallion termien diffusiviteetti, sitä hitaammin kallio reagoi lämpötilan muutokseen. (GTK 2019, 57.)

3.3 Vesi varastomateriaalina

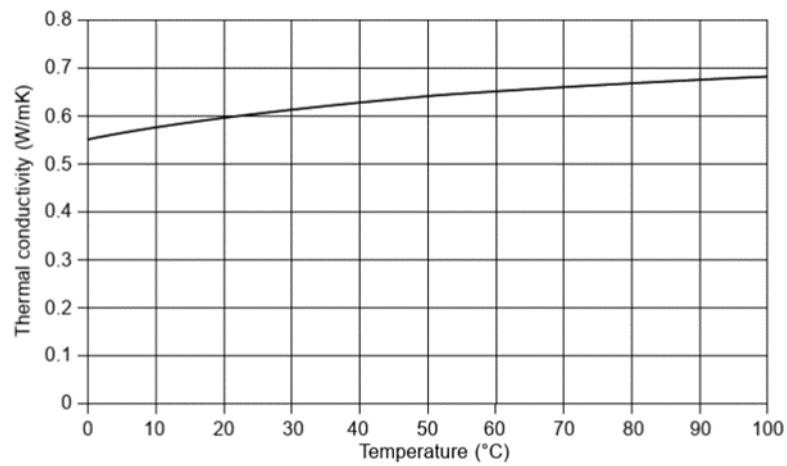
Tärkeimmät lämpöominaisuudet kuuman veden varastoinnissa ovat lämpövaraston kapasiteetti, hukkalämpö, lämpötilakerrostuminen ja lämmönsiirtokapasiteetin määrä kuumavesivarastoon sekä kuumavesivarastosta. Kuumavesilämpövaraston hukkalämmöt tulisi olla mahdollisimman alhaiset, jotta lämpövarastojärjestelmän suorituskyky ei alene merkittävästi korkean hukkalämmön vuoksi. Kuumavesilämpövarastoiden tehokkuutta voidaan kasvattaa, jos lämpötilakerrostuneisuutta kasvatetaan sekä latauksen että purun aikana. Lisäksi lämpötilakerrostuneisuus tulisi säilyttää pitkiäkin aikoja ilman lämpövaraston varastomateriaalin latausta ja purkua. (Cabeza 2014, 31–32.)

3.3.1 Veden ominaisuuksia

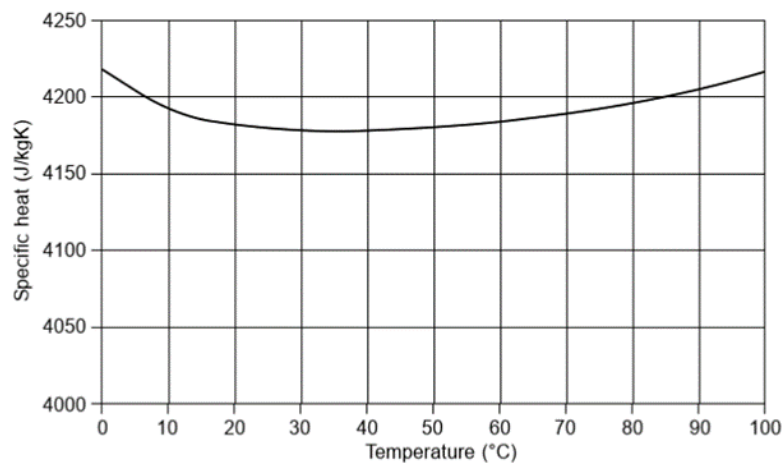
Veden ominaisuuksiin varastomateriaalina vaikuttavat muun muassa tiheys, lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja kinemaattinen viskositeetti lämpötilan funktiona. Seuraavaksi tarkastellaan veden joitakin ominaisuuksia lämpötila-alueella 0–100 °C. Veden tiheys laskee, kun veden lämpötila kohoaa (kuvio 2). Tämä aiheuttaa lämpövarastoissa lämpimämmän veden siirtymisen ylös, kun taas viileämpi vesi siirtyy alas. Veden lämmönjohtavuus kasvaa, kun veden lämpötila kohoaa (kuvio 3). Tämä aiheuttaa lämpötilaerojen tasoittumisen nopeammin lämpövaraston korkeampien lämpötilakerrosten välillä. Veden ominaislämpökapasiteetti pysyy suhteellisen vakiona lämpötilan muutoksessa 0–100 °C (kuvio 4). Veden kinemaattinen viskositeetti laskee veden lämpötilan noustessa (kuvio 5). Tämä aiheuttaa suurempaa veden liikkumista lämpövaraston korkeammassa lämpötiloissa kuin matalammassa lämpötiloissa. (Cabeza 2014, 35.)



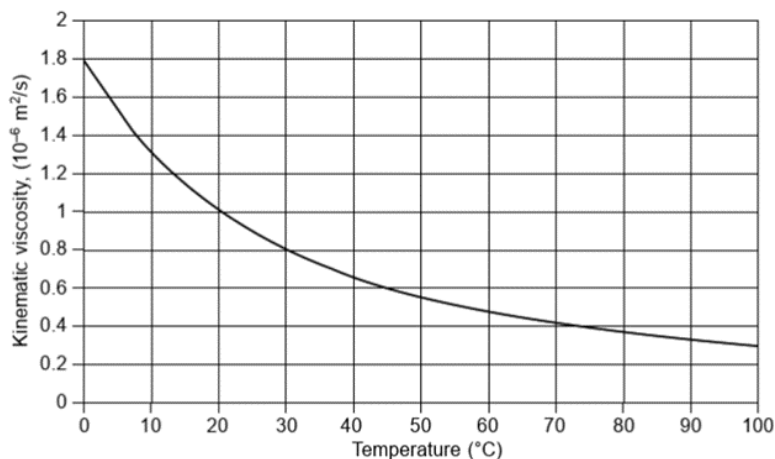
Kuvio 2. Veden tiheys lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 33).



Kuvio 3. Veden lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 34).



Kuvio 4. Veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 34).

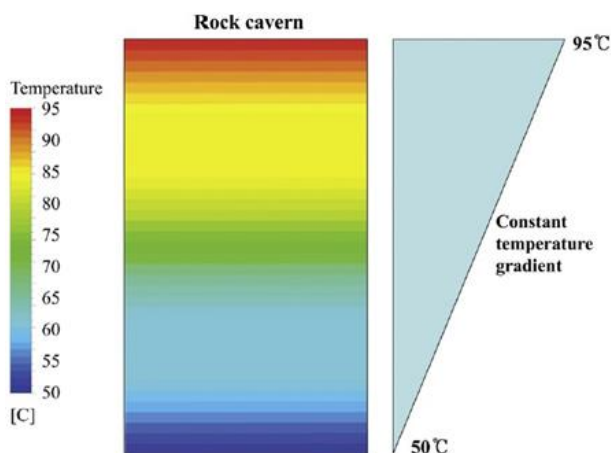


Kuvio 5. Veden kinemaattinen viskositeetti lämpötilan funktiona (Cabeza 2014, 33).

Edellä esitetyt veden ominaisuudet lämpötilan funktiona vaikuttavat luolalämpövaraston suorituskykyyn, koska veden lämpötila on kerrostunut luolalämpövarastossa. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin veden lämpötilakerrostumista ja hukkalämpöjä.

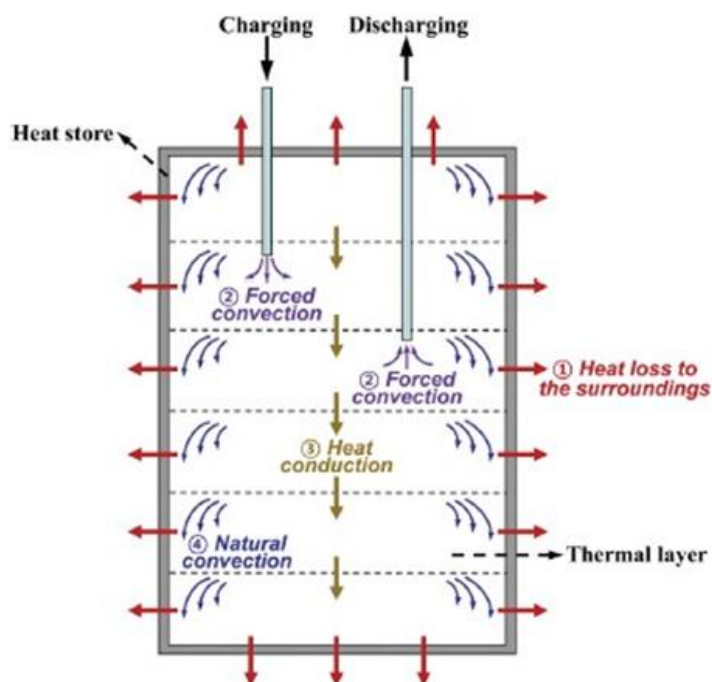
3.3.2 Lämpötilakerrostuneisuus ja hukkalämpö

Veden lämpötilakerrostuminen lämpövarastoissa tarkoittaa varastoidun veden jakautumista useaan kerrokseen lämpötilan mukaan. Kylmän ja kuuman veden tiheyden vaihteluero saa aikaan lämpötilan mukaisen kerroksisuuden, koska kylmä vesi on tiheämpää kuin lämpimämpi vesi (kuvio 6). Tästä johtuen lämpimämpi vesi kertyy varaston ylemmän osaan, kun taas viileämpi vesi kertyy varaston alempaan osaan. (Park ym. 2014a, 172.)



Kuvio 6. Veden lämpötilakerrostuminen luolalämpövarastossa (Park ym. 2014a, 173).

Luolalämpövaraston lämpötilakerroksisuuden mekanismin heikkenemiseen vaikuttavat seuraavat tekijät (kuvio 7): 1) hukkalämpö ympäröivään kallioalueeseen; 2) lämpöenergian latauksen ja purun aikainen pakkokonvektio; 3) lämmön johtuminen eri lämpötilakerrosten välillä sekä 4) lämmön johtuminen seinään luonnollisen konvektion vaikutuksesta (Park ym. 2014a, 172).



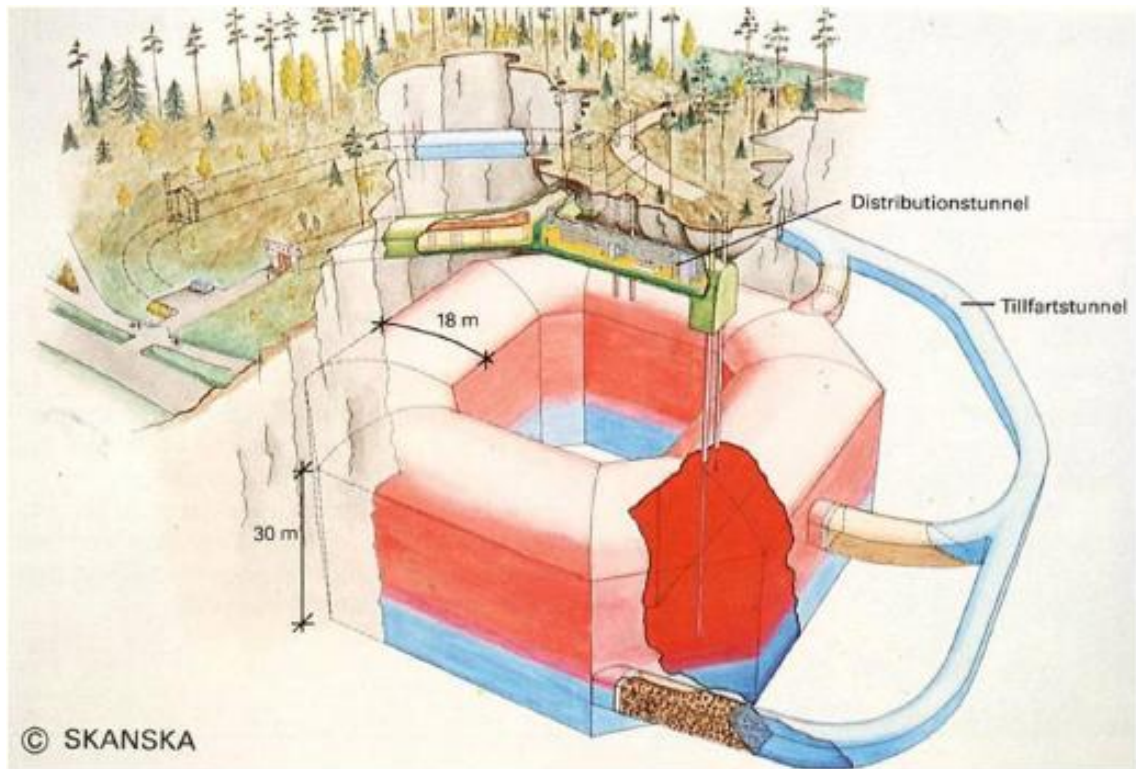
Kuvio 7. Lämpötilakerrostuneisuuteen vaikuttavat tekijät (Park ym. 2014a, 172).

