

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Paula Hiltunen

LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI JA BTES- JÄRJESTELMÄT

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2022 | 78 sivua, 2 liitesivua

Paula Hiltunen

LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI JA BTES-JÄRJESTELMÄT

Suomessa lämmitysenergian tarpeella on suuri rooli energian kokonaiskäytöstä. Suomi on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali vuonna 2035. Lämmönvarastoinnilla ja geoenergian hyödyntämisellä on tässä iso merkitys. Geoenergian hyödyntämistapoja on useita kuten myös erilaisia kausivarastointeja. Maanalaiseen lämpövarastoon voidaan ladata muun muassa aurinkolämpöä ja teollisuuden hukkalämpöä. Aihealueena lämmönvarastointi ja geotermisen energian hyödyntäminen ovat mielenkiintoisia ja ala kehittyy jatkuvasti.

Opinnäytetyössä käsitellään geoenergian potentiaalia Suomessa. Erilaisia kausivarastointeja ja kohteita niin Suomesta kuin ulkomailta esitellään lyhyesti. Kausivarastoinneissa perehdytään laajemmin BTES-järjestelmiin ja niihin vaikuttaviin parametreihin. BTES-järjestelmiä on useita ja tässä keskitytään etenkin matalan geotermisen energian- sekä keskisyvän geotermisen energian varastointeihin.

Huomioitavaa on, että esiteltävissä kohteissa on mukana eri hankkeiden pilotointikohteita. Osa kohteista on ollut jo toiminnassa. Pilotointikohteet antavat aina tärkeää tietoa ja auttavat kehittämään teknologiaa. Tämän arvoa ei voida mitata rahallisesti.

Asiasanat:

Geoenergia, geoterminen energia, kausivarastointi, maanalainen lämpövarasto, BTES

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environment engineering

2022 | 78 pages, 2 pages in appendices

Paula Hiltunen

THERMAL ENERGY SEASONAL STORAGE AND BTES-SYSTEMS

In Finland, the need for heating energy plays a large role in total energy use. Finland has set the goal of being carbon neutral in 2035. Heat storage and the utilization of geo energy are of great importance here. There are several ways of utilizing geoenergy, as well as different seasonal storages. For example, solar heat and industrial waste heat can be loaded into an underground heat storage. As a subject area, heat storage and the utilization of geothermal energy are interesting and the field is constantly developing.

The thesis discusses the potential of geoenergy in Finland. Various seasonal storages and items from both Finland and other countries are briefly presented. In seasonal storage, we learn more about BTES systems and the parameters that affect them. There are several BTES systems and here the focus is especially on the storage of shallow geothermal energy and medium deep geothermal energy.

It should be noted that the presented sites include pilot sites of different projects. Some of the sites have already been in operation. Pilot sites always provide important information and help develop technology. The value of this cannot be evaluated in money.

Keywords:

Geoenergy, geothermal energy, seasonal storage, underground heat storage, BTES

SISÄLTÖ

KÄYTETTYÄ SANASTOA	8
1 JOHDANTO	9
2 GEOENERGIAA - lämpöä maasta	10
2.1 TES (Lämpöenergian varastointi)	13
2.1.1 Lämpöenergian varastointimenetelmien jaottelu	14
2.1.2 SHS (Tuntuva lämpövarastointi)	16
3 KAUSIVARASTOINTIIN LIITTYVÄT JÄRJESTELMÄT	17
3.1 ATES (Pohjaveden lämpövarasto)	19
3.1.1 ATES-järjestelmä Askon alue Lahdessa, Suomi	20
3.1.2 ATES-järjestelmä Arlandan lentokenttä, Ruotsi	20
3.2 CTES (Kalliolämpövarasto)	21
3.2.1 CTES-järjestelmä Lyckebo, Ruotsi	22
3.2.2 CTES-järjestelmä Vantaa, Suomi	22
3.3 PCMES (Faasimuutosmateriaalin energiavarasto)	23
3.3.1 Lumivarastointi Sundvallissa, Ruotsi	25
3.4 PTES (Allaslämpövarasto)	25
3.4.1 PTES-järjestelmä Vojensin kaukolämpö, Tanska	26
3.4.2 PTES-järjestelmä Langkazissa, Tiibet	27
3.5 SSTES (Kiinteän aineen lämpövarasto (Solid State))	28
3.5.1 SSTES-järjestelmä Kankaanpäässä Vatajankoskella, Suomi	28
3.6 TTES (Säiliölämpövarasto (vesi))	29
3.6.1 TTES-järjestelmä Münchenissä, Saksa	30
4 BTES-JÄRJESTELMÄT	32
4.1 Huomioitavia olosuhteita ja parametreja	33
4.1.1 Lämpöominaisuudet	33
4.1.2 Ympäristöasiat	40
4.2 Matalan geotermisen energian lämpövarastot	40

4.2.1 Lämpövarasto Toholammen Härkänevilla Finn Springin juomatehtaalla, Suomi	42
4.2.2 Lämpövarasto Danderydissä Annebergin asuinalueella, Ruotsi	45
4.3 Energiapaalut	48
4.3.1 Skanssin Torni Turussa, Suomi	50
DTS-mittaus Skanssin Tornissa 26.- 27.2.2021	52
4.3.2 Turun Toriparkki, Suomi	56
4.4 MD-BTES (Keskisyvä porareiän lämpöenergiavarastointi)	59
4.4.1 Salon Korvenmäen Ekovoimalaitos, Suomi	63
4.4.2 Darmstadtin teknillinen yliopisto, Saksa	66
5 PÄÄTELMÄT	69
LÄHTEET	70

LIITTEET

Liite 1. Finn Springin lämpövarastointijärjestelmän prosessikaavio.

Liite 2. Prosessikaavioiden piirrosmerkkejä ja virtaavien aineiden merkit.

KAAVAT

Kaava 1. Kinemaattinen viskositeetti (Dunn, 5).	38
Kaava 2. Lämpöpumpun hyötysuhde COP (Maalämpö Tietoportaalit 2022).	39
Kaava 3. Maalämpöpumpun tuottama lämmitysenergia (Heinonen ym. 2021, 8).	39

KUVAT

Kuva 1. Varastointimenetelmien luokitusta ja olomuodon muutokset (Socaciu 2012, 2).	15
Kuva 2. Maanalaisia lämpöenergian tekniikoita (Laloui ym. 2020, 16).	18
Kuva 3. Kuvaus yhdestä lämpö- ja kylmäkaivosta (Cabeza 2014, 112).	21
Kuva 4. Lyckebon CTES-järjestelmän kuvaus (Choi 2012).	22

Kuva 5. VECTES-järjestelmän kuvaus (Vantaan Energia 2022).	23
Kuva 6. PCM-materiaalien jaottelua lämpötilojen mukaan (Sarbu ym. 2018, 15).	24
Kuva 7. Sundvallin jäävaraston järjestelmän kuvaus (Nordell 2015, 16).	25
Kuva 8. Vojensin allaslämpövarasto (Roussel 2020).	27
Kuva 9. Kuvia allasvaraston rakennusvaiheista (Aalborg CSP 2022).	27
Kuva 10. Hiekkavaraston toimintaperiaatteen kuvaus (Eronen 2022).	29
Kuva 11. Münchenin TTES:n pystyleikkaus rakenteineen (Mangold ym., 4).	31
Kuva 12. Geotermisen energian termistöä syvyyksien suhteen (Arola 2022).	32
Kuva 13. Kollektoriputkien tyyppejä vasemmalta oikealle: U-putki, kaksois U-putki sekä koaksiaaliputki (Bakema ym. 2019, 59).	35
Kuva 14. Muovitechin 850 m testiporakaivo (kuva Hiltunen 2022).	36
Kuva 15. Muovitechin kokoomakaivo (kuva Hiltunen 2022).	38
Kuva 16. Finn Springin lämpövarasto-järjestelmä (EVAKOT-hanke, Centria 2022).	42
Kuva 17. Porakaivon rakenne ja maaperän koostumusta (KS-Geoenergi 2022).	43
Kuva 18. Vasemmalla lämpökaivot ennen päällisosan valmistusta ja oikealla kehien rakenne (Sander 2022).	44
Kuva 19. Vasemmalla kuva (a) aurinkokeräimistä asuntojen katolla ja oikeanpuoleisessa (b) järjestelmän yleiskuva (Lund 2009, (a) 64, (b) 65).	46
Kuva 20. Annebergin lämmönjakelujärjestelmän toimintaperiaate lämpötilat huomioiden (Bales ym. 2011, 2).	47
Kuva 21. Pohjapiirustus energiapaalujen sijainnista (Lautkankare 2021).	51
Kuva 22. Kuvassa Toriparkin energijärjestelmä (Turun kaupunki 2019).	57
Kuva 23. Vasemmalla Toriparkin katossa oleva jakotukki ja oikealla kuvassa torialueen päällisen sulanapitojärjestelmän ja lämpökeräimien asennusta (Hiltunen 2022).	58
Kuva 24. Vasemmalla puolella lämmön lataus ja oikealla puolella lämmön purku koaksiaalisessa lämmönvaihtimessa (Bär ym. 2015, 2).	62
Kuva 25. Lämpöjärjestelmän toimintaperiaate (Lund ym. 2020).	64
Kuva 26. Kuvassa vasemmalla lämpökaivojen sijoituspaikka (Hiltunen 2022) ja oikealla lämpökaivon kannen kokoa, jonka läpimitta on noin 70 cm (QHeat 2021).	65
Kuva 27. Lämpövaraston suunniteltu sijainti alueella vasemmalla ja oikealla porareikien sijoittelu rakennusvaiheineen (Bossennec ym., 2022, 7).	67

KUVIOT

Kuvio 1. Maankamaran lämpötilat eri vuodenaikoina 16 m syvyyteen. (Aumo ym. 2012, 36).	11
Kuvio 2. Lämmönsiirtonesteiden kinemaattisen viskositeetin vertailu eri lämpötiloissa (Muovitech 2022).	37

Kuvio 3. Annebergin lämpövarastoinnin ja jakelun energialuvut vuonna 2010 (Bales ym. 2011, 7).	48
Kuvio 4. Skanssissa suoritetuista mittauksista kolmen mittauksen käyrät (Hiltunen 2022).	54
Kuvio 5. 26.–27.2. suoritettujen mittausten pisteet kohdassa 1 092,052 m (Hiltunen 2022).....	55
Kuvio 6. Lineaarisuuskäyrä 26.2. mittauksista kohdassa 1092,052 m (Hiltunen 2022).	55

TAULUKOT

Taulukko 1. Etelä-Suomen graniitin kallioperän lämpötiloja syvyyden suhteen (Geologian tutkimuskeskus 2018).	11
Taulukko 2. Toimitettuja lämpöpumppuja vuonna 2021 tehojen mukaan (Sulpu 2022).	12
Taulukko 3. Maalajien termisien ominaisuuksien arvoja (Alanen ym. 2003, 13).	34
Taulukko 4. Lämpöenergiantuotanto VIT-putkella (Arola ym. 2022, 11).	60
Taulukko 5. Koaksiaaliputken parametreja (Bossennec ym., 7).	67

KÄYTETTYÄ SANASTOA

Sana	Sanan selitys
spot-markkinat (s.28)	Lyhyen aikataulun sähkömarkkinat. Antavat markkinatoimijoille mahdollisuuden korjata tuotanto- ja kulutussuunnitelmiaan päiväkohtaisesti. (FINGRID 2022.)
Fingridin taajuudensäätömarkkinat (s. 28)	Sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottaminen (FINGRID 2022).
priimaaminen (s. 28)	Esim. hukkalämmön lämpötilan nosto ennen kaukolämpöverkkoon syöttämistä (Sirola ym. 2018).

1 JOHDANTO

Suomi on asettanut itselleen ilmasto- ja energiastrategiassaan hiilineutraalius-tavoitteen toteutumisen vuoteen 2035 mennessä. Tämän lisäksi uusiutuvan energian RED II-direktiivissä Euroopan Union on asettanut yleistavoitteessaan, että uusiutuvien energialähteiden osuus tulee olla vähintään 32 % vuonna 2030. Suomi on ilmoittanut tavoitteekseen tässä 51 %. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022.) Rakennusten lämmitykseen kuluu Suomessa noin 25 % käytetystä energiasta (Ilmasto-opas 2022).

Aurinko- ja tuulienergian ollessa säätilasta riippuvaisia, geoenergia tarjoaa vakaan energialähteen. Geoterminen energia vähentää riippuvuutta uusiutumattomiin energialähteisiin sekä vähentää poliittisista tilanteista johtuvia toimitushäiriöitä parantamalla maan omaa energian saannin omavaraisuutta. (Laloui ym. 2020, 14.)