Lämpövaraston korkeus–leveyssuhde vaikuttaa lämpötilakerroksisuuteen lämpövarastossa ja on tärkeimpiä tekijöitä veden lämpötilakerroksisuuden vaikutukseen (Park ym. 2014a, 172).

3.4 Korkeus–leveyssuhde ja lämpötilakerrostuminen

Kasvattamalla korkeus–leveyssuhdetta (aspect ratio of rock cavern), saavutetaan parempi lämpötilakerrostuminen luolalämpövarastossa. Mitä korkeampi lämpötilakerrostuminen on, sitä parempi järjestelmän terminen suorituskyky. Luolalämpövarastoilla, joilla on korkea korkeus–leveyssuhde, menettävät enemmän lämpöä ympäröivään kallioon operoinnin alkuvaiheessa, koska vaipan pinta-ala kasvaa korkeus–leveys suhteen kasvaessa. Kuitenkin pitkän aikavälin varastoinnilla, isommalla vaipan pinta-alalla, ei ole suuria vaikutuksia ympäröivän kallion aiheuttamaan hukkalämpöön. Lisäksi korkeus–

leveyssuhde voi aiheuttaa rakenteellista epästabiilisuutta luolalämpövarastossa, jos varaston muoto on liian kapea ja korkea. Tästä johtuen luolalämpövaraston suunnittelussa tulisi ottaa huomioon hyvän termisen suorituskyvyn lisäksi kallioluolan rakenteellinen stabiilisuus. (Park ym. 2014a, 171; Park ym. 2013, 208.) Työssä ei käsitellä tarkemmin kallioluolan rakenteellista stabiilisuutta, vaan yleisesti tarkastellaan korkeus–leveys suhteen vaikutuksia lämpötilakerrostumiseen.



Kuva 2. Ruotsin Lyckebon luolalämpövaraston pohjapiirustus (Park ym. 2013, 202).

Luolalämpövaraston korkeus–leveyssuhde määritetään kaavalla

$$\text{Korkeus – leveyssuhde} = \frac{\text{korkeus}}{\text{leveys}}$$

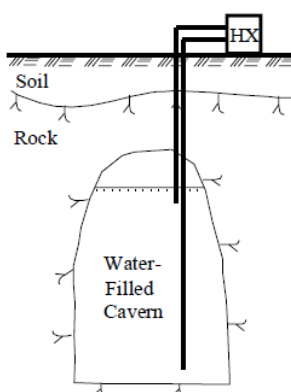
Kaava 6. Luolalämpövaraston korkeus–leveyssuhde

Esimerkitapauksessa, jossa aikaisemmin rakennettu Ruotsin Lyckeboon luolalämpövaraston (kuva 2) korkeus–leveyssuhdetta optimoidaan simulaatiolla. Simuloinnin tarkoituksena on tutkia, mikä on optimaalisin korkeus–leveyssuhde luolalämpövaraston termiselle suorituskyvylle rengasmaisessa kammiossa. Luolalämpövaraston korkeus–leveysuhde on 1,67, korkeus 30 metriä, leveys 18 metriä, tilavuus 100 000 m³, sijainti 30

metrin syvyydessä ja veden lämpötilan vaihteluväli on 40–90 °C. Kallioperä luolalämpövaraston ympärillä on hyvän laatuista graniittia ja gneissia, jossa lohkeamia on vain muutamia ja lohkeamat on täytetty toissijaisilla mineraaleilla, mikä viittaa siihen, että kallio on kovaa ja ei herkästi läpäisevää. Lisäksi kallion ominaisuuksia ovat tilavuuslämpökapasiteetti $2160 \text{ kJ/m}^3\text{K}$, tiheys 2700 kg/m^3 ja lämmönjohtuminen $3,1 \text{ W/mK}$. (Park ym. 2013, 202.) Tutkimustulosten perusteella luolalämpövaraston termisen suorituskyky on optimaalisin pitkän aikavälin varastoinnissa, kun korkeus–leveysuhde on noin 3,5. Tästä suurempi suhdeluku ei parantanut termistä suorituskykyä merkittävästi tai huononsi termistä suorituskykyä. Tutkimus perustui vain lämmönsiirron simulointiin eikä siinä otettu kantaa rakenteelliseen stabiilisuuteen. (Park ym. 2013, 208.)

3.5 Varastojärjestelmän prosessikuvaus

Luolalämpövaraston prosessia operoidaan lisäämällä lämpöenergiaa varastoon tai ottamalla varastosta. Prosessissa tulee huomioida veden lämpötilakerroksisuus varastossa, joka on viileämpää alemmissä vesikerroksissa kuin ylemmissä vesikerroksissa. Varastointijärjestelmän termisen suorituskyvyn säilyttäminen mahdollisimman korkeana, vaatii kuumemman veden operoimisen varaston ylemmässä osassa ja viileämmän veden operoimisen varaston alemmassa osassa. Tällä menetelmällä veden lämpötilakerroksisuus pidetään varastossa mahdollisimman hyvänä prosessien aikana ja pitää yllä mahdollisimman suurta varastojärjestelmän termistä suorituskykyä. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 8; Lautkankare ym. 2020, 6.)



Kuvio 8. Luolalämpövarasto (CTES) (Nordell 2000, 6).

Vaikka CTES ja TTES eroavat toisistaan varastointiteknologioina, ovat järjestelmät operoinnin kannalta samankaltaisia. Kummankin järjestelmän toimintaperiaate perustuu

veden lämpötilakerroksisuuden ylläpitämiseen, joissa kuuma vesi operoidaan varaston yläosassa ja viileämpi vesi operoidaan varaston alaosassa. Suurin ero järjestelmien välillä ovat mekanismit liittyen hukkalämpöön ja termiseen yhdistymiseen maaperän kanssa. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 8.)

3.6 Varastojärjestelmään liittyviä laskentamenetelmiä

Laskentamenetelmiä luolalämpövaraston lämpöenergian varastoinnin kannalta tarkastellaan kapasiteetin, tehon ja hyötysuhteen määrittämisen osalta. Kapasiteetti [E_c] määrittelee varastoidun energian määrän varastossa ja on riippuvainen varaston prosessista, varastomateriaalista sekä varaston tilavuudesta [kWh]. Teho [Φ] määrittelee, kuinka nopeasti varastoitu energia voidaan purkaa tai ladata [kW]. Hyötysuhde [η] on suhde, jossa jaetun energian määrä jaetaan sillä energian määrällä, joka tarvitaan varaston lataukseen. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 3.)

Luolalämpövaraston teoreettinen kapasiteetti lasketaan kaavalla 7, jossa E_c [kWh] on varaston teoreettisen kapasiteetin laskennallinen määrä, V [m^3] on varastomateriaalin tilavuus, c_p [kJ/kgK] on varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti, ΔT [K] on varastomateriaalin lämpötilanmuutos ja [$1/3600$] on kerroin, jolla laskelma muutetaan vastaamaan kilowattituntia (kWh). (Viksten 2018, 4; 23).

$$E_c = V\rho c_p \Delta T * \frac{1}{3600}$$

Kaava 7. Luolalämpövaraston teoreettinen kapasiteetti (Viksten 2018, 4; 23).

Luolalämpövaraston tehon määrittämisessä tulee tietää parametrit kapasiteetin sekä lämpöenergian purun tai latauksen maksimaalinen ajallinen kesto. Tehon määrä lasketaan kaavalla 8, jossa Φ [kW] on varaston teho, E_c [kWh] on varaston kapasiteetti ja Δt [h] on aika, missä lämpöakun maksimaalinen lataus tai purku tapahtuu.

$$\Phi = \frac{E_c}{\Delta t}$$

Kaava 8. Luolalämpövaraston teho.

Luolalämpövaraston hyötysuhde lasketaan kaavalla 9, jossa η on varastojärjestelmän hyötysuhde, $E_{discharge}$ [kWh] on jaetun energian määrä varastosta ja E_{charge} [kWh] on tarvittava määrä energiaa varaston uudelleen lataukseen (Berglund 2020, 6).

$$\eta = \frac{E_{discharge}}{E_{charge}}$$

Kaava 9. Luolalämpövaraston hyötysuhde (Berglund 2020, 6).

Luolalämpövarastoon liittyviä laskentamenetelmiä voi tutkia tarkemmin Berglundin (2020) tutkimuksesta, joka löytyy lähdeluettelosta.

3.7 Mahdolliset epäpuhtaudet ja niiden ehkäiseminen

Vaihdettaessa luolalämpövaraston varastomateriaalin öljystä vedeksi, aiheuttaa prosessin lataus–purku sykli jonkin aikaa jäljellä olevan polttoainejäämien irtoamista. Oulu Energy Works yhtiön toimesta käyttöönotettu luolalämpövarasto Ouluun korvasi vanhan öljyvaraston kallioluolassa, jossa varastomateriaalin korvasi vesi. Operoinnin aikana luolalämpövarastoa ladattaessa ja purettaessa irtosi polttoainejäämiä. Tilanteen ratkaisemiseksi käytettiin kahta soihdua, joiden avulla polttoainejäämät poltettiin. (The Community Research and Development Information Service (CORDIS) 1999.)

Luolalämpövaraston lämpöenergian siirtäminen kaukolämpöverkoston lämmönvaihtimien avulla estää luolasta kulkeutuvan maa-aineksen ja muun lian pääsemisen kaukolämpöverkoston. Oulu Energy Works yhtiön mukaan Oulun luolalämpövaraston lämpöenergian siirto tapahtuu lämmönvaihtimen avulla, kun lämpöenergiaa siirretään luolalämpövarastosta kaukolämpöverkkoon. (CORDIS 1999.)

Lisäksi luolalämpövarastossa voi tapahtua mineraalien liukenemista ja pH arvon muutosta. Oulun luolalämpövaraston mittauksissa havaittiin raudan ja kloridin pitoisuuksien kasvua verrattuna aikaan ennen luolalämpövaraston alkulämmitystä mitattuihin lukemiin. Myös pH arvossa havaittiin muutosta arvosta 8,3 arvoon 8,0 ennen luolalämpövaraston alkulämmitystä. (CORDIS 1999.)

3.8 Lämpöenergian saanti ja käyttö

Luolalämpövarastoihin varastoitavaa lämpöenergiaa saadaan kerättyä useimmista eri energialähteistä ja järjestelmien pääasiallisena tehtävänä on tasata kaukolämpöverkon kysynnän ja tuotannon vaihtelusta aiheutuvia kulutushuippuja.

Luolalämpövarastoihin varastoidaan lämpöenergiaa muun muassa hukkalämmöistä, teollisuudesta, uusiutuvista energian lähteistä ja meren pintavedestä (Helen 2021 Oy; Vantaan Energia Oy 2021a, 4; Vantaan Energia Oy n.d.; Arponen 2018). Lämpöenergiaa hukkalämmöistä saadaan muun muassa jätevedestä, kiinteistöistä ja teollisuuslaitoksesta (Helen 2021 Oy; Nordell 2012, 3). Teollisuudesta lämpöenergiaa saadaan muun muassa jätteenpoltosta syntyvästä energiasta (Vantaan Energia Oy 2021a, 3). Uusiutuvista energialähteistä lämpöenergiaa saadaan tuulienergiasta, aurinkoenergiasta, ja geotermisistä lähteistä (Vantaan Energia Oy n.d). Lisäksi tulevaisuudessa on suunnitteilla menetelmä, jossa käytetään auringon lämmittämää meren pintavettä kesäaikaan lämpöenergian lähteenä talvella (Helen Oy 2018).

Luolalämpövaraston tuottama lämpöenergia on osa kaukolämpöjärjestelmän jakamaa lämpöenergiaa, jonka tarkoituksena on tasata kaukolämpöverkon kulutushuippuja (Helen Oy 2021). Luolalämpövarasto voidaan myös kytkeä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokseen (Combined heat and power, CHP), jolloin luolalämpövaraston lämpöenergia nostaa sähköntuotantoa ja madaltaa kokonaisenergian kulutusta (CORDIS 1999). Tulevaisuuden ratkaisuna on myös kehitteillä lämpöpumppujen käyttö talvikaudella luolalämpövaraston lämpöenergian hyödyntämisessä energianjakeluverkkoon (Helen Oy 2018).

4 TUTKIMUSMENETELMÄT JA HAASTATTELUT

”Laadullisiksi nimitetyt tutkimukset rakentuvat aiemmista, tutkittavasta aiheesta tehdyistä tutkimuksista ja muotoilluista teorioista, empiirisistä aineistoista sekä tutkijan omasta ajattelusta ja päättelystä”. Tutkimusaineiston koostamisessa alustavina tekijöinä ovat tutkimusongelmat tai tutkimustehtävä, joiden perusteella aineiston keruun menetelmät valitaan (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006b). Laadullisen eli kvalitatiivisen tutkimuksen ominaispiirteisiä seikkoja ovat muun muassa aineistonkeruumenetelmänä haastattelu, aineiston laadullis-induktiivinen analyysi eli aineistolähtöisyys ja teorian koostaminen aineiston perusteella sekä hypoteesittomuus eli tutkimuksella ei ole ennako-oletuksia tuloksista. (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006a). Lisäksi kvalitatiivinen tutkimus käsittää harkinnanvaraisen otoksen, jolla tarkoitetaan aineiston valitsemista tutkijan asettamien kriteereiden perusteella (Saaranen-Kauppinen & Puusniekka 2006c).

Edellä mainittujen laadullisen tutkimuksen elementtien perusteella tämän hypoteesittoman työn tutkimusmenetelmänä on kvalitatiivinen tutkimus ja työn aineistonkeruumenetelminä on käytetty aineistolähtöisyyttä ja asiantuntijahaastatteluita. Työn tutkimusaineisto on koostettu aineistolla, mikä on valittu tutkimuskysymyksen perusteella ja harkinnanvaraisuutta käyttäen aineiston valitsemisessa.

4.1 Aineisto

Aineistoa kerättiin lukuisista eri lähteistä sisältäen ulkomaisia artikkeleita, tutkimusartikkeleita, verkkosivuja sekä kirjallisuutta. Lisäksi aineisto käsittää kotimaisia artikkeleita, tutkimusartikkeleita, verkkosivuja sekä kirjallisuutta ja Geologian Tutkimuskeskuksen karttapalvelun tietoja. Lähteiden julkaisuvuodet vaihtelevat 1989–2021 välisellä ajalla, joista määrältään huomattavan suuri osuus on uudempia julkaisuja. Kuitenkaan tämä ei ole vaikuttanut vanhempien lähteiden luotettavuuteen, koska nykyisetkin luolalämpövarastot perustuvat samoille periaatteille kuten aikaisemmatkin luolalämpövarastot. Lisäksi aineiston lähteiden luotettavuutta tarkasteltiin käymällä lähdekritiikkiä läpi kunkin lähteen kohdalla.

4.2 Asiantuntijahaastattelu

Erilaisia tutkimushaastattelun tapoja on useampia ja ne ovat yleisiä tapoja tutkimusaineistojen tuottamisessa. Tavoitteena tutkimushaastatteluilla on koostaa tietoa ja aineistoa tutkimusongelmaan vastaamiseksi. Tutkimushaastattelut voidaan jaotella tyyppin mukaan ja näitä ovat muun muassa asiantuntijahaastattelu, teemahaastattelu ja kertomushaastattelu. Asiantuntijahaastatteluiden tarkoituksena on selvittää, kuinka yritys toimii tai on toiminut tutkitun asia käsittelyssä. Tällöin asiantuntija on tai on ollut osa valmistelua ja päätöksentekoa. Kuitenkin vastaaminen tutkimuskysymyksiin on aina tutkimuksen tekijän tehtävä ja kysymysten rajauksilla, muotoiluilla ja tyylillä on vaikutusta siihen, että millaisia vastauksia aineistoon saadaan koostettua. Tutkimuksen tekijän tulee perustella valinnat, että millaista tietoa tavoitellaan ja millä tavalla. (Hyvärinen; Suoninen & Vuori n.d..)

Tutkimushaastattelun tapana käytetään asiantuntijahaastatteluita, joiden tarkoituksena on täydentää aineistoa liittyen Suomessa sijaitseviin luolalämpövarastoihin. Asiantuntijahaastatteluissa käytetyt kysymykset ovat määräytyneet sen mukaan, että millainen tieto on jäänyt tiedotta tai on epäselvä selvitetystä kohteesta riippuen. Kirjallisen ja siihen rinnastettavan aineiston perusteella se tieto, joka on jäänyt tiedotta tai epäselväksi, on haastateltu asiantuntijoilta tarkkoja ja harkittuja kysymyksiä käyttäen. Työtä varten on haastateltu kaikkiaan kuutta eri asiantuntijaa.

4.2.1 Asiantuntijahaastatteluiden aineistot

Asiantuntijahaastattelut suoritettiin joko sähköpostitse tai puhelimitse. Näistä kolme haastattelua tehtiin sähköpostitse ja kolme haastattelua puhelimitse. Asiantuntijat toimivat johtavana asiantuntijana, liiketoiminnan päällikkönä, vanhempana projektipäällikkönä, teknisenä päällikkönä, suunnittelupäällikkönä tai verkostopäällikkönä. Yritykset, joihin haastattelut on tehty ovat Helen Oy, Vantaan Energia Oy, Vaskiluodon Voima Oy ja Oulun Energia Oy. Lisäksi asiantuntijahaastattelu on tehty Geologian tutkimuskeskuskelle (GTK).

CASE Helsingin Kruunuvuorenranta

Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövaraston osalta haastateltiin puhelimitse Helen Oy:n asiantuntijaa liittyen luolalämpövaraston käyttöönottoajankohtaan ja teknisiin piirteisiin. Haastattelun tulokset sisältävät arvioidun käyttöönottoajankohdan, tiedon paisuntatilasta sekä selvityksen korvausilman prosessista ja kapasiteetin määrittämisen haasteita. Haastattelun tulokset ovat esitettynä sekä tapauskohtaisessa tarkastelussa kappaleessa 5.1 että vertailutaulukoinnissa (taulukko 9).

CASE Helsingin Mustikkamaa

Helsingin Mustikkamaan luolalämpövaraston osalta haastateltiin sähköpostitse Helen Oy:n asiantuntijaa liittyen luolalämpövarastoiden teknisiin mittoihin ja ympäröivän kallioperän koostumukseen. Haastattelun tulokset sisältävät tekniset mitat luolalämpövarastoiden pituuksista, korkeuksista sekä leveyksistä ja tiedon ympäröivän kallioperän eri kivilajeista. Haastattelun tulokset ovat esitettynä sekä tapauskohtaisessa tarkastelussa kappaleessa 5.2 että vertailutaulukoinnissa (taulukko 9).

CASE Oulu

Oulun luolalämpövaraston osalta haastateltiin sähköpostitse Oulun Energia Oy:n asiantuntijaa liittyen luolalämpövaraston teknisiin ominaisuuksiin, käyttöönottovuoteen sekä paisuntatilaan. Haastattelun tulokset sisältävät tekniset tiedot toimintalämpötilasta, kapasiteetista, vuosituotannosta ja tehosta. Tarkemmat tiedot käyttöönottovuodesta ja paisuntatilasta ei selvinnyt haastatteluaineiston perusteella. Haastattelun tulokset ovat esitettynä sekä tapauskohtaisessa tarkastelussa kappaleessa 5.3 että vertailutaulukoinnissa (taulukko 9).

CASE Vaasan Vaskiluoto

Vaasan Vaskiluodon luolalämpövaraston osalta haastateltiin puhelimitse Vaskiluodon Voima Oy:n asiantuntijaa liittyen luolalämpövaraston teknisiin mittoihin, toimintalämpötilaan sekä ympäröivän kallioperän ominaisuuksiin. Haastattelun tulokset sisältävät tekniset mitat luolalämpövaraston pituudesta, korkeudesta sekä leveydestä, luolalämpövaraston alimman ja ylimmän toimintalämpötilan sekä luolalämpövarastoa ympäröivän kallioperän lämpenemisestä ajan suhteen. Haastattelun tulokset ovat esitettynä sekä tapauskohtaisessa tarkastelussa kappaleessa 5.4 että vertailutaulukoinnissa (taulukko 9).

CASE Vantaan Kuusikonmäki

Vantaan Kuusikonmäen luolalämpövaraston osalta haastateltiin sähköpostitse Vantaan Energia Oy:n asiantuntijaa liittyen luolalämpövarastoiden paineeseen ja käyttöönottovuoteen. Haastattelun tulokset sisältävät toimintapaineen luolalämpövarastossa, paineistuksen toteuttamisen luolalämpövarastossa sekä käyttöönottovuoden. Haastattelun tulokset ovat esitettynä sekä tapauskohtaisessa tarkastelussa kappaleessa 5.5 että vertailutaulukoinnissa (taulukko 9).

Geologian tutkimuskeskus (GTK)

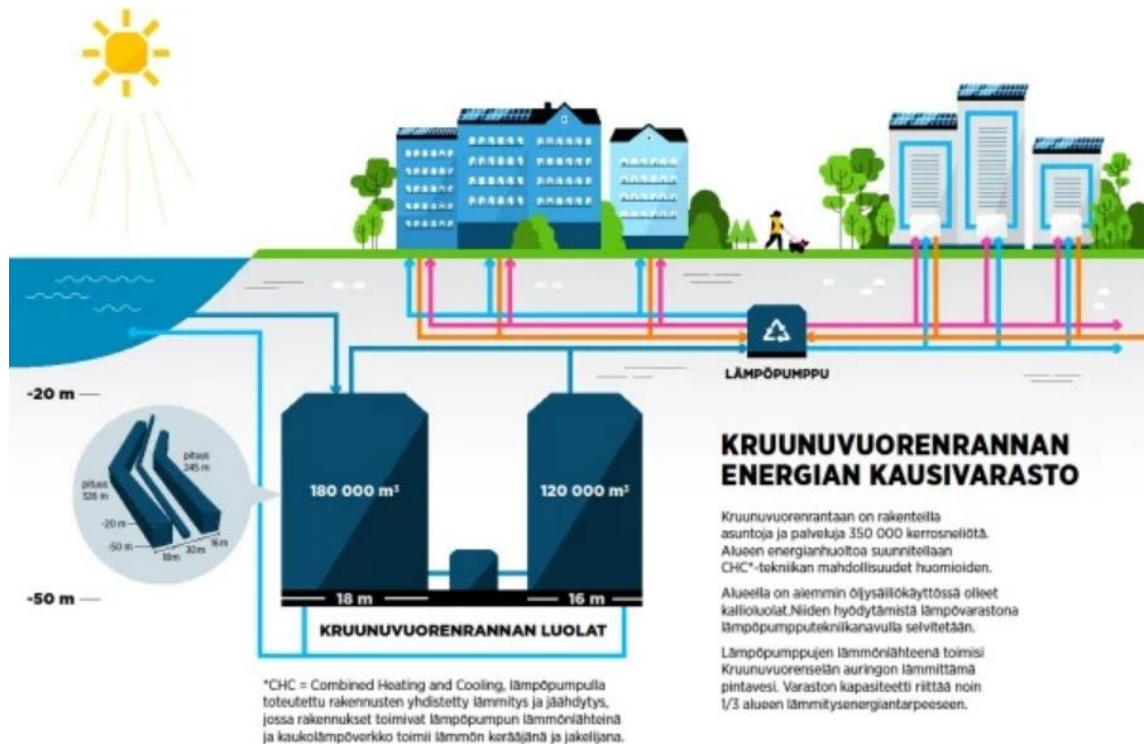
Geologian tutkimuskeskuksen osalta haastateltiin puhelimitse GTK:n asiantuntijaa. Haastattelussa käytiin läpi GTK:n karttapalvelun tietojen käyttämistä insinööriyössä ja lähdetiedon vuosimerkintää metadatan perusteella. Asiantuntijahaastattelun (Asiantuntijahaastattelu 2) mukaan karttapalvelun tarjoamia tietoja Suomen kallioperästä luolalämpövarastoiden osalta voidaan käyttää insinööriyössä ja lähdetiedon vuosimerkintä on se merkintä, joka on kyseisen kartan metadatatassa viimeiseksi päivitettyä.