Opinnäytetyö käsittelee geotermistä energiaa ja sen erilaisia hyödyntämismahdollisuuksia. Lämpövarastointijärjestelmiä on myös lukuisia, joita tarkastellaan esimerkkikohtein. Kohteita esitellään niin Suomesta kuin ulkomailta. Osa kohteista on ollut toiminnassa jo useamman vuoden ajan, osa on vasta pilotointivaiheessa. Työssä on pyritty huomioimaan myös ympäristönäkökulmia.

Lämpövarastoinnilla kyetään tasoittamaan energiankulutusta varastoimalla lämpöä silloin, kun sitä on tarjolla ylimäärin hyödyntäen sitä, kun lämpöä tarvitaan enemmän. Opinnäytetyössä lämpövarastointitekniikoista perehdytään lähemmin BTES-järjestelmiin (Borehole Thermal Energy Storage eli porakaivon lämpöenergian varastointi) ja sen suunnittelussa huomioitaviin tekijöihin. BTES-järjestelmistä esitetään yksityiskohtaisemmin matalan sekä keskisyvän geotermisen energian lämpövarastoja kohde-esimerkein.

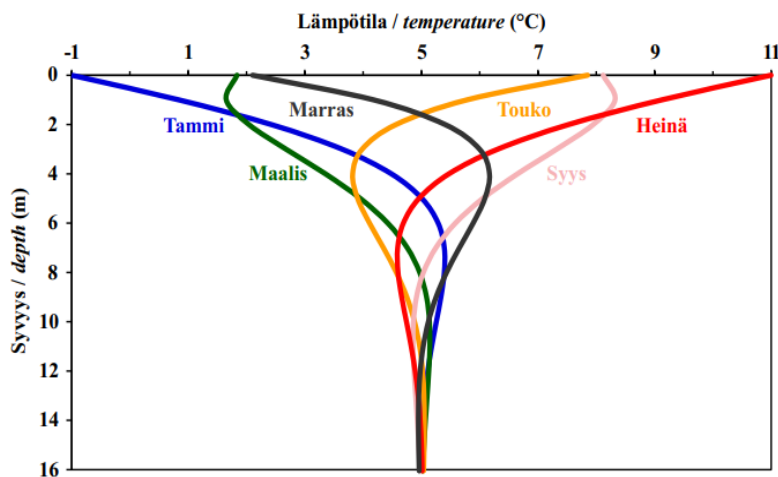
Opinnäytetyössä lähdemateriaalina on käytetty useita eri artikkeleita, alan yritysten verkkosivuja, opinnäyte- ja diplomitöitä, alan kirjallisuutta sekä asiantuntijahaastatteluita.

2 GEOENERGIAA - lämpöä maasta

Geoenergialla (matala geoterminen energia) tarkoitetaan maa- ja kallioperään sekä vesistöihin varastoitunutta lämpöenergiaa, joka on varastoitunut tähän pääosin auringon säteilystä. Tätä hyödynnetään pääosin noin metrin syvyyteen asennettavalla vaakaputkistolla talvella lämmityksen tukemiseen ja kesällä viilennykseen. (Ahtola ym. 2012.) Matalaa geotermistä energiaa hyödynnetään myös muun muassa yksittäisillä porareillä kallioperästä noin 100–400 metrin syvyydeltä. Yli 500 metrin syvyyteen mentäessä kyseessä on keskisyvä geoterminen energia ja maan sisuksissa oleva lämpö vaikuttaa enemmän lämpöenergian määrään aina syvemmälle mentäessä. Korkean geotermisen energian porakaivot (yli 3 000 m) vaativat Suomen olosuhteissa 6 000 metrin syvyyden yltääkseen 100 °C. (Huusko 2016.) Geoterminen energia on peräisin kiven radioaktiivisista hajoamisista ja ydinreaktioista sekä kuumasta magmasta syvällä maan sisällä. Tuloksena oleva lämpö leviää ylempään kerrokseen maankuoreen, jossa sitä voidaan hyödyntää lämpöenergian tuottamiseen eri menetelmin. (Energiateollisuus 2022.)

Maankamaran lämpötila vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan. Suomessa ilman vuoden keskilämpötila vaihtelee Etelä-Suomen 5 °C:sta Pohjois-Suomen -2 °C:seen maanpinnan keskilämpötilan ollessa muutaman celsiusasteen ilman keskilämpötilaa korkeampi. Pintalämpötilojen vaihtelu vuoden aikojen mukaan tasoittuu syvemmälle maaperään mentäessä. Noin 15 m syvyydessä maankamaran lämpötila on ympäri vuoden Etelä-Suomessa 6–10 °C ja pohjoisessa 2–3 °C. (Ahtola ym. 2012, 35.)

Alla oleva kuvio havainnollistaa ilman lämpötilan vaikutusta maankamaran lämpötilaan.



Kuvio 1. Maankamaran lämpötilat eri vuodenaikoina 16 m syvyyteen. (Ahtola ym. 2012, 36).

Syvennälle mentäessä geotermisen energian vaikutuksesta lämpötila nousee noin $0,5\text{--}1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Korkeimmillaan lämpötilat 300 m syvyydellä ovat noin $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ Etelä-Suomessa 1 000 m:n syvyydessä lämpötila vaihtelee välillä $14\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Geotermisissä lämpömalleissa lasketut arvot viittaavat siihen, että yli $40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilan saavuttamiseksi tulee porareian ylettyä noin 2 000 m syvyyteen. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$:n saavuttamiseksi tarvitaan jo 6 000–8 000 m syvyyksiä. (Kallio 2019.) Alla olevassa taulukossa Etelä-Suomen lämpötiloja syvyyden funktiona.

Taulukko 1. Etelä-Suomen graniitin kallioperän lämpötiloja syvyyden suhteen (Geologian tutkimuskeskus 2018).

Graniitti, Etelä-Suomi;
lämpötila syvyyden funktiona

Syvyys (m)	T ($^{\circ}\text{C}$)
500	15
1000	23
2000	39
3000	54
4000	70
5000	86
6000	102
7000	118
8000	133

Suomessa keskimääräinen kiven lämmönjohtavuus on 3,24 W/m*K. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavat monet tekijät mineraalikoostumuksesta pohjaveden liikkeisiin. (Kallio 2019.) Yhden 300 m syvän kairausalueen hyötyenergiamäärä vaihtelee etelän 4,5 GWh pohjoisen 0,6 GWh välillä (Arola ym. 2019).

Suomessa ei ole vielä valtakunnallista tietopankkia toteutetuista kohteista. Geoenergian hyödyntämisen yleistymistä ja laajuutta kuvastaa tällä hetkellä parhaiten SULPUN tilastoimat lämpöpumppujen määrät. (Arola 2022.) Lämpöpumppua tarvitaan useimmiten nesteen lämpötilan nostamiseksi. Tilastokeskuksen mukaan vuoden 2020 lämpöpumpuilla tuotettavan asumisen energiakulutuksiin menevä tuotanto oli 5 811 GWh, joka on 9,5 % kaikista energialähteistä. (Tilastokeskus 2021.) Toimitettujen lämpöpumppujen määrät samana vuonna löytyvät Sulpun tilastoista. Taulukko alla osoittaa lämpöpumppujen kysynnän kasvua. Myös mitoituslämpötehoiltaan suuremmat lämpöpumput ovat lisääntyneet maalämpöpumpuissa (MLP). (Sulpu 2022.)

Taulukko 2. Toimitettuja lämpöpumppuja vuonna 2021 tehojen mukaan (Sulpu 2022).

Toimitetut lämpöpumput 2021 (2020) teholuokittain

Lämmönlähde	Lämmönjako	Vuosi	Mitoituslämpöteho (kW)					Yhteensä	Muutos %
			0-6	7-10	11-25	26-100	101-		
Ulkoilma	Vesi (UVLP)	2021	956	5629	5514	317		12416	57,3 %
		2020	705	3934	3024	229		7892	
	Ilma (ILP)	2021	98522	4014	476	124		103136	25,5 %
		2020	78217	3467	425	79		82188	
Poistoilma	Vesi, ilma (PILP)	2021	4307					4307	20,7 %
		2020	3569					3569	
Maa, vesi, kallio, hukkalämpö	Vesi, ilma (MLP)	2021	1510	2334	4170	1428	74	9516	10,1 %
		2020	1947	1973	3582	1125	17	8644	
Yhteensä		2021	105295	11977	10160	1869	74	129375	26,5 %
		2020	84438	9374	7031	1433	17	102293	

2.1 TES (Lämpöenergian varastointi)

Lämpöenergian varastointi (TES, Thermal Energy Storage) on yksi energian varastoinnin muoto. Materiaalit kykenevät ottamaan vastaan lämpöenergiaa ja luovuttamaan sitä. Näiden ominaisuuksien hyödyntäminen mahdollistaa erilaisten materiaalien käytön. Materiaalien erilaisilla lämpöominaisuuksilla voidaan saavuttaa erilaisia tuloksia ja teknisiä ratkaisuja lämpöenergian varastointeihin esimerkiksi lämmitys ja jäädytys. TES:n etuina ratkaistaessa energiakysynnän piikkejä ja siirtymisessä energiaystävällisempään yhteiskuntaan ovat varastointien suomat mahdollisuudet tasapainottaa energian kysyntää ja tarjontaa päivittäin, viikoittain tai pelkästään kausiluonteisesti. (Dincer ym. 2011, 84–85.)

Lämpöenergian varastointi on hyödynnettävissä usean eri järjestelmän yhteydessä. Järjestelmiä ovat muun muassa aurinkolämpö, lämpövarastointi rakennusten rakenteisiin, hukkalämmön hyödyntäminen, kaukolämpöjärjestelmien yhdistäminen sekä lämpöpumput. Aurinkolämpöjärjestelmät ovat olleet yksi yleisimmistä. Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen ja samalla fossiilisista luopuminen aiheuttaa kuormituksen epätasapainoa tarjonnan ja kysynnän välillä. Tämä lisää entisestään energianvarastointijärjestelmien tutkimuksen ja kehityksen merkitystä.

Lämpöenergianvarastoinnin katsotaan myös olevan huomattavasti edullisempaa kuin sähkön varastoinnin ja se sisältää potentiaalisia kykyjä integroida ajoittaisia energialähteitä kuten tuuli- ja aurinkoenergiaa lämmityksen ja jäädytyksen osalta. TES tarjoaa useita etuja mukaan lukien huippulämpötilavaatimusten vähentäminen ja järjestelmän tehokkuuden. (IRENA 2020, 12,15,49,99.)

TES-sovelluksissa peruserä on syöttää energiaa sen myöhempää käyttöä varten. Muuttuvia elementtejä ovat varastoinnin laajuus sekä käytettävä varastointimenetelmä. Lämpöenergian varastointiprosessia kuvaa kolmen sykli,

joiden vaiheet ovat lataus, varastointi ja purkaus. (Dincer ym. 2011, 86.) TES-järjestelmän suunnittelun päävaatimukset ovat:

- Korkea energiatiheys säilytysmateriaalissa (varastointikapasiteetti).
- Yhteensopivuus säilytysmateriaalin ja säiliömateriaalin välillä.
- Hyvä lämmönsiirto lämmönsiirtonesteen ja varastointimateriaalin välillä.
- Varastointimateriaalien mekaaninen ja kemiallinen vakaus.
- Useiden jaksojen täydellinen palautuvuus.
- Varastoinnin aikana pienet lämpöhäviöt.
- Helppo ohjaus.

Näiden lisäksi tärkeimpiä suunnittelussa huomioitavia asioita ovat toiminta suunnitelma, tarvittava enimmäiskuorma, nimellislämpötila ja entalpian pudotus sekä integrointi koko sovellusjärjestelmään.

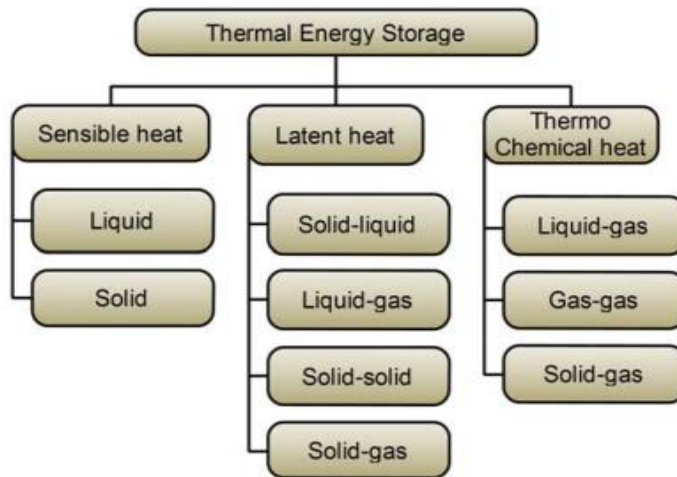
Puhuttaessa lämpökenttien suureista sopivaa TES-menetelmää valittaessa, on huomioitava kaksi suuretta: johdettu lämpökuorman vähennys, jolla tarkoitetaan kapasiteetin pienentämistä nykyisestä käyttämättä mitään energian varastoinnista sekä lämpö/sähköenergian säästöt. Energiansäästöillä taas tarkoitetaan varastoitua lämpöä tai kylmää, jota voidaan käyttää yhä uudelleen. (Cabeza 2014, 2.)