5 SELVITYS SUOMEN LUOLALÄMPÖVARASTOISTA

Tässä osiossa tuodaan esille rakennettuja ja rakenteilla olevia luolalämpövarastoja Suomesta. Osa tapauskohtaisista tarkasteluista on valmistunut ennen työn kirjoittamista ja osa on vasta rakenteilla. Jo valmistuneet luolalämpövarastot, jotka on käsitelty työssä ovat Vaasan Vaskiluodon, Helsingin Mustikkamaan ja Oulun varastot. Rakenteilla olevat luolalämpövarastot, jotka on käsitelty työssä ovat Vantaan Kuusikonmäen ja Helsingin Kruunuvuorenrannan varastot. Edellä mainitut luolalämpövarastot ovat esitettynä kartalla liitteessä 1, joka esittää suhteellisen tarkan sijainnin jokaisen luolalämpövaraston osalta. Tapauskohtaisissa tarkasteluissa käsitellään kohteiden yleispiirteitä, järjestelmän prosessia, kallioperän koostumusta ja ominaisuuksia sekä teknisiä parametreja. Tapauskohtaiset tarkastelut noudattavat edellä mainittua järjestystä.

5.1 CASE Helsingin Kruunuvuorenranta

Asiantuntijahaastattelun (Asiantuntijahaastattelu 5) mukaan Helsingin Kruunuvuorenrantaan on valmistumassa luolalämpövarasto 2020-luvun puolessavälissä. Suunnitteilla oleva luolalämpövarasto (kuva 3) on ollut aikoinaan Shell öljy-yhtiön dieselöljyvarastona ja Huoltovarmuuskeskuksen öljytuotteiden varmuusvarastona Shellin ylläpitämänä. Lämpövarastot on suunniteltu käytettävään lämpöenergian kausivarastona, jossa hyödynnetään kesäisin auringon lämmittämää merivettä. Luolalämpövaraston tarkoituksena on varastoida kesäaikana auringon lämmittämää meren pintavettä ja hyödyntää varastoituneen lämmön lämpöenergiaa talvikaudella lämpöpumppujen energianlähteenä. Koska luolalämpövarastoon varastoitavan veden toimintalämpötila on alhainen, käytetään lämpöpumppuja lämmön hyödyntämiseen. Kruunuvuorenrannan luolalämpövarasto toimii lämmöntuotannon niin sanottuna raaka-ainevarastona vuosisyklillä ja järjestelmän kapasiteetilla pystytään täyttämään kolmasosa alueen lämmitysenergiatarpeesta. (Helen Oy 2018; Arponen 2018.) Ennen luolien omistuksen vaihtoa Shell öljy-yhtiöltä Skanskalle vuonna 2014, kallioluolat on tyhjennetty ja puhdistettu (Helen Oy 2018).



Kuva 3. Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövarasto (Helen Oy 2018).

Kuvassa 3 on havainnollistettu lämpimämmän veden ja jäähtyneemmän veden prosessia energialähteen, varaston ja lämpöpumpun välillä. Meriveden lämpimämpää vettä tuodaan lämpövarastoihin ja jäähtyttyään vesi poistetaan lämpövarastoista takaisin mereen. Lämpimämmän veden jakelu lämpöenergiälähteenä tapahtuu lämpöpumppujen avulla, joiden tarkoituksena on toimia yhdistettynä lämmön ja jäähdytyksen (Combined Heating and Cooling, CHC) käsittelijöinä. Asiantuntijahaastattelun (asiantuntijahaastattelu 5) mukaan luolalämpövarasto ei sisällä erillistä paisuntatilaa, koska se ei ole merkityksellinen toiminnan kannalta. Lisäksi korvausilma täyttövaiheessa ajetaan ulos ja tyhjennysvaiheessa ajetaan sisään korvausilmapiipun kautta.

Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövarastoa ympäröivän alueen kallioperässä esiintyy graniittia, tyynylaavaa ja uraliittiporfyyriittia ja kiillegneissii (GTK 2017). Mahdollisesti muitakin kivilajeja voi esiintyä luolalämpövarastoa ympäröivällä alueella. Kivilajien ominaisuudet esitetään taulukossa 4, ja taulukon arvot lämmönjohtavuuden [k], ominaislämpökapasiteetin [c_p] ja tiheyden [ρ] osalta ovat keskiarvoja Helsingin alueelta mitatuista tuloksista kivilajityypittäin. Työssä ei käsitellä tarkemmin tyynylaavan ja uraliittiporfyyriitin ominaisuuksia.

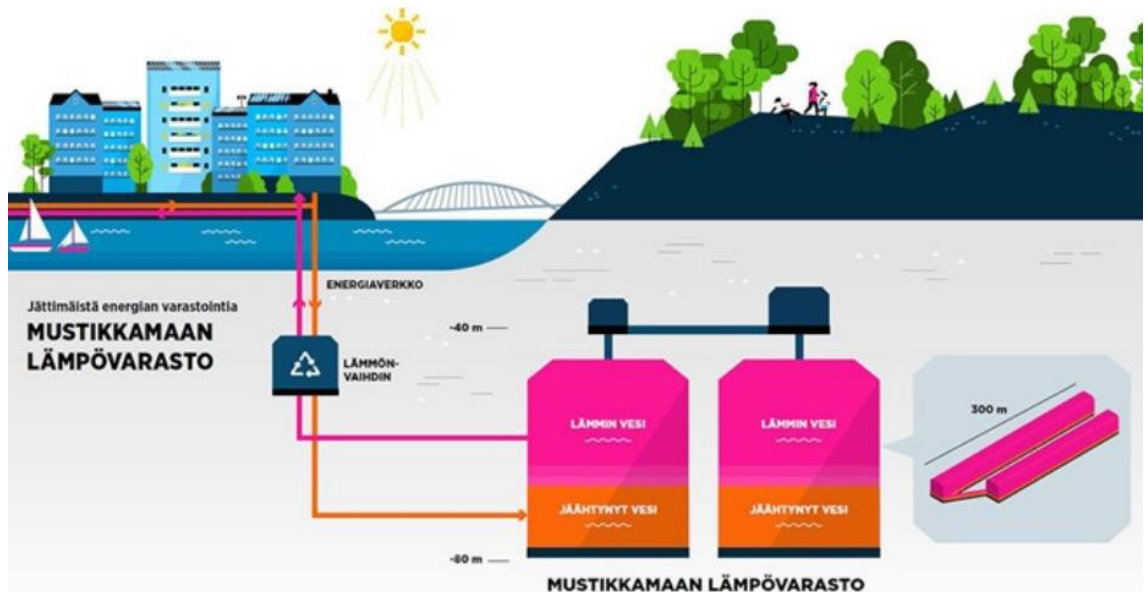
Taulukko 4. Helsingin Kruunuvuorenrannan luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).

Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$C_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Graniitti	3,20	721	2640	1,905	1,682
Kiillegneissi	2,87	725	2707	1,967	1,442

Kruunuvuorenrannan CTES-järjestelmän tekniset parametrit ovat luolalämpövaraston yhteistilavuus 300 000 m³, vuosituotanto noin 6–7 GWh, purku teho 3 MW sekä toimintalämpötila 2–24 °C (Arponen 2018). Kapasiteetin määrittäminen on riippuvainen sisään tulevasta veden lämpötilasta. Lämpötilaan vaikuttavat epävarmat tekijät, jolloin tarkempi kapasiteettilaskelma on haasteellinen varaston osalta. (Asiantuntijahaastattelu 5.) Luolalämpövarastoiden pohjat sijaitsevat 50 metriä maanpinnan alapuolella ja katot sijaitsevat 20 metriä maanpinnan alapuolella. Suuremman luolalämpövaraston pituus on 326 metriä, leveys on noin 18 metriä ja korkeus on 30 metriä. Pienemmän luolalämpövaraston pituus on 245 metriä, leveys on noin 16 metriä ja korkeus on 30 metriä. (Helen Oy 2018.) Korkeus–leveyssuhde suuremmassa lämpövarastossa on 1,67 ja pienemmässä lämpövarastossa 1,88.

5.2 CASE Helsingin Mustikkamaa

Helsingin Mustikkamaalle rakennettu luolalämpövarasto (kuva 4) on toiminut aikoinaan öljyvarastona, joka on tyhjennetty ja poistettu käytöstä vuonna 1999 (Galkin-Aalto 2018). Luolalämpövarasto on valmistunut vuonna 2021 ja lämpövarastojen lämmitys on aloitettu käyttöä varten. Luolalämpövaraston tarkoituksena on tasata kaukolämpöverkon kulutushuippuja vuoden ympäri ja niihin voidaan varastoida jätevesien ja kiinteistöiden hukkalämpöjä. Toiminta perustuu jatkuvan kaukolämmön lataamiseen ja purkamiseen. (Helen Oy 2021.) Lämpöenergian varastointi luolalämpövarastoon nostaa energiajärjestelmän energiatehokkuutta ja vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä, jolloin hiilidioksidipäästöt vähenevät Helen Oy:n osalta 21 000 tonnia vuodessa. (Aaltonen 2020; Helen Oy 2021). Lisäksi luolalämpövarastolla voidaan optimoida sähkön- ja lämmön yhteistuotantolaitoksen toimintaa sekä kyetään lisäämään uusiutuvaa energiaa ja vähentämään kivihiilen ja öljyn käyttöä (Arponen 2018).



Kuva 4. Helsingin Mustikkamaan luolalämpövarasto (Arponen 2018).

Luolalämpövarasto koostuu kahdesta lämpövarastosta ja luolalämpövarastoa operoidaan yläpuolelta diffuusoriputkien avulla. Diffuusoriputket kulkevat painetulpkien läpi, joiden avulla lämpövarastot ovat suljettuna ja putkien avulla luolalämpövaraston lämpöakkuja ladataan ja puretaan. Kuvassa 4 on havainnollistettu veden lämpötilakerroksisuutta lämpimän ja jäähtyneen veden osalta. Lämpövarastoiden lisäksi luolalämpövarasto sisältää paisuntatilan, jonka tarkoituksena on mahdollistaa luolalämpövaraston veden tilavuuden vaihtelu lämpötilan mukaan. Järjestelmä siirtää lämpöenergiaa kaukolämpöverkoon lämmönsiirtimien avulla, joiden tarkoituksena on pitää luolalämpövaraston vesi erillään kaukolämpöverkon vedestä. Kaukolämpöverkon vesi lämmitetään kaukolämpöpumppaamon lämmönsiirtimien läpi ja lämmitetty vesi palaa takaisin kaukolämpöverkoon. (Aaltonen 2020.) Lisäksi luolalämpövaraston hukkalämpöä vähentää kymmenien metrien kallioperä, joka toimii lämmöneristeenä (Helen Oy 2021).

Helsingin Mustikkamaan luolalämpövarastoa ympäröivän alueen kallioperässä esiintyy pääasiassa granodioriittia, kiillegneissia ja kvartsimaa-älpagneissia (Asiantuntijahaastattelu 3). Mahdollisesti muitakin kivilajeja voi esiintyä luolalämpövarastoa ympäröivällä alueella. Kivilajien ominaisuudet esitetään taulukossa 5, ja taulukon arvot lämmönjohtavuuden $[k]$, ominaislämpökapasiteetin $[c_p]$ ja tiheyden $[\rho]$ osalta ovat keskiarvoja Helsingin alueelta mitatuista tuloksista kivilajityypittäin.

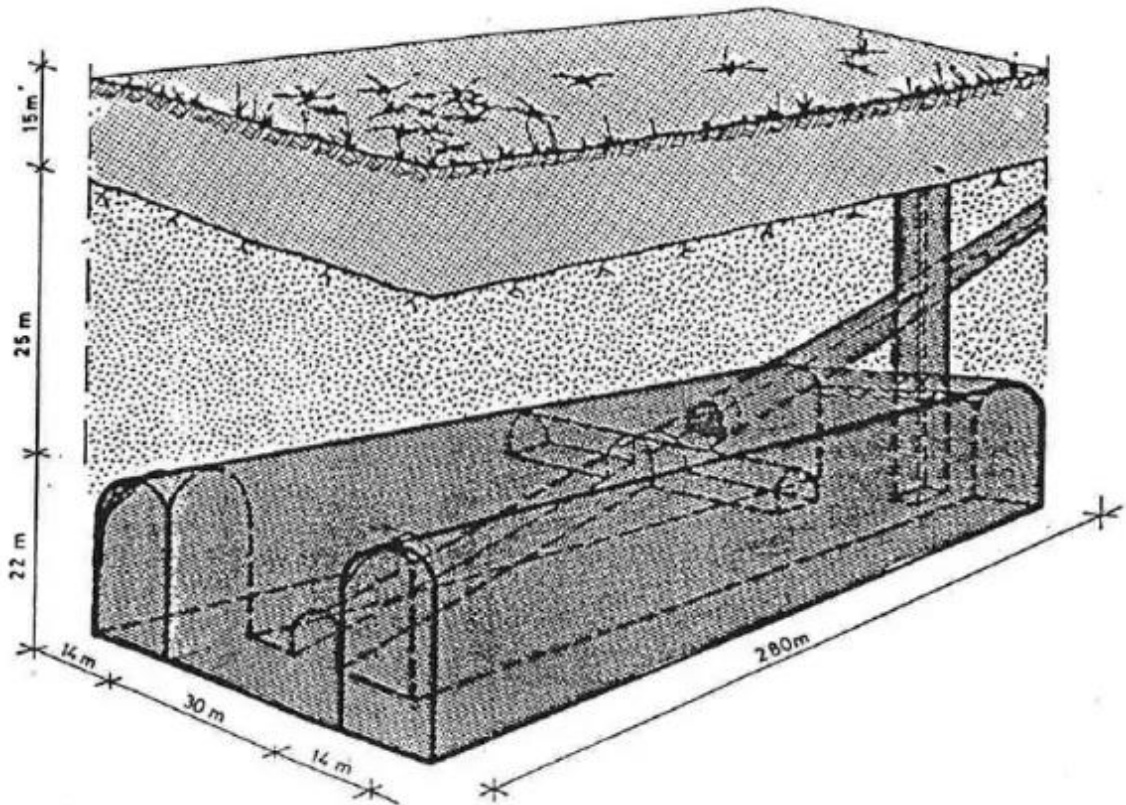
Taulukko 5. Helsingin Mustikkamaan luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).

Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$C_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Grano- ja kvartsidioriitti	3,17	731	2675	1,952	1,612
Kiillegneissi	2,87	725	2707	1,967	1,442
Kvartsi-maasälpagneissi	3,10	723	2794	2,021	1,551

Mustikkamaan CTES-järjestelmän tekniset parametrit ovat luolalämpövaraston yhteistilavuus 320 000 m³, josta tehollinen vesitilavuus 260 000 m³ (Helen Oy 2021; Galkin-Aalto 2018). Kapasiteetti 11, 6 GWh, vuosituotanto noin 140 GWh, purku ja latauksen teho 120 MW sekä toimintalämpötila 45–100 °C (Arponen 2018). Lisäksi lämpövarastoiden pohjat sijaitsevat 80 metriä maanpinnan alapuolella ja katot sijaitsevat 50 metriä maanpinnan alapuolella (Arponen 2018). Suuremman lämpövaraston pituus on 320 metriä, korkeus noin 30 metriä ja leveys 20 metriä. Pienemmän lämpövaraston pituus on 248 metriä, korkeus noin 30 metriä ja leveys 20 metriä (Asiantuntijahaastattelu 3). Luolalämpövarastoiden korkeus–leveysuhde on 1,50.

5.3 CASE Oulu

Oulun luolavarasto on toiminut aikoinaan öljyvarastona ja sen käyttöönotto luolalämpövarastoksi (kuva 5) on aloitettu arviolta 1990-luvun loppupuolella (CORDIS 1999.) Aikaisemmin luolavarastot ovat olleet Kemiran tehtaan öljyvarastoja ja luolavarastot ovat sittemmin täytetty vedellä sekä yhdistetty Toppilan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksen kanssa (Nordell 2012, 3). Luolalämpövaraston tarkoituksena on toimia lisäpuskurina lämmöntuotannon ja lämmönkulutuksen välissä sekä parantaa lämmöntuotannon luotettavuutta. Luolalämpövarasto tasoittaa kysynnästä aiheutuvaa vaihtelun tarvetta kaukolämpöverkon ja lämmöntuotannon välillä. (CORDIS 1999.) Järjestelmää käytetään Kemiran tehtaan kausittaisena hukkalämmön varastona ja lyhyt aikaisena lämmönvarastona Oulu Energy Works yhtiölle. Lisäksi Kemiran tehtaan hukkalämpöjä käytetään myös kaukolämpöverkoston lämpöenergian lähteenä. (Nordell 2012, 3–4.) Odotettu energiasäästö on 4 400 öljykvivalenttitonnia vuodessa verrattuna erilliseen lämmön ja sähkön tuotantoon (CORDIS 1999).



Kuva 5. Perspektiivikaavio Oulun luolalämpövarastosta (Ritola & Sipilä 1989, 3).

Oulun luolalämpövarasto koostuu kahdesta rinnakkaisesta lämpövarastosta (Ritola & Sipilä 1989, 2). Luolalämpövarastoa operoidaan diffuusoriputkilla, joiden tarkoituksena on pitää lämpötilakerrostuneisuus sekoittumattomana prosessin aikana. Veden laminaariisuus ja tasainen jakelu latauksen ja purun aikana on varmistettu erikoissuuttimilla, jolloin luolalämpövaraston kapasiteetti maksimoidaan pitämällä lämpimämpi ja viileämpi vesi eroteltuna. Tämä myös mahdollistaa korkean latauksen ja purun tehon. Luolalämpövaraston lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkkoon lämmönsiirtimien kautta. (CORDIS 1999.)

Oulun luolalämpövarastoa ympäröivässä kallioperässä esiintyy graniittia ja gneissia (Ritola & Sipilä 1989, 2). Gneissi on useamman kivilajin ryhmän nimike ja tähän ryhmään kuuluu muun muassa kiillegneissi (Peltoniemi & Kukkonen 1995, 8). GTK (2017) mukaan Oulun alueella kallioperässä esiintyy kiillegneissia. Edellä olevien tietojen perusteella oletetaan, että Oulun luolalämpövarastoa ympäröivässä kallioperässä esiintyy graniittia ja kiillegneissia. Mahdollisesti muitakin kivilajeja voi esiintyä luolalämpövarastoa ympäröivällä alueella. Graniitin ja kiillegneissin ominaisuudet esitetään taulukossa 6, ja taulukon arvot lämmönjohtavuuden [k] ja tiheyden [ρ] osalta ovat keskiarvoja Suomen

alueelta ja ominaislämpökapasiteetin $[c_p]$ keskiarvo on Helsingin alueelta mitatuista tu-loksista kivilajityypittäin.

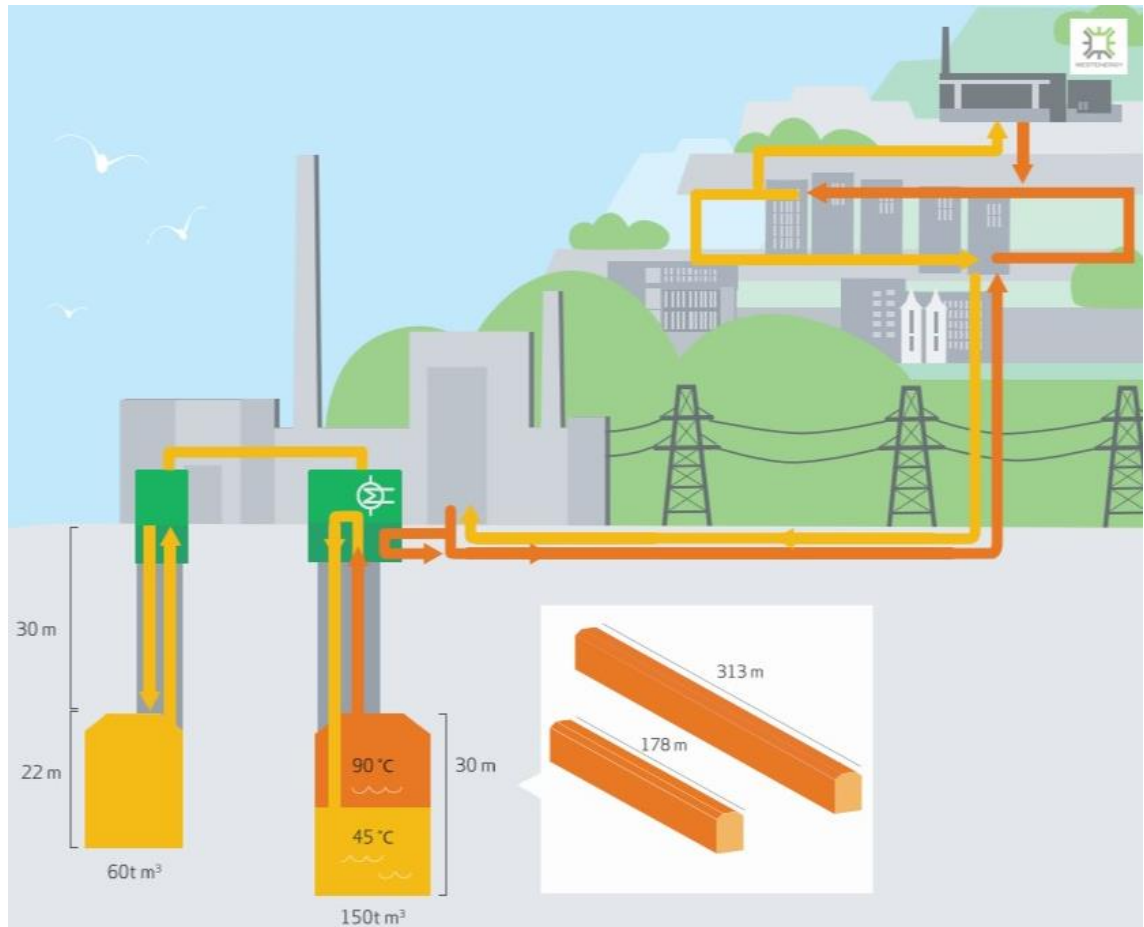
Taulukko 6. Oulun luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).

Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Graniitti	3,61	721	2670	1,905	1,682
Kiillegneissi	2,86	725	2758	1,967	1,442

Oulun CTES-järjestelmän tekniset parametrit ovat yhteistilavuus 190 000 m³, kapasiteetti noin 13,5 GWh (60 celsiusasteen lämpötilanmuutoksella), teho 80 MW, toimintalämpötila on 56–84 celsiusastetta ja vuosituotanto vuonna 2020 oli noin 18 GWh (Asian-tuntijahaastattelu 6). Lämpövarastoiden katot ovat 40 metriä ja pohjat ovat 62 metriä maanpinnan alapuolella. Lisäksi lämpövarastoiden mitat ovat korkeus 22 metriä, leveys 14 metriä ja pituus 280 metriä. (Ritola & Sipilä 1989, 2–3.) Korkeus–leveys-suhte kummassakin lämpövarastossa on 1,57.

5.4 CASE Vaasan Vaskiluoto

Vaasan Vaskiluodon luolalämpövarasto (kuva 6) on valmistunut vuonna 2020, jossa varastomateriaali on lämmitetty hyödyntämällä jätteenpolttolaitoksen ylimääräistä lämpöenergiaa (EPV Energia Oy 2020). Luolalämpövaraston alkuperäisenä käyttötarkoituksena on ollut toimia öljyvarastona ja luolavarastot ovat sittemmin puhdistettu tyhjennyksen jälkeen 1990-luvun loppupuolella. Luolalämpövaraston toiminta mahdollistaa kivihii- len käytön vähentämisen yli 30 %:lla ja uusiutuvien sekä hiilineutraalien energialähteiden käytön kaukolämmöntuotannossa. Järjestelmän tarkoituksena on tasata kaukolämmön tuotantohuippuja ja mahdollistaa tulevaisuudessa tuulienergian ja aurinkoenergian jous- tavamman käytön sekä alueella syntyvien hukkalämpöjen hyödyntämisen. (Leiwo, H. 2019.) Luolalämpövarasto on tarkoitettu toimivan Vaskiluodon voimalaitoksen yhtey- dessä lämmöntuotannossa (Vaasan Sähkö Oy 2019), ja järjestelmän käyttöikä on erit- täin pitkä, koska teknologiaa pystytään huoltamaan, uudistamaan ja muokkaamaan uu- sia käyttötarkoituksia varten (EPV Energia Oy 2020).



Kuva 6. Vaasan Vaskiluodon luolalämpövarasto (EPV Energia Oy 2020).