2.1.1 Lämpöenergian varastointimenetelmien jaottelu

Energian varastoinnissa käytetyn lämpömekanismien mukaan TES voidaan luokitella kolmeen järjestelmätyyppiin: Tuntuva lämpövarastointi (SHS, Sensible Heat Storage), piilevä lämpövarastointi (LHS, Latent Heat Storage) ja termokemiallinen lämpövarastointi (THS, Thermochemical Heat Storage). Näiden erot muodostuvat muun muassa materiaaleista ja toimintalämpötilasta. (Sarbu ym. 2018, 3.) Tärkeäksi muodostuu myös varastointiaika. Nämä luokitellaan joko lyhytaikaiseksi tai pitkäaikaiseksi riippuen kylmän tai lämmön varastointiajasta. Tuntuvan lämmönvarastoinnissa materiaalin lämpöä nostetaan tai lasketaan. Materiaaleja ovat yleensä kiinteät aineet ja nesteet.

Piilevässä lämmönvarastoinnissa taas materiaalin olomuotoa muutetaan kiinteästä nesteeksi tai nesteestä höyryksi. Molemmat mekanismit voivat esiintyä samassa materiaalissa, jolloin puhutaan faasimuutosmateriaaleista (PMC, Phase Change Material). Kolmas mekanismi on termokemiallinen reaktio tai sorptioprosessi, joka tapahtuu materiaalin pinnalla. Sorptiolla tarkoitetaan aineen poistumista nesteestä tai kaasusta absorboitumalla. Varastoinnit voivat olla suljettuja tai avoimia järjestelmiä. (Cabeza 2014, s. 2–3, 5, 7–8.)

Alla olevassa kuvassa eri varastointimenetelmien jaottelu ja olomuodon muutokset.



Kuva 1. Varastointimenetelmien luokitusta ja olomuodon muutokset (Socaciu 2012, 2).

Varastointijärjestelmät ovat joko aktiivisia tai passiivisia järjestelmiä. Aktiivisen varastoinnin järjestelmälle on ominaista lämmönsiirto pakkokonvektiolla varastointimateriaaliin. Pakotettu konvektio on lämmönsiirtomenetelmä, jossa ulkoiset välineet, kuten esimerkiksi pumppaus, vaikuttavat nesteen liikkeeseen. Passiiviset varastointijärjestelmät ovat yleensä kahden välineen varastointijärjestelmiä, jossa lämmönsiirtonesteitä kulkee varaston läpi vain kiinteän aineen lataamista ja purkamista varten. (Khyad ym. 2016,1187.)

2.1.2 SHS (Tuntuva lämpövarastointi)

SHS on TES-varastoinneista yleisimmin käytetty varastointimenetelmä. Tämä tarjoaa usein yksinkertaisimman ja halvimman säilytysmuodon, joka useimmiten on vesi. Tuntuvalle lämmönvarastoinnilla tarkoitetaan energian varastointia käyttäen lämpöenergiaa lämmittämällä tai jäähdyttämällä joko nesteen tai kiinteässä muodossa olevaa varastointimateriaalia sen muuttamatta olomuotoaan. Säilytysmateriaali voi olla esimerkiksi vesi, ilma, kallio, betoni tai tiili. Jokaisella materiaalilla on omat fysikaaliset ominaisuutensa, jotka määrittävät hyödyt sekä haitat varastointimateriaalina. Yleensä materiaali valitaan sen lämpökapasiteetin sekä käytettävissä olevan säilytystilan perusteella.

Tuntuvan lämmönvarastointijärjestelmän varastointikapasiteetti on yleensä 10–50 kWh:n välillä ja tehokkuus vaihtelee 50 %:n ja 98 %:n välillä riippuen käytetyistä erityistekniikoista ja varastointivälineen ominaislämpökapasiteetista. Tuntuviin tekniikoiden haittoina voidaan pitää esimerkiksi lisälämmön tarvetta, varastointiajan vaatimukset sekä mahdollisia lisätoimenpiteitä, joilla varastointi säilyttää tavoitelämpötilansa.

Tuntuviin lämmönvarastointimenetelmiin kuuluvat:

- UTES (maanalainen lämpöenergian varastointi).
- Solid state lämpövarasto (esim. betoni, kivet ja keraamiset tiilet).
- TTES (joissa vesi tallennusvälineenä).
- Sulat suolat (IRENA 2020, 53–54.).

3 KAUSIVARASTOINTIIN LIITTYVÄT JÄRJESTELMÄT

Kausiluonteisen lämpöenergian varastoinnin teknologiaa on tutkittu jo 70-luvun puolesta välistä alkaen. Ensimmäiset suuremman mittaluokan koelaitokset olivat Ruotsissa vuosina 1978 ja 1979.

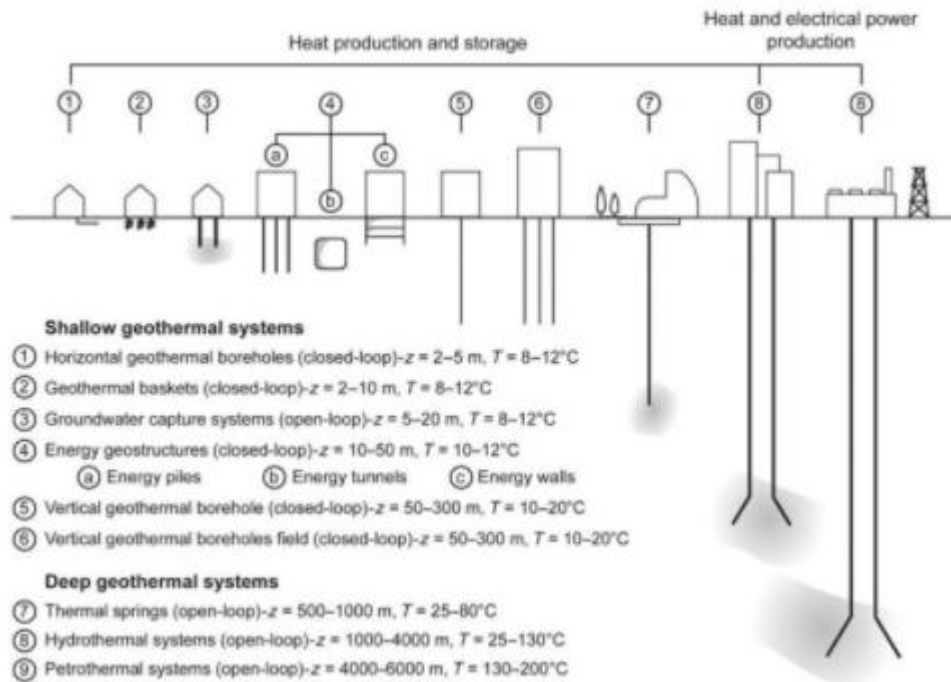
Kausiluonteinen lämpöenergian varastointi mahdollistaa fossiilisten polttoaineiden korvaamisen aurinkoenergialla sekä lämpimän veden valmistuksen ja tilojen lämmityksen. Nämä rakennetaan useimmiten maan alle. Tähän on syynä mm. maan kyky lisätä eristystä ja luovuttaa maalämpöä, maanpaineen vaikutus kompensoimalla vedenpainetta varaston sisällä, jolloin varaston seinämien ei tarvitse olla niin tukevarakenteisia kuin maanpinnalle rakennettaessa. Suuret varastot ovat myös usein integroitu suoraan tietylle asuinalueelle.

Maanalaista varastointia (UTES) suunniteltaessa on aina tehtävä hydrologinen tutkimus. Olennaisia ovat mm. kivien ikä ja näiden kerrostumissuhteet, sijainti, pohjavesivirtaukset suuntineen ja virtausnopeuksineen. Lupakäsittelyt on aloitettava aikaisessa vaiheessa. (Deschaintre ym. 2015, 3, 7–8, 10.)

Järjestelmät koostuvat lämmönlähteestä, varastointitilasta sekä lämmönvaihtimesta. Lämmönlähteenä voi toimia maaperä itsessään, aurinkoenergia sekä rakennusten ja teollisuuden hukkalämmöt. Varastointitila voi olla muodostettu maaperän geologisista kerroksista, hiekasta tai kallioperästä, pohjavesikerroksista tai keinokuopista, jotka on täytetty vedellä. (Cabeza 2014, 11.)

Lämpöenergian varastointi ei yksinään riitä turvaamaan energian saantia. Varastointijärjestelmissä oleellista onkin sen optimaalinen integrointi muuhun järjestelmään. Käyttöolosuhteet ovat yksilöllisiä jokaiselle järjestelmälle kuten varastoinnin koko, käyttölämpötilat ja lämmitysverkon paluulämpötilat, jotka vaikuttavat lämpöhäviöihin. Lämpövarastoinnin lataus ja purkausajankohdat suunnitellaan ja ne voivat tapahtua joko suoraan vesivirtauksen kautta tai epäsuoraan lämmönvaihtimesta. (Deschaintre ym. 2015, 8.)

Geotermisille järjestelmille voidaan tehdä erilaisia luokituksia, mutta usein käytetty luokittelu perustuu hyödyntämissyvyyteen (Laloui ym. 2020, 15). Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu tyypillisimpiä maalämpötekniikoita syvyyksien ja lämpötilojen kanssa.



Kuva 2. Maanalaisia lämpöenergian tekniikoita (Laloui ym. 2020, 16).

Kausilämpövarastoinneista (STES, Seasonal Thermal Energy Storage) käymme tässä kappaleessa esimerkkikohtein läpi ATES-järjestelmän (Aquifer Thermal Energy Storage), CTES-järjestelmän (Rock Cavern Thermal Energy Storage), PCMES-järjestelmän (Phase Change Materials Energy Storage), PTES-järjestelmän (Pit Thermal Energy Storage), SSTES-järjestelmän (Solid State Thermal Energy Storage) sekä TTES-järjestelmän (Tank Thermal Energy Storage). Työssä käsitellään laajemmin BTES-järjestelmiä (Borehole Thermal Energy Storage) kappaleessa neljä.

3.1 ATES (Pohjaveden lämpövarasto)

ATES-järjestelmissä pohjavettä käytetään lämpöenergian kuljettamiseen ja sen varastointiin. On olemassa esimerkiksi vain kylmennykseen tarkoitettuja kaivoja, joihin talvella kylmä säilytetään pohjaveteen ja käytetään kesällä viilennykseen. (IRENA 2020, 57.) Kaivoja käytetään myös lämmittämiseen, jolloin kaivoja tulee olla kaksi; lämmin ja kylmä kaivo. Suuremmissa järjestelmissä on useita lämmin- ja kylmäkaivoja. Järjestelmässä lämpimään kaivoon johdetaan lämmennyttä vettä, jonka lämpöenergia varastoidaan myöhempää käyttöä varten. Käytön jälkeen jäähtynyt vesi johdetaan kylmäkaivoon. Kesällä kierto vaihdetaan toisinpäin eli kylmästä kaivosta pumpataan vettä viilennykseen. Tekniikan suurimpia etuja ovat, että se vähentää jäädyttimien tai lämpöpumppujen käyttöä tuomaan viileyttä kesällä rakennusten viilennykseen. (Cabeza 2014, 87.)

ATES-järjestelmät luokitellaan myös käytetyn varastointilämpötilan suhteen: Matalan lämpötilan varastointi, keskilämpötilan varastointi (MT-ATES) ja korkean lämpötilan varastointi (HT-ATES). Matalassa lämpövarastoinnissa lämpötila on muutamia kymmeniä °C:ta, MT-ATES lämpötilassa 30–60 °C ja HT-ATES yli 60 °C. Yleisimpiä ovat matalan lämpötilan varastoinnit. (Bakema ym. 2019, 36.)