Luolalämpövarasto koostuu kahdesta eri lämpövarastosta. Suurempi luolavarasto varastoi lämpimämpää vettä ja tarvittaessa siirtää lämpöenergiaa kaukolämpöverkoston. Pienemmän luolavaraston tarkoitus on toimia luolalämpövarastojärjestelmän paisuntasäiliönä. (Vaasan sähkö Oy 2019.) Lämpöenergiaa siirretään suuremmasta lämpövarastosta lämmönsiirtimen avulla kaukolämpöverkoston ja jäähtyneempi vesi palaa takaisin luolalämpövarastoon. Lämmönsiirtimen kautta siirretty lämpöenergia yhdistyy voimalaitoksesta lähtevään lämmitettyyn kaukolämpöverkoston veteen. Myös tarvittaessa vettä voidaan siirtää suuremmasta lämpövarastosta pienempään (paisuntasäiliö) tai toisin päin. (kuva 6.) Luolalämpövarastoa ympäröivän kallion lämpeneminen saavuttaa noin neljän vuoden kuluessa kylläisemmän tilan, jolloin hukkalämpö ei ole niin suuri ympäröivään kallioperään kuin alun perin (Asiantuntijahaastattelu 1).

Ympäröivässä kallioperässä esiintyy kivilajeina kiillegneissia ja granodioriittia (GTK 2017). Mahdollisesti muitakin kivilajeja voi esiintyä luolalämpövarastoa ympäröivällä alueella. Kiillegneissin ja granodioriitin ominaisuudet esitetään taulukossa 7, ja taulukon

arvot lämmönjohtavuuden [k] ja tiheyden [ρ] osalta ovat keskiarvoja Suomen alueelta ja ominaislämpökapasiteetin [c_p] keskiarvo on Helsingin alueelta mitatuista tuloksista kivilajityypittäin.

Taulukko 7. Vaasan Vaskiluodon luolalämpövaraston kallioperän kivilaji ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).

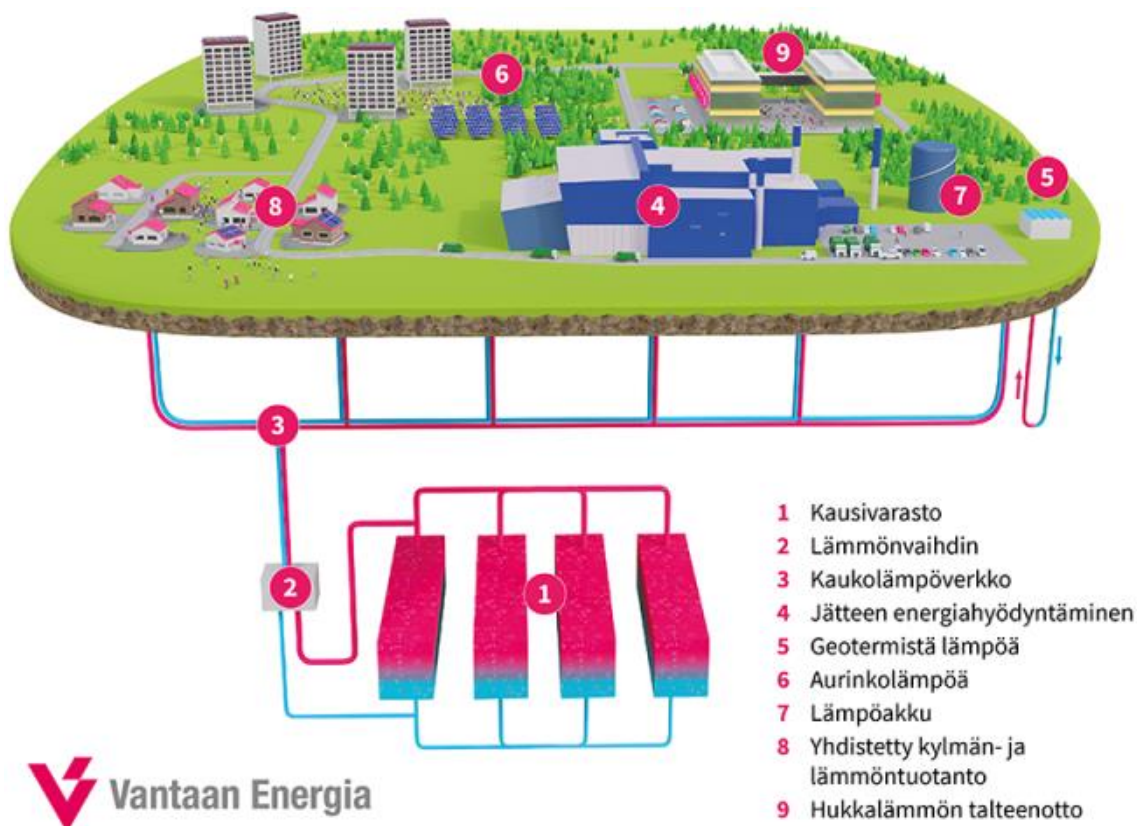
Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Grano- ja kvartsidioriitti	3,61	731	2699	1,952	1,612
Kiillegneissi	2,86	725	2758	1,967	1,442

Vaskiluodon CTES-järjestelmän tekniset parametrit ovat luolalämpövaraston tehollinen vesitilavuus 150 000 m³ (paisuntatilan kanssa 210 000 m³), kapasiteetti 7–9 GWh sekä lataus ja purku teho 100 MW (Vaasan sähkö Oy 2019). Järjestelmän toimintalämpötila on (42–45) –95 °C. Lisäksi lämpövaraston pohja sijaitsee 60 metriä ja katto 30 metriä maanpinnan alapuolella, jonka pituus on 278 metriä, korkeus on 30 metriä ja leveys on 20 metriä. (Asiantuntijahaastattelu 1.) Luolalämpövaraston korkeus–leveysuhde on 1,50.

5.5 CASE Vantaan Kuusikonmäki

Vantaan Energia Oy:n luolalämpövarasto (kuva 7) (Vantaa Energy Cavern Thermal Energy Storage, VECTES) on suunniteltu valmistuvan vuonna 2026 (Asiantuntijahaastattelu 4). Poikkeuksellisesti luolalämpövarasto louhitaan eikä oteta käyttöön olemassa olevaa luolavarastoa, jonka käyttötarkoitus on päätynyt (Vantaan Energia Oy n.d). Valmistuttuaan luolalämpövarasto tulee olemaan maailman suurin ja järjestelmän toimintalämpötila on tavallista korkeampi, mikä parantaa kustannustehokkuutta. (Vantaan Energia Oy 2012a, 2.) Luolalämpövaraston tarkoituksena on varastoida kesäkaudella lämpöä, jota hyödynnetään talvikaudella kaukolämmön tuotannossa. Tämä myös mahdollistaa talvikaudella käytettyjen fossiilisten energialähteiden käytöstä poistamisen. (Vantaan Energia Oy 2021a, 3–4.) Varastoidulla energialla korvataan maakaasun käyttö talvikaudella, jolloin hiilidioksidipäästöt vähentyvät 65 000 tonnilla vuositasolla. (Vantaan Energia Oy n.d). Lämpövarastoihin varastoidaan uusiutuvaa energiaa muun muassa aurinkoenergiasta, tuulienergiasta ja energiaa geotermisistä lähteistä. Lisäksi

lämpövarastoihin voidaan varastoida hukkalämpöjä ja jätteenpoltosta syntyvää lämpöenergiaa. (Vantaan Energia Oy n.d; Vantaa Energia Oy 2021a, 4.)



Kuva 7. Vantaan Kuusikonmäen alustava hahmotelma luolalämpövarastosta (Vantaan Energia n.d).

Muutetussa teknisessä ratkaisussa luolalämpövarasto koostuu kolmesta eri lämpövarastosta ja paisuntakammioista (Vantaa Energia Oy 2021b, 33; 42). Lämpövarastot sijoitetaan noin 60 metrin syvyyteen kallioperään, jossa pohjaveden luontainen paine tuottaa luolalämpövarastoon paineen, jolloin vesi ei höyrysty, vaikka luolalämpövaraston korkein toimintalämpötila on 140 °C (Vantaan Energia Oy 2021a, 3). Luolalämpövaraston paine on 5–8 baaria ja paineistus toteutetaan veden omalla massalla eli vesi on luonnollisessa paineessa (Asiantuntijahaastattelu 4). Järjestelmän lämpöenergia puretaan kaukolämpöverkoston lämmönvaihtimien avulla, joiden tehtävänä on siirtää lämpöenergiaa kaukolämpöverkon ja luolalämpövaraston veden välillä. Lisäksi järjestelmä sisältää lämpöpumpun, joka parantaa järjestelmän tehokkuutta. (Vantaan Energia Oy 2021a, 4; Vantaa Energia Oy 2021b, 37.)

Vantaan Kuusikonmäen luolalämpövarastoa ympäröivän alueen kallioperässä esiintyy kivilajeina graniittia, kvartsi- ja granodioriittia ja kvartsi-maasälägneissiä (GTK 2017). Mahdollisesti muitakin kivilajeja voi esiintyä luolalämpövarastoa ympäröivällä alueella. Graniitin, kvartsi- ja granodioriitin ja kvartsi-maasälägneissin ominaisuudet esitetään taulukossa 8, ja taulukon arvot lämmönjohtavuuden [k] ja tiheyden [ρ] osalta ovat keskiarvoja Suomen alueelta ja ominaislämpökapasiteetin [c_p] keskiarvo on Helsingin alueelta mitatuista tuloksista kivilajityypittäin.

Taulukko 8. Vantaan Kuusikonmäen luolalämpövaraston kallioperän kivilajit ja ominaisuudet (GTK 2019, 58; 60).

Kivilaji	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$C \left[\frac{MJ}{m^3K} \right]$	$\alpha \left[\frac{mm^2}{s} \right]$
Graniitti	3,61	721	2670	1,905	1,682
Grano- ja kvartsidioriitti	3,61	731	2699	1,952	1,612
Kvartsi-maasälägneissi	3,59	723	2673	2,021	1,551

Kuusikonmäen CTES-järjestelmän tekniset parametrit ovat luolalämpövaraston tehollinen vesitilavuus 900 000 m³ ja paisuntatilan tilavuus 60 000 m³, kapasiteetti 90 GWh, lataus- ja purkuteho 200 MW sekä toimintalämpötila 35–140 °C (Vantaan Energia Oy 2021b, 10; 33; 46; Vantaan Energia Oy 2021a, 4). Pohjat sijaitsevat noin 100 metriä maanpinnan alapuolella ja katot sijaitsevat noin 60 metriä maanpinnan alapuolella. Lämpövarastojen pituudet ovat 370 metriä, leveydet ovat 20 metriä ja korkeudet ovat 41 metriä. (Vantaan Energia Oy 2021b, 33.) Korkeus–leveyssuhde on 2,05.

6 TEKNINEN VERTAILU

Tässä osiossa esitetään kaikkien tarkasteltavien tapauskohtaisten luolalämpövarastoiden tuloksia taulukkomuodossa. Taulukointi sisältää Suomessa jo olevien ja tulevien luolalämpövarastoiden sekä teknisiä parametrejä että ympäröivän kallioperän kivilajeja (taulukko 9). Lisäksi taulukko 9 sisältää teknisten parametrien yksiköt, luolavarastoiden alkuperäisen käyttötärpeen ja tapauskohtaisen käyttöönottovuoden tai tiedon arvioidusta käyttöönottovuodesta.

Taulukko sisältää kahdeksan eri teknistä parametria ja neljä eri kivilajityyppiä. Parametri- ja kivilajitietojen avulla pyritään antamaan yleiskuvaa ja vertailevaa näkemystä eri luolalämpövarastoista Suomessa. Kuitenkin jokainen CTES on erilainen ja järjestelmien tekniset piirteet ja ominaisuudet sekä sijainnit poikkeavat toisistaan. Järjestelmien poikkeavaisuuksien vuoksi on perusteltua, että tuloksia tarkastellaan kohteittain erikseen laajemmin ja tiivistämällä kohteiden tulokset vertailevaan taulukkoon. Tällaisen metodin tarkoituksena on antaa lukijalle yleis- ja yksityiskohtaisempikäsitys tarkasteltavista luolalämpövarastoista.