ATES-järjestelmän suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä on useita. Näitä ovat muun muassa geologisten muodostumien muuttuminen ajan kuluessa, raekokojakauma, rakenteet, läpäisevyys, luonnollinen lämpötila, pohjaveden virtaus, virtaussuunta ja veden kemia. (Cabeza 2014, 93.) Kemiaaliset ympäristöriskit liittyvät pohjaveden lämpötilanmuutoksiin. Liian suuri lämpötilan nousu saattaa aiheuttaa mikrobien kasvua sekä veden omien mineraalien, kuten esimerkiksi raudan ja mangaanin liukenemistä. Näiden joutuessa kosketuksiin ilman kanssa, syntyy saostumia. Olennaista suunnittelussa on ottaa huomioon, että pohjavesialueella on riittävän paksu ja karkearakenteisia (mm. sora ja hiekka) maakerroksia. (Arola ym. 2020, 1–2.) Saostumien syntymisen ennaltaehkäisemisessä ilman pääsyn estäminen järjestelmään on

välttämätöntä. Tämä saavutetaan parhaiten pitämällä pohjavesikierto ilmatiiviinä ja pitämällä korkeampaa ilmanpainetta suhteessa ulkoilmaan. (Cabeza 2014, 95.)

Vuonna 2018 ATES-järjestelmiä oli maailmanlaajuisesti jo yli 2800. Näistä useimmat sijaitsevat Alankomaissa, Ruotsissa sekä Länsi-Euroopassa. Näissä järjestelmissä pohjavedestä hyödynnettiin jäähdytyksessä ja lämmityksessä vuosittain yli 2,5 TWh verran. (Bakema ym. 2019, 46.)

3.1.1 ATES-järjestelmä Askon alue Lahdessa, Suomi

Askon alueen muutostyöt vanhasta teollisuusalueesta liike- ja asuintiloiksi käynnisti kohteessa pohjaveden energian hyödyntämisen (Korpijaakko 2017). Ensimmäinen ATES-kaivo otettiin käyttöön vuonna 2017 ja vuonna 2018 kiinteistölle asennettiin toinen kaivo. Järjestelmän käyttö aloitettiin 2019 lopussa. Ympäristövaikutuksia tarkkaillaan. Toisen kaivon rakentaminen paransi pohjaveden saantia oleellisesti kaivojen välisen virtausyhteyden avulla.

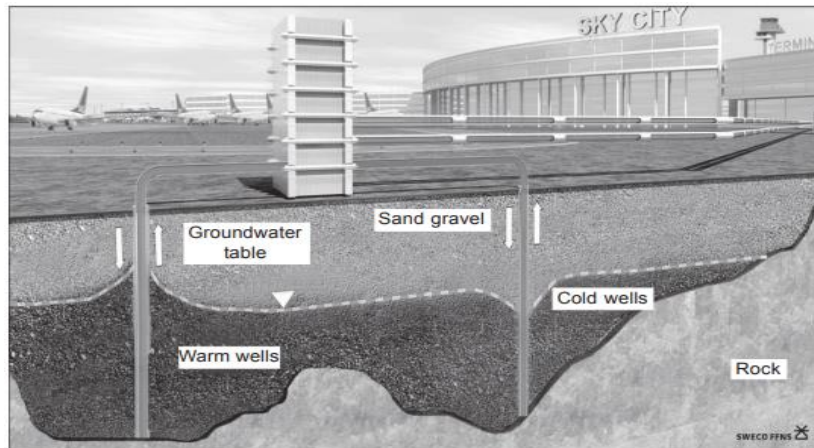
Vuonna 2019 pohjavedestä hyödynnettiin lämmitysenergiaa 473 MWh sekä 48 MWh viilennykseen. CO₂-päästöt alentuivat noin 55 tonnia. (Arola ym. 2020, 38–39.)

3.1.2 ATES-järjestelmä Arlandan lentokenttä, Ruotsi

Maailman suurin ATES-järjestelmä sijaitsee Ruotsissa Arlandan lentokentällä. ATES:n tilavuus on 200 miljoonaa m³ ja sen rakentaminen aloitettiin vuonna 2008 (Bakema ym. 2019, 46; Cabeza 2014, 112). ATES koostuu viidestä kylmäkaivosta harjun pohjoisosassa ja kuudesta lämpökaivosta eteläosassa. Itse harju sijaitsee noin kahden kilometrin päässä lentokentältä. Talvisin lämpöä käytetään ilmanvaihtojärjestelmien esilämmittämiseen ja kiitotien sulana pitoon. Kesäisin virtaus ATES-järjestelmässä on päinvastainen ja kylmäkaivoja hyödynnetään ilman viilennykseen.

ATES-järjestelmä vähentää kaukolämmön tarvetta vuosittain 15 GWh ja korvaa jäädyttimet, joiden vuotuinen sähkönkulutus on 4 GWh. (Cabeza 2014, 112.)

Alla olevassa kuvassa kaivos lähellä terminaalia.



Kuva 3. Kuvaus yhdestä lämpö- ja kylmäkaivosta (Cabeza 2014, 112).

3.2 CTES (Kalliolämpövarasto)

CTES-järjestelmällä tarkoitetaan syvällä maaperässä olevia luolalämpövarastoja. Nämä voivat olla vanhoja kaivoksia tai tätä varten louhittuja luolia. Maanalaisia luolia on rakennettu myös suurien öljymäärien varastointiin, jotka ovat öljyn säilytyksen vähentyessä jääneet tyhjilleen. (Combert ym. 2019, 2–3.) Vesi toimii varastointimateriaalina sen turvallisuuden ja edullisuuden vuoksi. CTES-järjestelmässä hyväksikäytetään veden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia, jotka liittyvät sen tiheyden muutoksiin eri lämpötiloissa muodostaen kerrostuneisuutta. Kylmä vesi on pohjalla ja lämmin vesi kevyempänä yläosassa. (Berglund 2020, 3.) Lämmintä vettä johdetaan luolalämpövaraston yläosaan ja kylmää alaosaan. Jos varastoa käytetään viilennykseen, vettä pumpataan alaosasta ja lämpöä vastaavasti yläosasta.

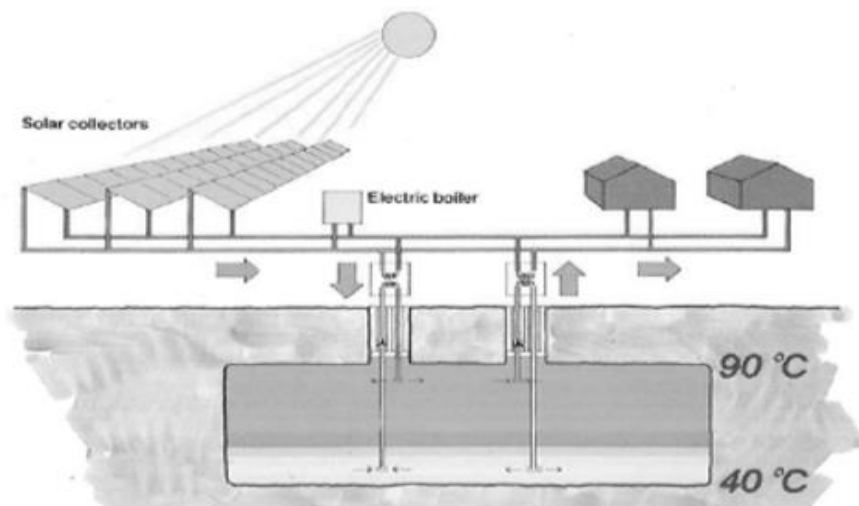
CTES-järjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa kallioluolien rakenne, leveyden ja korkeuden suhde, pohjavesivirtaukset, kivilajit ja niiden lämpökertoimet sekä vesikemia. Suurimpiin riskeihin kuuluu korkeiden

lämpötilojen sekä kosteuden vaihtelu rakenteissa, joita ei ole rakennettu varastointitarkoitukseen. (Gombert 2019, 8, 11–12, 15).

3.2.1 CTES-järjestelmä Lyckebo, Ruotsi

Ruotsin Lyckebossa, joka sijaitsee Uppsalan pohjoispuolella, on ollut vuodesta 1983 asti toiminnassa osin aurinkoenergialla toimiva CTES-järjestelmä. Kallio soveltui hyvin varastointikohteeksi, koska siinä oli vähän halkeamia ja pohjaveden vaikutukset olivat vähäiset.

CTES:n varastointitilavuus on 115 000 m³, johon ladataan lämpöä myös aurinkolämmöllä. (Nordell 1999, 5.) Alla olevassa kuvassa järjestelmän kuvaus sekä lämpötilat CTES-varastossa.



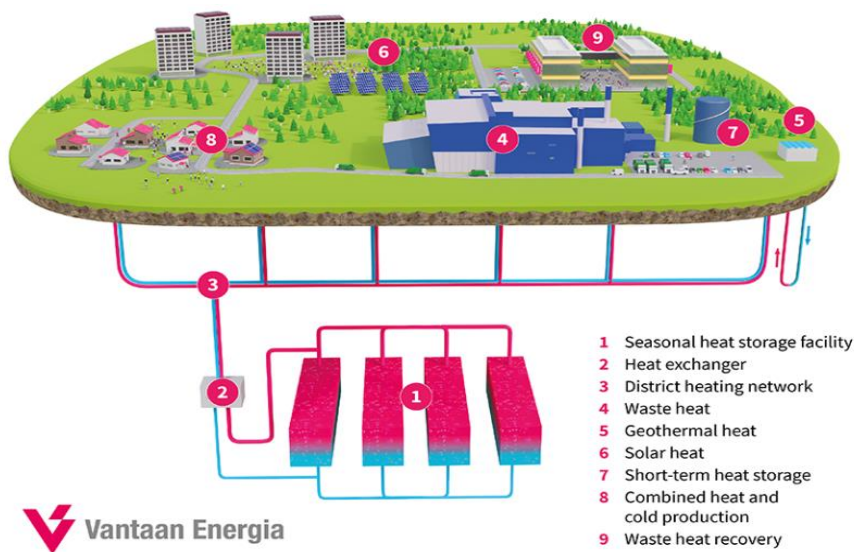
Kuva 4. Lyckebon CTES-järjestelmän kuvaus (Choi 2012).

3.2.2 CTES-järjestelmä Vantaa, Suomi

Vantaan Energiolla on käynnistynyt projekti, jonka tarkoituksena on rakentaa maailman suurin luolalämpövarasto. VECTES:een (Vantaa Energy Cavern Thermal Energy) on tarkoitus ladata lämpöä kesäisin niin aurinkoenergialla kuin esimerkiksi ilmastointilaitteista syntyvällä hukkalämmöllä.

Luolalämpövarastoon suunnitellaan varastoitavan vettä jopa 140 °C:een lämpötilassa 1 000 000 m³ kokoluokan varastoihin. Tämän varastointikapasiteetiksi on laskettu 90 GWh. (Vantaan Energia 2022.) Tämä sijoitetaan noin 60 m syvyyteen kallioon, jossa pohjaveden luontainen paine estää veden höyrystymisen. VECTES on osa Fossiiliton 2026 hankekokonaisuutta ja sen odotetaan tarjoavan lämpöä vuositasolla noin 40 000 asukkaalle. (Vantaan Energia 2021.)

Alla olevassa kuvassa järjestelmän kuvaus.



Kuva 5. VECTES-järjestelmän kuvaus (Vantaan Energia 2022).

3.3 PCMES (Faasimuutosmateriaalin energiavarasto)

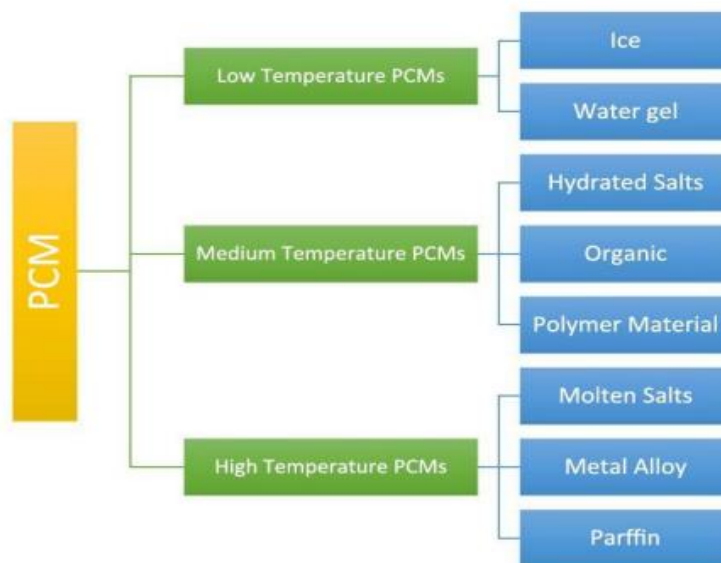
Faasimuutosmateriaalin lämpövarastoinnissa on kyse materiaalin olomuodonmuutoksesta esimerkiksi kiinteästä nesteeksi. Vaihemuutoksen energiavarastot soveltuvat sekä kausi- että lyhytaikaiseen varastointiin. Etuna SHS-varastointijärjestelmiin nähden on sen pienempi tilan tarve ja suurempi tiheys.

PCM-tyyppejä ja järjestelmiä on olemassa useita erilaisia. PCM:t luokitellaan orgaanisiin, epäorgaanisiin ja sulamispisteeltään alhaisiin materiaaleihin. Nämä ovat taas luokiteltu eri ryhminä riippuen materiaalin luonteesta. Yleisimmät

materiaalit lämpöenergiavarasto-sovelluksissa ovat parafiinit(orgaaniset), rasvahapot (orgaaniset) sekä hydratoidut suolat (epäorgaaniset). PCM:t voidaan jakaa kolmeen ryhmään myös lämpötilan mukaan: Matalan lämpötilan PCM:t, keskitason lämpötilan PCM:t sekä korkean lämpötilan PCM:t. (Sarbu ym. 2018, 10–11, 14–15.)

Vesi on yksi yleisimmistä PMC:stä ja jäävesi on näistä yksi esimerkki, jota voidaan hyödyntää laajasti mm. jäädytyksessä. Tärkeimpiä huomioitavia seikkoja ovat muun muassa käytetyn PMC:n haluttu käyttölämpötila, vakaus ja sen reagointi varastointimateriaalin kanssa geologisia olosuhteita unohtamatta. (Jouhara ym. 2020, 6–7.)

Alla olevassa kuvassa PCM:n jaottelua lämpötilojen mukaan.



Kuva 6. PCM-materiaalien jaottelua lämpötilojen mukaan (Sarbu ym. 2018, 15).

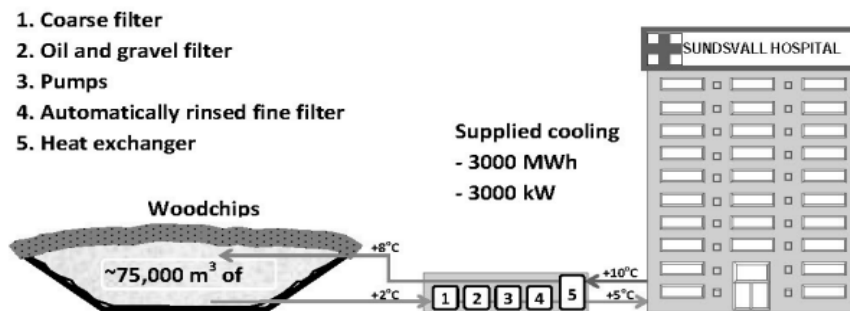
Sovelluksia on laaja valikoima sekä lyhytaikaiseen että kausivarastointiin. Nämä voivat olla hyvin pieniä elektronisia laitteita, keskikokoisia rakennusenergia lämpövarastoja ja laajamittaiset sovellukset aurinkosähkön tuotantoon. (King ym. 2021, 9–10.)

3.3.1 Lumivarastointi Sundvallissa, Ruotsi

Sundvalissa aloitettiin lumivarastointi vuonna 2000 ja se perustuu luonnon lumen ja tarvittaessa keinolumen säilytykseen matalassa pohjasta tiiviissä (ei pohjavesivirtausta) lampikuopassa. Kylmä otetaan, kun lumen/jään sekä sulan läpi johdetaan kylmänsiirtoneste (vesi), joka jäähtyy veden suurta piilevää sulamislämpöä hyödyntämällä ja kierrätetään Sundvallin aluesairaalaan toukokuusta elokuun loppuun viilennystarkoituksessa. Täällä lämpenevä vesi johdetaan takaisin lumelle, jossa se jäähtyy osan lumen samalla muuttuessa nestemäiseksi. Sundvallin sairaalan kerrosala on 19 000 m². (Nordell ym. 2007, 5–6).

Veden piilevä sulamislämpö on 0,093 kWh/kg. Yksi kilogramma jäätä vaatii siis 0,093 kWh sulataksesi nolla-asteiseksi vedeksi. Lammen varastointikapasiteetti on kasvanut alkuperäisestä 20 000 m³:stä 75 000 m³:iin lunta. Vuonna 2010 jäähdytys oli 3 000 MWh ja maksimijäähdytysteho 3 000 kW, joka on lähes 100 % sairaalan jäähdytyksestä. (Nordell 2015, 5, 17).

Alla olevassa kuvassa kuvattuna jäävaraston järjestelmä.



Kuva 7. Sundvallin jäävaraston järjestelmän kuvaus (Nordell 2015, 16).

3.4 PTES (Allaslämpövarasto)

Allaslämpövaraston toimintaperiaate perustuu kuumen veden tallentamiseen suureen allaskuoppaan, joka on peitetty kannella. Allasvarastointi vaatii paljon tilaa ja sen geologiset olosuhteet sekä pohjavesivirtaukset on tiedettävä.

PTES:n tehokkuuteen vaikuttavat etenkin kerrostuneisuus, varastoinnin lämpötilat, lämpöpumput, vuotuisten varastointijaksojen lukumäärät sekä paluulämpötilat. Lämpöhäviöihin taas vaikuttavat muun muassa varastointitilavuuden tilavuussuhde sekä kanteen asennettu eristemateriaalin pitävyys. Varastointilämpötila voi olla jopa 90 °C. Järjestelmä sopii sekä kausittain lyhytaikaiseen varastointiin ja on helposti integroitavissa useaan eri järjestelmään. Sitä voidaan käyttää sekä lämmitykseen että viilentämiseen.

PTES-järjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa maan rakenne, suuri tilantarve, lämpötilat, veden happipitoisuus ja veden kemia (esim. pH) sekä bakteerit. Teräsosien korroosio ja saostumien syntyminen tulee huomioida. Altaassa veden pinnan tasoa tulee pitää mahdollisimman vakiona, joka tapahtuu yhtäaikaista veden ulos ja sisään pumppauksella. Myös lämpötilaa tulee säädellä vastaavalla menetelmällä. Altaan seinämät ovat yleensä 25 ° kulmassa ja altaan reunamat samalla tasolla penkereen kanssa. Sadevesi altaan päällä saattaa aiheuttaa ongelmia. (Bakema ym. 2019, 99–102, 104–105.)

3.4.1 PTES-järjestelmä Vojensin kaukolämpö, Tanska

Yksi maailman suurimmista allaslämpövarastoista on Vojensin kaukolämmöllä Tanskassa. Se on tilavuudeltaan 200 000 m³ ja sitä lämmitetään aurinkokeräimillä, joiden pinta-ala on 70 000 m². Muita energialähteitä ovat mm. kaasukattilat sekä absorptiolämpöpumppu. Tämän käyttöönotto vuosi oli 2016 ja se kattaa yli puolet kaukolämpöverkon vuotuisesta lämmöntarpeesta. (Roussel 2020.)

Alla kuva allaslämpövarastosta, joka havainnollistaa hyvin allasvaraston suuruutta.



Kuva 8. Vojensin allaslämpövarasto (Roussel 2020).

3.4.2 PTES-järjestelmä Langkazissa, Tiibet

Tiibetin länsiosassa sijaitsevassa Langkazissa on 15 000 m³ kausivarastointiin tarkoitettu PTES-järjestelmä kaukolämmölle. Tämä varastoi ylimääräistä aurinkolämpöä 22 275 m² aurinkolämpölaitoksesta. Talvella lämmitystarpeen kasvaessa, pumpataan varaston yläosasta 80–90 °C:sta vettä johtaen samalla kylmää vettä varaston pohjaan. PTES ja aurinkosähkön kaukolämpölaitos tuottavat 90 % kaukolämpölaitoksen lämmöntuotannosta. PTES kykenee varastoimaan lämpöä 700 MWh ja sen kokonaiskapasiteetti on 17,5 MWh. (Aalborg CSP 2022.)

Alla olevissa kuvissa PTES:n rakennusvaiheita.



Kuva 9. Kuvia allasvaraston rakennusvaiheista (Aalborg CSP 2022).

3.5 SSTES (Kiinteän aineen lämpövarasto (Solid State))

Kiinteän aineen varastointimateriaaleina voidaan käyttää muun muassa kiviä, keraamisia tiiliä sekä betonia, jotka ovat suhteellisen edullisia ja helposti muunneltavissa. Varastointitilana voi toimia esimerkiksi talon rakenteet tai tankit/siilot, jotka voidaan sijoittaa myös maan alle. Lämmönvarastointi sopii sekä päivittäiseen käyttöön että kausiluonteiseen tarpeeseen.

Menetelmä perustuu lämmön lataamiseen materiaaliin sähkön avulla, kun sähkön hinta on edullinen tai sitä on latausverkkoon nähden ylimäärä. Lämpöä voidaan vastaavasti vapauttaa tarpeen mukaisesti. Varastointilämpötilat voidaan saada jopa 1 000 °C:ksi. Järjestelmät vaihtelevat käytetystä materiaalista varastojen kokoihin. Esimerkiksi kivi ja betonia voidaan käyttää isommissa mittakaavoissa varastoimaan lämpöä, joka syntyy aurinko- ja tuulienergian ylimäärä sähköstä.

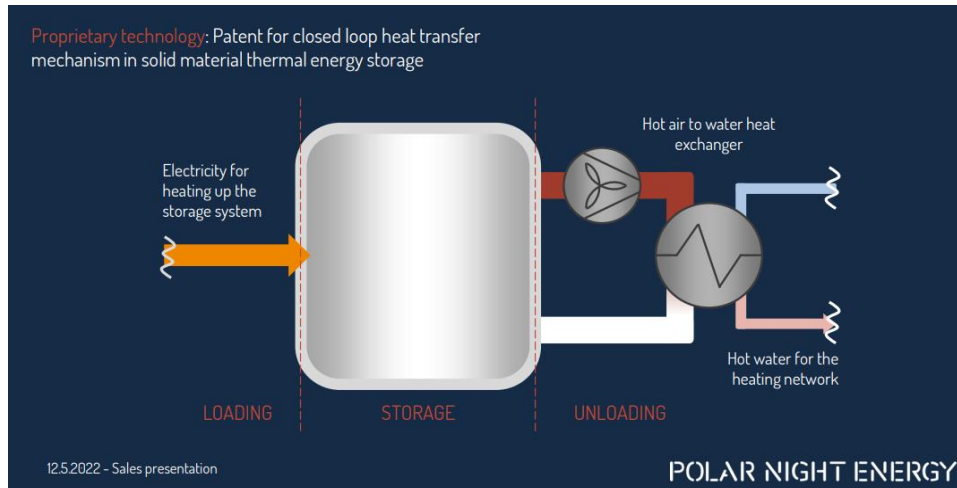
Uusiutuvat energiat kuten aurinko- ja tuuli, tuottavat sähköä vain auringon paistaessa tai tuulisella säällä. Tätä sähköntuotantoa ei voida säätää tehontarpeen mukaan kuten öljy- tai kaasuvoimatuotannossa. Sähkön varastointimenetelmät ovat tässä avainasemassa estämässä verkkojen kuormittumista ja tasapainottamisessa. (IRENA 2020, 55, 68, 75, 131.)

3.5.1 SSTES-järjestelmä Kankaanpäässä Vatajankoskella, Suomi

Suomen ensimmäinen Polar Night Energyn patentoima korkean lämpötilan lämpövarastointi on käytössä Kankaanpään Vatajankoskella (Vatajankoski 2022). Lämpövarastoon ladataan sähköä spot-markkinoilta ja Fingridin taajuudensäätömarkkinoilta. Tätä energiaa käytetään varaston kautta datasalin tuottaman hukkalämmön priimaamiseen kaukolämpöverkkoon. (Eronen 2022.) Lämpövarastona toimii noin seitsemän metriä korkea ja neljä metriä leveä terässäiliö, joka on täytetty hiekalla ja lämpöä ladataan hiekkaan sähköllä (Vatajankoski 2022). Lämmön kuljettimena toimii ilma, joka siirtää hiekkavarastosta lämmönvaihtimen kautta lämmön veteen. Menetelmä on

ympäristöystävällinen eikä ilmasta aiheudu korroosioriskiä varastointimateriaaleille. (Eronen 2022.)

Alla kuva lämmön lataus- ja purkuprosessista.



Kuva 10. Hiekkavaraston toimintaperiaatteen kuvaus (Eronen 2022).

Vatajankosken lämpövaraston lämpökapasiteetti on 8 MWh ja parhaillaan se ylittää 600 °C lämpötilaan. Hiekalla on noin 5 kertaa pienempi lämpökapasiteetti kuin vedellä, mutta lämpötilaskaala on jopa 10 kertaa suurempi. Vakio lämmitysteho on 100 kW, (korkeimmillaan 200 kW) varastointikapasiteetin ollessa 8 MWh. Järjestelmän tehokkuus on yli 85 %. Varastointi sykli on tunneista päiviin, mutta kovin useisiin kuukausiin sillä ei päästä. Käyttöikä varastointijärjestelmällä on noin 50 vuotta.