Taulukon tekniset parametrit ovat lämpövarastoiden määrä, tilavuus, kapasiteetti, teho, vuosituotanto, syvyys maanpinnasta, korkeus–leveyssuhde sekä toimintalämpötila. Lisäksi tekninen osio sisältää luolalämpövaraston alkuperäisen käyttötarkoituksen sekä käyttöönottovuoden. Taulukon kallioperän eri kivilajityyppejä on neljä erilaista, joita havaittiin kohteissa ja nämä ovat graniitti, grano- ja kvartsidioriitti, kiillegneissi sekä kvartsi-maasälpägneissi. Edellä mainitut tekniset parametrit, muut tiedot ja kivilajityypit ovat esitettyinä kohteittain ja tarkasteltavia kohteita on kaikkiaan viisi kappaletta.

Työn osalta muutamia teknisten parametrien lukuarvoja on jäänyt tiedotta. Viivalla korvatut taulukon lukuarvot ovat tietoja, joita ei ole saatu tietoon työtä kirjoittaessa.

Taulukko 9. Luolalämpövarastoiden tekninen ja kalliooperän kivilajityyppien vertailu kohteittain.

Luolalämpövarastoiden tekninen vertailu ja kalliooperän kivilajityyppien vertailu kohteittain						
Tekninen parametri	Yksikkö	Helsinki	Helsinki	Oulu	Vaasa	Vantaa
		Kruunuvuorenranta	Mustikkamaa		Vaskiluoto	Kuusikonmäki
Lämpövarastoiden määrä	n	2	2	2	1	3
Yhteistilavuus	m ³	300 000	320 000	190 000	210 000	960 000
Tehollinen tilavuus	m ³	300 000	260 000	190 000	150 000	900 000
Paisuntatila	m ³	ei merkityksellinen	60 000	-	60 000	60 000
Kapasiteetti	GWh	-	11,6	~13,5 ($\Delta 60^{\circ}\text{C}$)	7–9	90
Teho (purku/lataus)	MW	3 (purku)	120	80	100	200
Vuosituotanto	GWh	6–7	140	18 (vuonna 2020)	-	-
Syvyys maanpinnasta (katto; pohja)	m	20; 50	50; 80	40; 62	30; 60	60; 100
Korkeus–leveyssuhde	-	1,67; 1,88	1,50	1,57	1,50	2,05
Toimintalämpötila	°C	2–24	45–100	56–84	45–95	35–140
Luolalämpövaraston alkuperä	-	öljyvarasto	öljyvarasto	öljyvarasto	öljyvarasto	louhinta
Käyttöönottovuosi nykykäyttöön	-	~2025	2021	~1990-luvun lopulla	2020	2026
Kivilajityyppi						
Graniitti		○		○		○
Grano- ja kvartsidioriitti			○		○	○
Kiillegneissi		○	○	○	○	
Kvartsi-maasälpägneissi			○			○

Vertailevan taulukon perusteella kohteissa on esiintynyt seuraavia vaihteluita parametreittain. Lämpövarastoiden määrä järjestelmää kohden vaihtelee yhden ja kolmen lämpövaraston välillä. CTES-järjestelmien tilavuus on 190 000–960 000 m³, kapasiteetti on 7–90 GWh sekä lataus- ja purkuteho on 100–200 MW välillä. Poikkeuksena Kruunuvuoren rannan purkuteho 3 MW. Lämpövarastoiden korkeudet vaihtelevat noin 20–40 metrin ja korkeus–leveys suhteet 1,50–2,05 välillä. Syvyydet maanpinnasta kattojen osalta vaihtelevat 20–60 metrin ja pohjien osalta 50–100 metrin välillä. Toimintalämpötilat vaihtelevat pääsääntöisesti noin 45–100 celsiusasteen välillä. Kuitenkin poikkeuksena Kruunuvuoren rannan toimintalämpötila 2–24 celsiusasteen sekä Kuusikonmäen toimintalämpötila 35–140 celsiusasteen välillä, jossa Kuusikonmäen poikkeuksellisen korkea toimintalämpötila mahdollistaa järjestelmän suuremman kapasiteetin. Kaikkien viiden järjestelmän yhteenlaskettu yhteistilavuus on 1 980 000 m³ ja kapasiteetti on arviolta noin 120 GWh, kun järjestelmät ovat aktiivisesti operatiivisia noin 2020-luvun puolivälissä.

7 YHTEENVETO

Lämpöenergian varastointiteknologioiden kehittämis- ja tutkimustyön tärkeys konkretisoituu, kun pyrkimyksenä on nostaa energiajärjestelmien tehokkuutta, alentaa hiilidioksidipäästöjä, tasoittaa energian jakelun ja kysynnän eroa sekä hyödyntää tehokkaammin uusiutuvia energialähteitä lämpöenergian varastoinnissa. Lämpöenergian kausivarastointi luolalämpövarastoihin on yksi kausivarastointiin liittyvistä teknologioista, joilla pyritään muiden menetelmien ohella vastaamaan edellä mainittuihin haasteisiin. Luolalämpövarastot ovat maanalaisia lämpöenergian kausivarastoja, jotka on sijoitettu pääasiassa olemassa oleviin kallioluoliin. Varastoiden tarkoituksena on varata suuri määrä lämpöenergiaa, jota hyödynnetään lämmöntuotannossa kulutushuippujen tasaamiseksi. Varastot kykenevät hyödyntämään lämpöenergiaa muun muassa hukkalämmöistä, uusiutuvan energian lähteistä ja teollisuudesta. Luolalämpövaraston toimintaan vaikuttavat muun muassa varastomateriaalina veden lämpötilakerrostuneisuus, lämpövaraston hukkalämmöt, varaston korkeus–leveysuhde sekä lämpöisemmän ja viileämmän veden prosessointi.

Luolalämpövarastoihin liittyviä jatkotutkimusaiheita ovat: luolalämpövaraston käyttöikä, lisäeristys, kustannukset ja rakenteellinen stabiilisuus suhteessa korkeus-leveysuhteeseen. Kustannusten osalta voidaan tarkastella varastoon tarvittavien materiaalien ja käyttöiästä aiheutuvia pääoma- ja operointikustannuksia. Lisäeristykseen ja rakenteelliseen stabiilisuuteen voisi hyödyntää simulaatioita, jolloin tutkimuksen mahdollinen uutuusarvo kasvaa. Suomessa tehtyjen tutkimusartikkeleiden ja opinnäytetöiden määrä luolalämpövarastoista on vielä vähäistä. Kuitenkin tämä saattaa muuttua, kun otetaan käyttöön kaksi uutta luolalämpövarastoa vuoteen 2026 mennessä.

Selvityksen perusteella Suomessa on viisi eri luolalämpövarastoa, joista kolme oli jo rakennettu ja kaksi on rakenteilla. Rakennetut luolalämpövarastot sijaitsevat Oulussa (~1990-luvun lopulla), Vaasan Vaskiluodossa (2020) ja Helsingin Mustikkamaalla (2021). Rakenteilla olevat luolalämpövarastot ovat valmistumassa noin 2020-luvun puolessavälissä ja ne sijaitsevat Helsingin Kruunuvuorenrannassa (~2025 arvioitu) ja Vantaan Kuusikonmäessä (2026). Luolalämpövarastot ovat sijoitettuna entisiin öljyvarastoihin lukuun ottamatta Kuusikonmäen luolalämpövarastoa, joka louhitaan kallioperään. Luolalämpövarastoiden yhteenlaskettu yhteistilavuus on 1 980 000 m³ ja kapasiteetti on arviolta noin 120 GWh, kun järjestelmät ovat aktiivisesti operatiivisia noin 2020-luvun

puolessavälissä. Jokainen luolalämpövarasto sisältää veden varastomateriaalina ja ovat sijoitettuna kallioluoliin, joita ympäröi kallioperä. Ympäröivän kallioperän kivilajit vaihtelevat kohteittain ja osassa kohteissa esiintyy yhteneväisiä kivilajeja. Vertailtaessa selvitettyjä kohteita, esiintyy järjestelmissä eroavaisuuksia. Erityisesti eroavaisuuksia esiintyy jo rakennettujen ja rakenteilla olevien järjestelmien välillä toimintalämpötilan suhteen. Kruunuvuorenrannan 2–24 °C ja Kuusikonmäen 35–140 °C lämpötila-alueet poikkeavat yleisestä noin 45–100 °C toimintalämpötilasta. Lisäksi rakenteilla olevan Kuusikonmäen luolalämpövaraston tilavuus (960 000 m³) on huomattavasti suurempi kuin muiden luolalämpövarastoiden tilavuudet (190 000–320 000 m³) ja valmistuttuaan on maailman suurin luolalämpövarasto.

LÄHTEET

- Aaltonen, J. 2020. Mustikkamaan luolalämpövarasto täytetään pian vedellä. [Viitattu: 12.10.2021]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankoh-taista/blogi/2020/mustikkamaa>
- Alanen, R.; Koljonen, T.; Hukari, S. & Saari, P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. Espoo: VTT. [Viitattu: 9.9.2021]. Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/current-trends-in-energy-storage-technology>
- Arponen, T. 2018. Jättimäisillä luolalämpövarastoilla joustavuutta ja lisää uusiutuvaa energiaa. [Viitattu: 12.10.2021]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankoh-taista/blogi/2018/j%C3%A4ttim%C3%A4isill%C3%A4-luolal%C3%A4mp%C3%B6varastoilla-joustavuutta-ja-lis%C3%A4%C3%A4-uusiutuvaa-energiaa>
- Asiantuntijahaastattelu 1. [Puhelu]. Vaskiluodon Voima Oy:n asiantuntijaa haastatteli 19.10.2021 Patrick Yliluoto.
- Asiantuntijahaastattelu 2. [Puhelu]. Geologisen tutkimuskeskuksen asiantuntijaa haastatteli 21.10.2021 Patrick Yliluoto.
- Asiantuntijahaastattelu 3. [Sähköposti]. Helen Oy:n asiantuntijaa haastatteli 26.10.2021 Patrick Yliluoto.
- Asiantuntijahaastattelu 4. [Sähköposti]. Vantaan Energia Oy:n asiantuntijaa haastatteli 28.10.2021 Patrick Yliluoto
- Asiantuntijahaastattelu 5. [Puhelu]. Helen Oy:n asiantuntijaa haastatteli 12.11.2021 Patrick Yliluoto.
- Asiantuntijahaastattelu 6. [Sähköposti]. Oulun Energia Oy:n asiantuntijaa haastatteli 18.11.2021 Patrick Yliluoto.
- Berglund, S. 2020. Rock cavern as thermal energy storage. Diploma thesis. Sustainable Energy Engineering. Department of Engineering Sciences and Mathematics. Luleå: Luleå University of Technology. [Viitattu: 4.10.2021]. Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=-1349&pid=diva2%3A1441324>
- Bortolotti, M (ed.) 2017. European Energy Storage Technology Development Roadmap 2017 Update. [Viitattu: 12.9.2021]. Saatavissa: <https://ease-storage.eu/publication/ease-eera-energy-storage-technology-development-roadmap-2017/>
- Cabeza, LF (ed.) 2014. Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications. Elsevier Science & Technology, Cambridge. [Viitattu: 12.9.2021]. Saatavissa: ProQuest Ebook Central.
- Desai, F.; Prasad, J.; Muthukumar, P. & Rahman, M. 2021. Thermochemical energy storage system for cooling and process heating applications: A review. Energy Conversion and Management. Vol. 229. [Viitattu: 17.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420311456>
- Devrim, A.; Casey, S. & Riffat, S. 2015. The latest advancements on thermochemical heat storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 41, 356–367. [Viitattu: 17.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007308>

Doczekal, C. 2019. Fact Sheet: Heat Storages. Smart strategies for the transition in coal intensive regions. [Viitattu: 17.9.2021]. Saatavissa: https://tracer-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/10/TRACER_D2.1-Heat-Storages.pdf

EPV Energia Oy 2020. Tulevaisuuden lämpöenergiavarasto otettiin käyttöön Vaasassa. [Viitattu: 19.10.2021]. Saatavissa: <https://www.epv.fi/ajankohtaista/tulevaisuuden-lampoenergiavarasto-otettiin-kayttoon-vaasassa>

Fleuchaus, P.; Godschalk, B.; Stober, I. & Blum, P. 2018. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 94, 861–876. [Viitattu: 19.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304933>

Galkin-Aalto, M. 2018. Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustikkamaalle. [Viitattu: 11.10.2021]. Saatavissa: https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus

GTK 2019. Helsingin geoenergiapotentiaali. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. [Viitattu: 5.10.2021]. Saatavissa: https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Helsingin_geoenergiapotentiaali_luonnos.pdf

GTK 2017. Suomen kallioperä. Karttapalvelut. [Paikkatietopalvelu]. [Viitattu: 19.10.2021]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/palvelut/aineistot-ja-verkkopalvelut/karttapalvelut/>

Guruprasad, A.; Yaxue, L. & Guiying, F. 2018. An overview of thermal energy storage systems. Vol. 144, 341–378. [Viitattu: 12.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.turkuamk.fi/science/article/pii/S036054421732056X?via%3Dihub>

Helen Oy 2018. Kruunuvuorenrannan kallioluoliin suunnitellaan lajissaan maailman ensimmäistä energian kausivarastoa. [Viitattu: 10.10.2021]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2018/kruunuvuorenranta>

Helen Oy 2021. Mustikkamaan jättimäiset lämpöluolat ovat nyt täynnä vettä. [Viitattu: 12.10.2021]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2021/ilmastoteko-jalkojemme-alla-mustikkamaan-j%C3%A4ttim%C3%A4iset-l%C3%A4mp%C3%B6luolat-ovat-nyt-%C3%A4ynn%C3%A4-vett%C3%A4>

Hellström, G. 2015. Ny bergrumsteknik. [Viitattu: 21.12.2021]. Saatavissa: https://www.icax.co.uk/pdf/REHAU_Hellstrom_UTES.pdf

Hyvärinen, M.; Suoninen, E. & Vuori, J. n.d.. Haastattelut. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tietoarkisto [toimittaja, ylläpitäjä ja tuottaja]. [Viitattu: 18.11.2021]. Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/kvaliohjeet/#Viittaushje>

Imatran Voima Oy 1996. Oulun kalliolämpövaraston mallikokeet IVON koekeskuksessa. [Oulun asiantuntijahaastattelun materiaali]. [Viitattu: 2.12.2021].