Hiekalle vaatimuksena on tasalaatuisuus sekä hiekan pitää olla kuivaa. Tällä hetkellä käymme neuvotteluita, jotta saamme käyttöömmme toista luonnonmukaista materiaalia, jolla päästään vielä korkeampiin varastointilämpötiloihin. (Eronen 2022.)

3.6 TTES (Säiliölämpövarasto (vesi))

TTES viittaa järjestelmiin, joissa säiliössä on vesi varastointivälineenä. Se edustaa yksinkertaisinta ja laajimmalle levinnyttä lämmön varastointimuotoa.

Säiliöiden tilavuudet ovat muutamasta sadasta litrasta jopa noin 80 000 m³ tilavuuden säiliöihin. Vesi lämmitetään tai jäähdytetään ympäristön suoralla lämmöllä, aurinkopaneeleilla tai sähköllä. (IRENA 2020, 54). Säiliöiden kausilämpöenergia varastot ovat yleisimmin vedellä täytettyjä teräsbetonisäiliöitä, joihin on yhdistetty lataus- ja purkaussilmukat. Säiliöitä voidaan käyttää myös viilennystarkoituksiin. Lämmönvarastoinnin periaate on sama kuin PTES:lla eli perustuu veden kerrostuneisuuteen. Lämmintä vettä syötetään tankin yläosaan ja viileää vettä alaosaan. Kerrostuneisuutta voidaan edesauttaa esimerkiksi kerrostuslaitteella. Virtauksen nopeudella on myös iso merkitys.

Rakennusmaaperän pitää olla luja sekä pohjaveden olemassaoloa tulee välttää. Tankki rakennetaan yleensä noin 5–15 m syvyyteen. Maanpinnalle rakennettaessa pohjavesivirtauksien paikantamista ei tarvita. Säiliöiden rakennusmateriaalit ovat betoni, ruostumaton teräs tai kuituvahvisteinen muovi. Maan sisälle lämpövarastoa rakennettaessa tankin seinämien ei tarvitse olla niin paksuja ympäröivän maaperän aiheuttaman staattisen voiman ansiosta. (Deschaintre ym. 2015, 9–10.)

TTES toimii useimmiten lyhytaikaisena, päivittäisenä lämpövarastona, mutta järjestelmää on kehitetty myös kausivarastointiin. Lyhytaikaisten toimitetun veden lämpötila on normaalisti 55–60 °C, mutta kausivarastointiin kehitetty tankkipohjainen järjestelmä voi säilyttää jopa yli kuusi kuukautta noin 90 °C:een lämpötilan. Pienemmät järjestelmät ovat suunnattuja kotitalouksiin, joissa nämä ovat tarkoitettu useimmiten kuuman veden tuotantoon. (IRENA 2020, 54.) TTES voidaan lämmitellä jopa 98 °C:een ilman paineen säätöä. Mikäli säiliö toimii myös höyrytiivinä ja paineen alaisena myös korkeammat lämpötilat ovat mahdollisia. (Deschaintre ym. 2015, 10.)

3.6.1 TTES-järjestelmä Münchenissä, Saksa

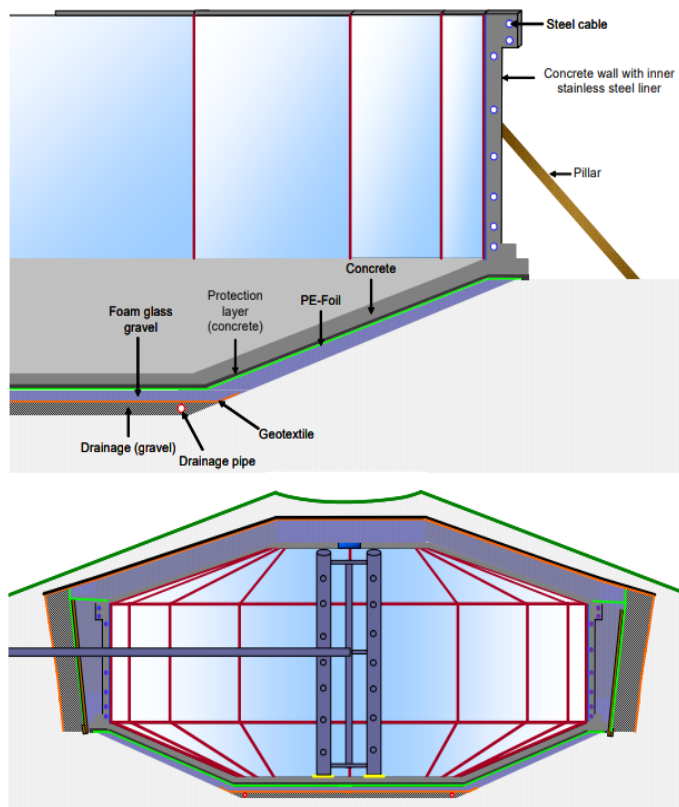
Müncheniin rakennettiin vuonna 2006 esivalmistetusta betonista 5 700 m³ vesisäiliö, johon kesäisin ladataan lämpöä aurinkokeräimiä hyödyntäen.

Kerrostalojen katolle suunniteltujen aurinkokeräimien pinta-ala on 2 900 m². Lämmön kokonaistarpeeksi arvioitiin 2 300 MWh/a. (Mangold ym. n.d., 1–2.)

Aurinkokeräimet lataavat lämpöä kesällä, ja niitä hyödynnetään talvella tilojen sekä käyttöveden lämmitykseen. Varastossa on kerrostuslaite, joka parantaa lämpötilakerrostumista. Käyttölämpötilan saavuttamiseksi nopeasti varastosta lämmitetään keväisin vain yläosaa. Puskuritulavuuden ollessa riittävä paluuvirtaus aurinkokeräimille kytketään säilytystilan pohjaan asti. (Deschaintre ym. 2015, 20.)

Absorptiolämpöpumppu, joka toimii kaukolämpöverkon lämmöllä, on integroitu järjestelmään. Paluuveden korkeimmaksi lämpötilaksi on määritelty 50 °C. (Mangold ym. n.d. s. 1–2.)

Alla olevassa kuvassa esitetty TTES:n varaston rakenne sekä sen pystyleikkaus.



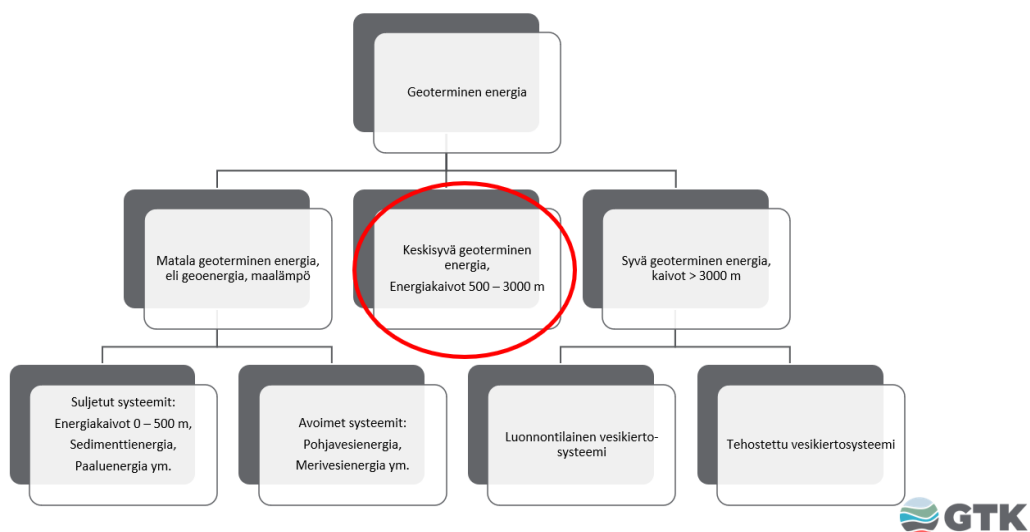
Kuva 11. Münchenin TTES:n pystyleikkaus rakenteineen (Mangold ym. n.d., 4).

4 BTES-JÄRJESTELMÄT

BTES:n periaate on hyödyntää geotermistä energiaa kierrättämällä nestettä muovisten U- tai koaksiaaliputkien välityksellä. Lämpöä voidaan myös varastoida maaperään uusiutuvasta energiasta, teollisuuden hukkalämmöstä ja polttolaitoksista sen myöhempää käyttöä varten. Osassa BTES-järjestelmistä myös mm. asuinhuoneistojen viilentäminen on mahdollista. Lämpötilat BTES-järjestelmissä voivat olla jopa 90 °C, syvässä geotermisessä energiassa ylletään jopa yli 100 °C lämpötiloihin. Järjestelmän integrointi eri lähteisiin on monipuolinen. Näitä ovat mm. lämpöpumput, aurinkolämpö sekä CHP-laitokset.

Lämpöhäviöt syntyvät maaperän lämpöominaisuuksista, lämpöhäviöistä niin kaivossa kuin maan pinnalla ja varastointitilavuudesta. (Bakema ym. 2019, 48.)

BTES-menetelmiä on useita. Näitä ovat vaakaputkistot (maapiiri), yksittäiset matalan entalpiian porareitit (0–500 m), energiapaalut, keskisyvät termiset porakaivot (500–3 000 m) sekä korkean geotermisen energian porakaivot (yli 3 000 m), jotka vaativat Suomen olosuhteissa 6 000 m syvyyden yltääkseen 100 °C:een. (Heinonen ym. 2021, 6, 10–11.) Alla olevassa kuvassa havainnollistetaan geotermisen energian menetelmiä myös avoimen ja suljetun systeemin osalta.



Kuva 12. Geotermisen energian termistöä syvyyksien suhteen (Arola 2022).

4.1 Huomioitavia olosuhteita ja parametreja

Sopivaa BTES-järjestelmää valittaessa tulee huomioida geologiset olosuhteet hyvin tarkasti. Näitä ovat muun muassa pohjaveden virtaus, maaperän lämpöominaisuudet ja maakerrostumat. Voimakas pohjaveden virtaus saattaa aiheuttaa advektiivista (lämmön virtaaminen kylmästä lämpimään) lämpöhäviötä. (Bakema ym. 2019, 49.) Paikallisesti on myös säädöksiä, jotka estävät geoenergian käytön pohjavesialueilla, joten lupa-asioista tulee olla perillä. Lupa-asioihin onkin syytä varata aikaa. Koeporaus tulee tehdä aina isommissa kohteissa, jotta saadaan halutut mitoitusolosuhteet. Se myös antaa arvion porauksien kustannuksesta. (Juvonen ym. 2013, 22–23.)

4.1.1 Lämpöominaisuudet

Mitä suurempi on maaperän lämpökapasiteetti, sitä enemmän lämpöä saadaan tallennettua. Maalajien termisiin ominaisuuksiin vaikuttaa pääosin maaperän huokoisuus ja vesipitoisuus. Termisiä ominaisuuksia ovat maa-aineksen lämmönjohtavuus λ , ominaislämpökapasiteetti c sekä tilavuuden lämpökapasiteetti c_v .

Lämmönjohtavuudella λ (W/m K) tarkoitetaan aineen kykyä johtaa lämpöä pysyvissä eli stationäärisissä olosuhteissa. Aineen suurempi luku kertoo, miten herkästi se luovuttaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden kasvaessa siis myös lämpöhäviöt maalämpövarastossa kasvavat. Vastaavasti lämmönvarastointi tehostuu ja esimerkiksi porakaivoja voidaan asettaa pidemmällä välimatkoilla lämpövarastointia varten.

Ominaislämpökapasiteetti c (kJ/kg °C) kuvaa aineen kykyä sitoa lämpöenergiaa suhteessa massaan ja lämpötilaeroon.

Tilavuudenlämpökapasiteetti c_v (kWh/m³ °C) kuvaa tarvittavaa lämpö määrää, joka nostaa aineen lämpötilaa asteella. Lämmön varastoinnin yhteydessä suurempi luku tarkoittaa parempaa hyötysuhdetta. (Wiheriäkoski 2021, 3–4.)

Maaperän geoterminen gradientti vaihtelee maaperän kerrostumien välillä, joita aiheuttavat eri kivilajit. Mineraalikoostumuksen lisäksi kallioperän lämmönjohtavuuteen ja lämmön siirtymiseen vaikuttavat pohjaveden määrä ja virtaus. (Geologian tutkimuskeskus 2019, 46). Alla olevasta taulukossa eri maalajien termisten ominaisuuksien arvoja.

Taulukko 3. Maalajien termisten ominaisuuksien arvoja (Alanen ym. 2003, 13).

Väliaine	Lämmönjohtavuus W/m K	Lämpökapasiteetti kJ/kg °C	Tilavuuden lämpökapasiteetti kWh/m ³ °C
Graniitti	2,9–4,2	830	0,62
Hiekkakivi	3,0–5,0	730	0,55
Saviliuske	1,7–3,5	850	0,66
Kalkkikivi	1,7–3,0	840	0,63
Kvartsiitti	5,0–7,0	790	0,58
Hiekka, sora ¹	1,6–2,0		0,81
Hiekka, sora ²	0,7–0,9		0,39
Savi	0,85–1,1		0,83–1,0
Lieju ¹	1,5–2,5		0,61–0,83
Hiekkainen lieju ¹	0,6–1,8		0,36–0,53
Turve ¹	0,6		1,11
Turve ²	0,2–0,5		0,19–0,89
Vesi	0,62	4180	1,18

¹ pohjavedenpinnan alla, ² pohjavedenpinnan yllä

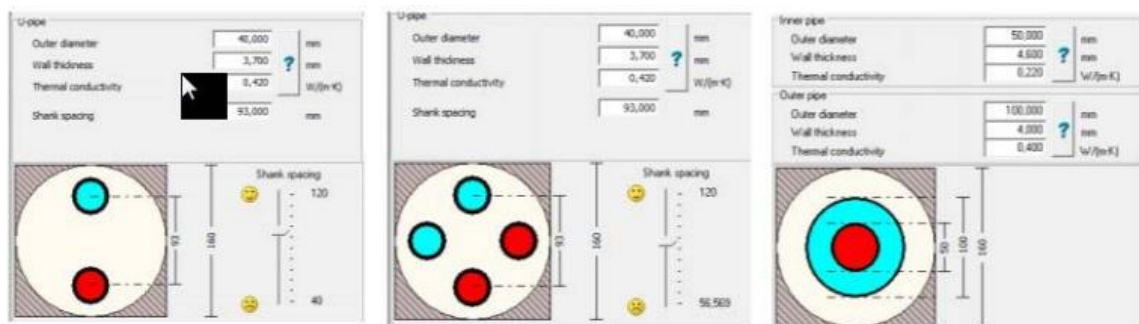
Porausreikien lukumäärä ja syvyys ovat tärkeitä tekijöitä. Porausreikien sijoittelulla ja välimatkoilla vaikutetaan varastointitilan optimoimiseen, mutta myös maaperän asettamat ns. turvavälit huomioidaan. Turvavälit vaaditaan, jotta porausreiät eivät tuhoudu toista porattaessa. Yleisimmin ne suunnitellaan sylinterin muotoiseksi. (Bakema ym. 2019, 61.) Virtausnopeutta määritettäessä päädytään usein kompromissiin parhaimman mahdollisen lämpöenergian saamiseksi. On todettu, että lämmönsiirtonesteen kulkiessa hitaammin porareikää pitkin alaspäin, lämpöenergian varastoituminen tehostuu. Virtauksen kulkiessa nopeammin porareistä ylös, saatava lämpöteho taas kasvaa vähentyneen lämpöhäviön myötä. (Arola 2022.) Optimointi suoritetaan mallinuksilla, kun tehontarve on arvioitu. Mitoituksessa pitää välttyä ylimittoituksesta, jolloin kaivo on liian syvä tai kaivoja on liikaa tarvittavaan

tehoon nähden. Tämä vaikuttaa oleellisesti rakennuskustannuksiin. Jos kaivo taas alimitoitetaan ja kaivosta otetaan energiaa enemmän kuin kallioperä kykenee jatkuvasti luovuttamaan, kallion lämpötila laskee ja lämpöpumpun käyttökustannukset kasvavat lisääntyneen sähköenergian tarpeen myötä. (Puranen 2016, 6.)

Lämpövastetesti (TRT eli Thermal Response Test) suoritetaan testiporareissä, johon on asennettu putket ja täytetty laastilla tarvittaessa kuten tuleva BTES. Nestettä lämmitetään ja tarkkaillaan lämmön siirtymistä porareikää ympäröivään maaperään. (Gehlin 2002, 9). Mitattavia ominaisuuksia ovat maaperän keskimääräinen häiriötön lämpötila poratussa lämpökaivossa ja kaivon keskimääräinen lämpövastus, joka sisältää useampia ominaisuuksia. Ominaisuuksia ovat kollektorissa virtaavan lämmönkeruunesteen lämpövastus, joka on riippuvainen lämmönkeruunesteen virtausnopeudesta sekä itse liuoksen komponenteista. Muita lämpövastuksia ovat kollektorin seinän lämpövastus ja lämpökaivon täytemateriaalin lämpövastus sekä maaperän keskimääräinen tehollinen lämmönjohtavuus lämpökaivon ympärillä. (Gehlin 2015, 10–11.)

Pohjavesitäytteisissä kaivoissa lämpövastuksen määrään vaikuttaa myös kollektoriputken lämmönsiirtopinta-ala kaivon seinämään nähden. Esimerkiksi kahdella U-keruuputkella lämpövastus on tyypillisesti hieman alhaisempi kuin yhdellä U-putkella varustetuissa kaivossa. (Hakala ym. 2017, 11.)

Alla olevassa kuvassa kolmen eri kollektoriputken rakenne.



Kuva 13. Kollektoriputkien tyyppejä vasemmalta oikealle: U-putki, kaksois U-putki sekä koaksiaaliputki (Bakema ym. 2019, 59).

Koaksiaaliputkea käytetään yleisesti keskisyvissä lämpökaivoissa. Lämmönkeruujärjestelmä voi toimia suljettuna tai avoimena kiertona. Suljetussa kierrossa lämmönkeruuneste kulkee kahden sisäisen putken kautta. Avoimessa kierrossa porakaivossa on yksi eristetty putki ja porareian seinämä toimii ulkoputkena. Kaivon yläosaan asennetaan ulkoputki. Koaksiaalisessa keruuputkessa on suurempi lämmönsiirtopinta-ala kuin U-putkessa, joka osaltaan mahdollistaa suuremman virtausnopeuden nostamatta painehäviöitä ja pumppausenergian tarvetta samassa mittakaavassa samanpituisen U-putkeen nähden. (Heinonen ym. 2021, 10.)

Yläeristeellä on myös huomattava merkitys. Sen tehtävänä on mm. vähentää lämpöhäviötä sekä estää sade- ja sulamisveden pääsy. (Bakema ym. 2019, 61–62.)

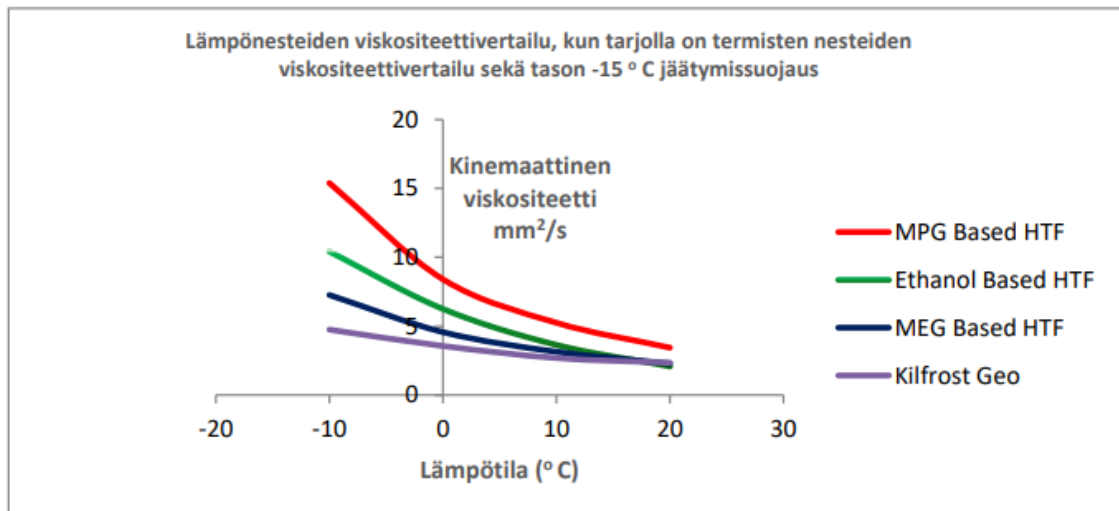
Muovitech Oy on erikoistunut muovisten kollektoriputkien valmistukseen ja kehitykseen. Muovitechillä on oma 850 m syvä porakaivo, jota he käyttävät lämmönsiirtoputkien tuotekehitykseen testaamalla materiaaleja, lämmönsiirtonesteitä sekä syntyviä painehäviöitä. (Hakula 2022.) Alla olevassa kuvassa porakaivo Muovitechin tehdasalueella Mynämäellä.



Kuva 14. Muovitechin 850 m testiporakaivo.

Lämmönsiirtonesteiden viskositeetti kuvaa nesteen sisäistä kitkaa tietyssä lämpötilassa. Tähän vaikuttaa lämpötila ja paine. Mitä pienemmän viskositeetin lämmönsiirtoneste omaa, sitä parempi on sen juoksevuus. Lämpötilaa nostaessa viskositeetti yleensä pienenee. Paineen vaikutus nesteiden viskositeettiin on alhainen. Hyvän lämmönsiirtonesteen tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu muun muassa hyvä lämmönjohtavuus, alhainen viskositeetti, korkea ominaislämpökapasiteetti sekä ympäristöystävällisyys. (Juvonen 2009, 32.)

Tutkittavana on etenkin Kilfrost GEO, joka on täysin ympäristöystävällinen (Hakula 2022). Lämpönesteen kinemaattinen viskositeettivertailu löytyy alla olevasta kuviosta.



Kuvio 2. Lämmönsiirtonesteiden kinemaattisen viskositeetin vertailu eri lämpötiloissa (Muovitech 2022).

Kinemaattinen viskositeetti lasketaan kaavalla

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

jossa

v on kinemaattinen viskositeetti [m²/s]

μ on dynaaminen viskositeetti [Pas] ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

ρ on tiheys [kg/m^3].

Kaava 1. Kinemaattinen viskositeetti (Dunn, 5).

TurboCollector sekä kokoomakaivo Compact ovat myös Muovitechin tuotemerkkejä. Kokoomakaivoja käytetään useamman lämpökaivon kohteissa ja niillä voidaan kaivot kytkeä sarjaan tarvittaessa. Alla olevassa kuvassa Muovitechin valmistama kokoomakaivo, johon voidaan liittää 12 kollektoria. (Hakula, 10.6.2022.) Alla kuva kokoomakaivosta.



Kuva 15. Muovitechin kokoomakaivo.

TurboCollector on pidemmälle kehitetty kollektori turbulenttisella virtauksella. Sen sisäpinnalle on muotoiltu kierteet, jotka pakottavat lämmönsiirtonesteen turbulenttiseen virtaukseen pienemmällä virtaamalla. Sen etuja ovat mm. matalammat painehäviöt sekä matalammat käyttökustannukset. Se mahdollistaa saman lämmöntuoton kuin tavallinen U-kollektori pienemmällä virtaamalla ja säästää näin ollen pumppauskustannuksissa. Tehokkaammalla virtauksella päästään suurempiin lämpöpumppujen COP-arvoihin. (Hakula 2022.)

Lämpöpumppu tarvitaan lämmönkeruunesteen liikuttamiseen ja lämmön nostamiseen lämmitysjärjestelmässä vaadittavalle tasolle. Pumpun valintaan vaikuttavat virtausnopeus, kokonaispaine ja lämmönkeruunesteen ominaisuudet. Pumppuja mitoitettaessa tulee huomioida talviolosuhteet, jolloin tilavuusvirta on suurempi. Lämpöpumpun hyötysuhteena käytetään lämpökerrointa, joka kertoo, kuinka monta kilowattia lämpöenergiaa tuotetaan energiaa yhdellä kilowatilla. (Heinonen ym. 2021, 8.)

Hyötysuhde lämpöpumpulle eli COP (Coefficient of Performance) saadaan laskettua kaavalla:

$$COP = \frac{Q_h}{w} \quad (2)$$

jossa

COP on lämpöpumpun lämpökerroin

Q_h on tuotettu energiamäärä

w on käytetty energiamäärä

Kaava 2. Lämpöpumpun hyötysuhde COP (Maalämpö Tietoportaaali 2022).

Geoenergian ja lämpöpumpun suhde lasketaan tästä kaavalla:

$$Q_{\text{lämpöpumppu}} = \frac{COP}{COP - 1} \cdot Q_{\text{geoenergia}} \quad (3)$$

jossa

$Q_{\text{lämpöpumppu}}$ on lämpöpumpun tuottama lämmitysenergia

COP on lämpöpumpun kerroin

$Q_{\text{geoenergia}}$ on kallioperästä otetun geoenergian määrä.

Kaava 3. Maalämpöpumpun tuottama lämmitysenergia (Heinonen ym. 2021, 8).

Maalämpöpumpun lämpökertoimen vuosikeskiarvo on tyypillisesti arvoltaan noin 3 eli lämpöpumppu tuottaa yhdellä energiayksiköllä kolmen energiayksikön verran energiaa. (Heinonen ym. 2021, 8.)

4.1.2 Ympäristöasiat

Maalämpökaivojen rakentamisesta saattaa aiheutua riskejä ympäristölle, kuten pohjaveden virtauksen muuttuminen sekä suolaisen ja makean pohjaveden sekoittuminen. Ympäristöministeriö suosittelee, että vedenottamoiden läheisyyteen ei rakennettaisi maalämpöjärjestelmiä. Mitä enemmän kunta on riippuvainen pohjavedestä, sitä tiukemmat ehdot on asetettu lämpökaivojen poraamiseksi. Vedenottamoiden läheisyydeksi lasketaan alue, jossa pohjaveden viipymä vedenottamolle on alle 60 vuorokautta. Yli kymmenen lämpökaivon muodostama kenttä tärkeällä pohjavesialueella edellyttää aina luvan hakemista aluehallintovirastolta. (Maalämpötyöryhmän ehdotus 2019, 24.) Lämmönsiirtonesteissä tulee kiinnittää huomiota pakkasnesteidä käytöstä aiheutuvat vaikutukset ympäristöön. Näitä ovat mm. etanoli, glykoli sekä isopropanoli. (Bakema ym. 2019, 66.)

4.2 Matalan geotermisen energian lämpövarastot

Matalan geotermisen energian piiriin kuuluvat maakeruupiiri, alle 500 m porakaivot ja energiapaalut. Matalan BTES-lämpövaraston tarkoitus on lämmittää maaperää nestettä kierrättämällä suljetussa järjestelmässä. Lämmitysaikana maasta nostetaan lämpöä ja vastaavasti kesällä siihen ladataan lämpöä. Yleisemmin käytetyt putket ovat U-putkia. Porareikä on kollektoriputkien asennuksen jälkeen täytetty täyteaineella. Porausreikien etäisyys toisistaan on useimmiten 2–5 m. (McClenahan ym. 2015, 2–4.)

BTES-järjestelmää suunniteltaessa on aina tehtävä selvitys sen soveltuvuudesta kyseiselle paikalle. Näitä ovat geologiset olosuhteet, lämpökuormitus, lämmitysratkaisut sekä rakennuksen mallinnus. Geologisista

parametreista ovat pohjaveden virtaus sekä maaperän koostumus ja sen lämpöominaisuudet. Ilmasto-olosuhteet tulee huomioida kuten lämpövaraston haluttu lataus- ja purkukapasiteetti. Huomattavaa pohjavesivirtausta tulee välttää lämpöhäviöiden vuoksi. BTES tulee sijoittaa pohjaveden yläpuolelle tai olosuhteisiin, joissa vedellä on alhainen virtaus. Maaperän lämpökapasiteetilla on merkittävä rooli varastointitilavuuden kokoa suunniteltaessa. (Bakema ym. 2019, 53–54.) TRT-testi (Thermal Response Test) suoritetaan testiporareissä ja se antaa keskimääräisen arvion maaperän lämmönjohtavuudelle, ja nämä ovat oleelliset suunniteltaessa lämpövarastoa (Gehlin 2002).

Porausreikien muodon osalta kennomaisen muotoisen kentän on todettu olevan tehokkaampi kuin neliön muotoisten kenttien. Piirit on kytketty rinnakkaisiin piireihin. Lataussuunta on yleensä keskeltä ulkoreunaan ja purkaminen tapahtuu ulkoreunasta keskustaan. Tällä minimoidaan lämpöhäviö ja maksimoidaan saatava lämpöenergia. (McClenahan ym. 2015, 3,12.)

Porausreikiin asennetaan lämmönvaihdinputket. Tyypillisin on U-putki. Putken ollessa asennettuna laasti pumpataan porausreikään täyttämään putken ja porausseinämän välinen tila. Laastin lämmönjohtavuus on tärkeää, jotta saadaan hyvä lämmönsiirto. Tämän lämmönjohtavuus vaihtelee 0,8–2,4 W/m*K välillä.

BTES:n yläeristys on tärkeää varaston suorituskyvyn ja tehokkuutta ajatellen. Tässä tulee huomioida niin paikallinen ilmasto kuin lämpökentän käyttölämpötila. Eristeen tehtävänä on eristäminen lämpöhäviötä vastaan sekä sadeveden tyhjennys ja eristäminen veden tunkeutumista maahan.

Ympäristön näkökulmasta huomiota tulee kiinnittää muun muassa siihen, miten maaperän lämpeneminen vaikuttaa sen huokoisuuteen ja kuivumiseen. Lämpötilan nousu saattaa myös lisätä kaasujen muodostumista ja nousemista pintaan. (Bakema ym. 2019, 61–62, 65.)

4.2.1 Lämpövarasto Toholammen Härkänevilla Finn Springin juomatehtaalla, Suomi

Toholammen Härkänevilla sijaitsevassa Finn Springin juomatehtaassa oleva MWh-luokan lämpövarasto-järjestelmä valmistui vuonna 2018. Tämä kuului EVAKOT-hankkeen pilotointikohteisiin. (Energiayrittäjyys 2021.)

Järjestelmä koostuu neljästä elementistä. Nämä ovat hukkalämmön talteenotto, aurinkokeräimet, ohjausyksikkö lämpöpumpulla sekä BTES. Maaperään ladataan juomatehtaan kompressorien hukkalämpöä sekä aurinkopaneelien tuottamaa lämpöä ohjausyksikön valvoessa ja määrittäessä lämpövirtoja. Aurinkokeräimistä ladattava lämpöteho kattaa noin 10 % ja kompressorien hukkalämpö noin 90 % lämpövarastoon ladattavasta lämmöstä. (Sander 2022.) Alla olevassa kuvassa yleiskuva alueesta.

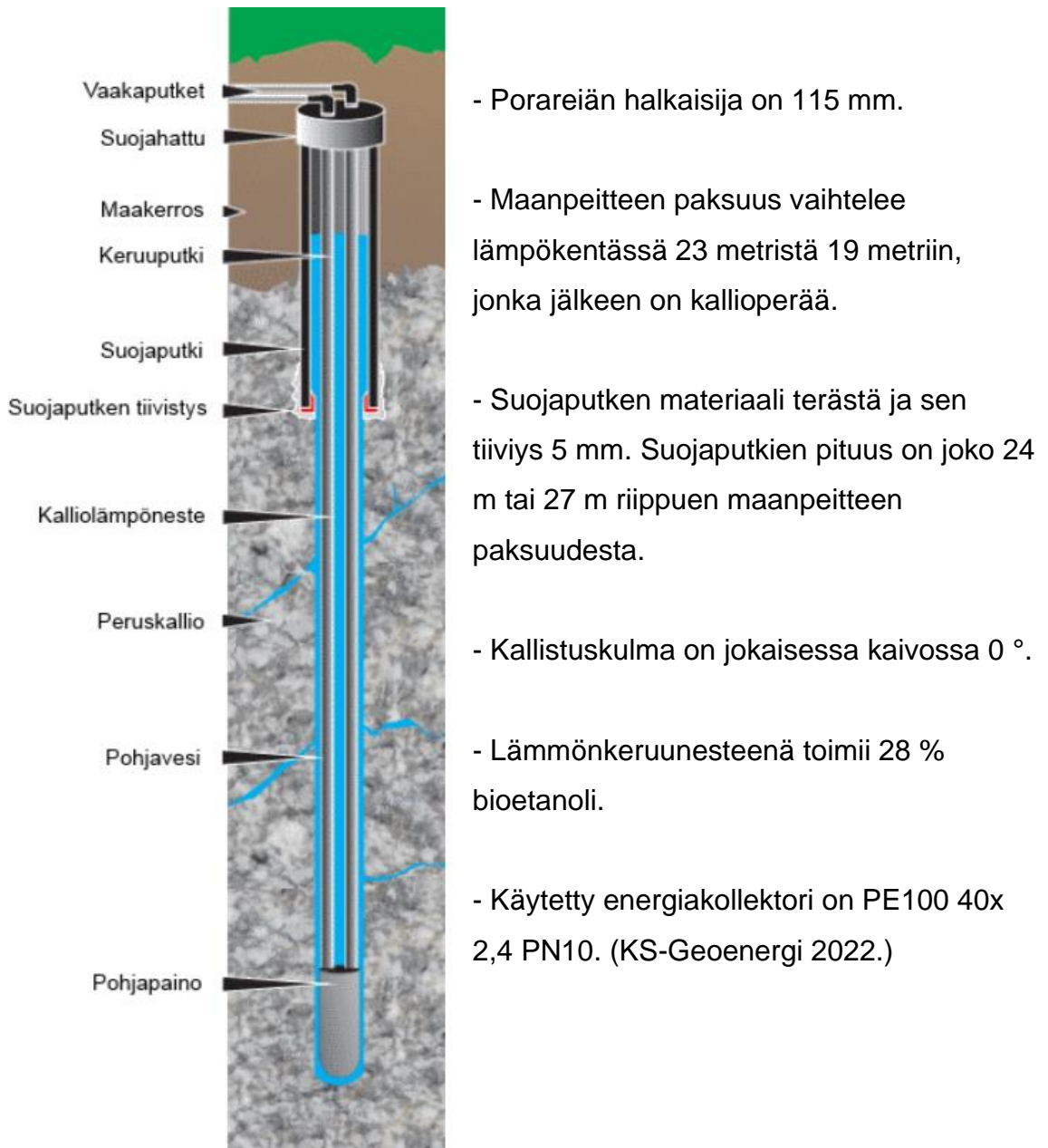


Kuva 16. Finn Springin lämpövarasto-järjestelmä (EVAKOT-hanke, Centria 2022).

Maaperäanalyysit tehtiin GTK:n johdolla, jolloin tehtiin myös simuloinnit tarvittavan lämpövaraston koosta halutun lämpötehon saamiseksi. TRT-mittauksessa kallion teholliseksi lämmönjohtavuudeksi saatiin $2,52 \text{ W/m}^2\text{K}$. Simuloinneissa käytettiin Comsol Multiphysics-ohjelmistoa, jossa kaivojen syvyytenä maanpinnalta 50 m, kaivojen pituuden ollessa 45 m. Kehiä lämpövarastossa on neljä, joiden etäisyys on toisistaan 2,7 m. Kaivoja

simuloinnissa 61 kpl. Simulointi osoitti kaivojen toimivan halutulla tavalla. (Geologian tutkimuskeskus 2018, 24.)

Alla olevassa kuvassa näkyy porakaivojen rakenne ja maaperän muodostus.



Kuva 17. Porakaivon rakenne ja maaperän koostumusta (KS-Geoenergi 2022).

Finn Springin lämpökaivokentän simulointia varten porattiin koekaivo. Maahan ladattava lämpötila on 70 °C. Koska varaston päällä ei ole lämpöeristeenä toimivaa rakennusta, on huomioitava myös yläeriste. Tästä syystä maaperään on kaivettu ensin useampia metrejä syvä alue, josta porareivät on porattu 45 m syvyyteen. Porareikien päälle on rakennettu lämpöeriste, jotta lämpö ei pääse karkaamaan maan pinnalta. Eristeen päälle on siirretty maa-aines takaisin, ja se toimii edelleenkin viljeltävänä peltona. Kenttä muodostuu neljästä erillisestä kehästä. Kehä I koostuu kahdeksasta yhteen yhdistetystä porareistä. Kehä II koostuu kahdesta kuuden porareian piiristä, kehä III kolmesta kuuden porareian piiristä ja kehä IV kahdesta viiden porareian piiristä, yhdestä 6 porareian piiristä sekä yhdestä 7 porareian piiristä. (Sander 2022.)

Alla olevissa kuvissa lämpökentän valmistumista sekä rakennetta.



Kuva 18. Vasemmalla lämpökaivot ennen päällisosan valmistusta ja oikealla kehien rakenne (Sander 2022).

Aurinkokeräimien lämpöä hyödynnetään heti keväällä rakennuksen ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen. Mikäli lämpömäärä ei riitä, lämpötilaa nostetaan lämpöpumpun avulla. Ylijäämälämpö varastoituu BTES-lämpövarastoon ja kesällä se on korkeimmillaan rakennuksen lämmitystarpeen pienentyessä ja auringosta saatavan lämpöenergian kasvaessa. Syksyllä