IRENA 2013. Thermal Energy Storage: Technology brief. [Viitattu: 9.9.2021]. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2013/Jan/Thermal-energy-storage>

IRENA 2020. Innovation Outlook: Thermal Energy Storage. [Viitattu: 12.9.2021]. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>

Kukkonen, I. & Peltoniemi, S. 1995. Kivilajien lämmönjohtavuus Suomessa: yhteenveto mittauksista 1964–1994. Geologian tutkimuskeskus. [Viitattu: 5.10.2021]. Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/q18_95_1.pdf

Lautkankare, R.; Kääriä, J.; Martinkauppi, B.; Salomaa, N.; Sivula, T.; Aarola, T.; Tuominen, P.; Toijala, I.; Klemola, J. & Pulliainen, M. 2020. Lämpöenergian kausivarastointi. Ohjekortti. Helsinki: Rakennustieto Oy. [Viitattu: 18.9.2021]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto-kauppa.fi/sivu/tuote/rt-103137-lampoenergian-kausivarastointi/2742552>

- Leiwo, H. 2019. Yli 210 000 kuutiometrin maanalaisesta luolastosta tulee Suomen suurin lämpöenergiavarasto Vaasassa. Yle uutiset. [Viitattu: 19.10.2021]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10980939>
- Martens, D (ed.) 2013. Technical annex – European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030. [Viitattu: 18.9.2021]. Saatavissa: <https://ease-storage.eu/publication/easeera-energy-storage-technology-development-roadmap-towards-2030/>
- Nordell, B. 2000. Large-Scale Thermo Energy Storage. [Viitattu: 1.10.2021]. Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1001440/FULLTEXT01.pdf>
- Nordell, B. 2012. Underground Thermal Energy Storage (UTES). Innostock 2012. [Viitattu: 30.9.2021]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/288028431_Underground_thermal_energy_storage_UTES
- Oulun Energia Oy 1996. Toimintakuvaus. Oulun luolalämpövarasto. [Oulun asiantuntijahaastattelun materiaali]. [Viitattu: 2.12.2021].
- Park, D.; Kim, H-M.; Ryu, D-W.; Choi, B-H.; Sunwoo, C. & Han, K-C. 2013. The effect of aspect ratio on the thermal stratification and heat loss in rock caverns for underground thermal energy storage. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 64, 201–209. [Viitattu: 15.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160913001548>
- Park, D.; Park, E-S. & Sunwoo, C. 2014a. Heat transfer and mechanical stability analyses to determine the aspect ratio of rock caverns for thermal energy storage. Solar Energy. Vol. 107, 171–181. [Viitattu: 24.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14002965>
- Park, J-W.; Park, D.; Ryu, D-W.; Choi, B-H. & Park, E-S. 2014b. Analysis on heat transfer and heat loss characteristics of rock cavern thermal energy storage. Engineering Geology. Vol. 181, 142–156. [Viitattu: 24.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379521400163X>
- Pielichowska, K. & Pielichowski, K. 2014. Phase change materials for thermal energy storage. Progress in Materials Science. Vol. 65, 67–123. [Viitattu: 14.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.turkuamk.fi/science/article/pii/S0079642514000358?via%3Dihub>
- Ritola, J. & Sipilä, K. 1989. Converting an old rock cavern oil storage into heat storage. Laboratory of electrical and automation engineering. Technical research centre of Finland. [Viitattu: 22.10.2021]. Saatavissa: https://www.academia.edu/19272570/Converting_and_old_rock_cavern_oil_storage_to_a_heat_storage_in_Oulu
- Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006a. KvaliMOTV – Laadullisen tutkimuksen elementit. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto [ylläpitäjä ja tuottaja]. [Viitattu: 17.11.2021]. Saatavissa: https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/kvali/L1_2_2.html
- Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006b. KvaliMOTV – Aineiston hankinta. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto [ylläpitäjä ja tuottaja]. [Viitattu 17.11.2021]. Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/kvali/L6.html>
- Saaranen-Kauppinen, A. & Puusniekka, A. 2006c. KvaliMOTV – Aineiston määrä ja tutkittavat. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto [ylläpitäjä ja tuottaja]. [Viitattu: 17.11.2021]. Saatavissa: https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/kvali/L6_2.html
- Sarbu, I. & Sebarchievici, C. 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability (Switzerland). [Viitattu: 9.9.2021]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/322757998_A_Comprehensive_Review_of_Thermal_Energy_Storage

Sharma, A.; Tyagi, VV.; Chen, CR. & Buddhi D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13: Issue 2, 318–345. [Viitattu: 14.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.turkuamk.fi/science/article/pii/S1364032107001402?via%3Dihub>

Suomen Kansallinen Geologian Komitea (SKGK) 2019. Geoenergia. [Viitattu: 30.9.2021]. Saatavissa: <https://www.geologia.fi/2019/12/31/geoenergia/>

The Community Research and Development Information Service (CORDIS) 1999. Rock cavern heat storage In Oulu, Finland. European Comission. [Viitattu: 10.10.2021]. Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/id/BU.-00325-95>

Vaasan sähkö Oy 2019. Massiivinen maanalainen energiavarasto Vaasan Vaskiluotoon. [Viitattu: 19.10.2021]. Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/massiivinen-maanalainen-energiavarasto-vaasan-vaskiluotoon?publisherId=58661976&releaseId=69859866>

Vantaan Energia Oy 2021a. VECTES – lämmön kausivarasto. [Viitattu: 13.10.2021]. Saatavissa: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20210528155516/Vantaan_Energia_White_Paper_2_VECTES_FI_260521-1.pdf

Vantaan Energia Oy 2021b. Lämmön kausivarasto -esitysmateriaali. Esitysmateriaali, 1 – 68. [online-yleisötilaisuus 31.8.2021]. [Viitattu:13.10.2021]. Saatavissa: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20210902142946/Lammon-kausivarasto-yleisotilaisuus-31082021-esitykset.pdf>

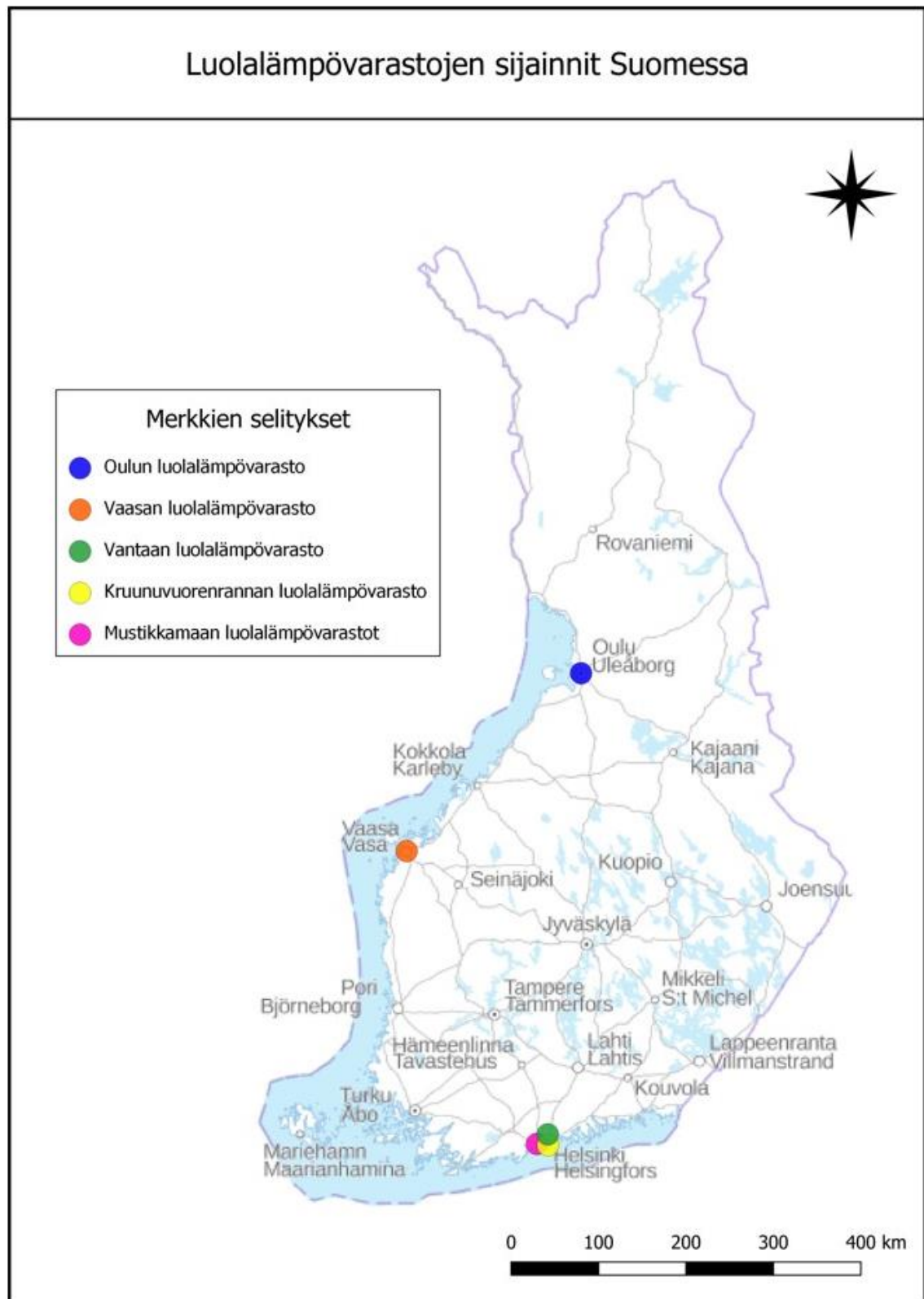
Vantaan Energia Oy n.d.. Maailman Suurin lämmön kausivarasto Vantaalle. [Viitattu: 13.10.2021]. Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/fossiiliton-2026/maailman-suurin-lammon-kausivarasto-vantaalle/>

Viksten, S. 2018. Värmelagring i berggrum på Haraholmen i Piteå. Examensarbete. Hållbar energiteknik. Institutionen för teknikvetenskap och matematik. Piteå: Luleå tekniska universitet. [Viitattu: 4.10.2021]. Saatavissa: <http://tu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1219404&dsid=-1349>

Yang, T.; Liu, W.; Kramer, G. & Sun, Q. 2021. Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 139. [Viitattu: 18.9.2021]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121000290>

Ympäristöministeriö 2013. Energiakaivo-opas: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. [Viitattu: 4.10.2021]. Saatavissa: <file:///C:/Users/PC/Desktop/Study/AMK/Insin%C3%B6r%C3%B6n%C3%B6n/Tutkimus/Materiaalit/Tutkimukset,artikkelit,%20tiedotteet,%20ohjeet/Energiakaivo.pdf>

Liite 1. Luolalämpövarastojen sijainnit Suomessa



Karttapohja: Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelu.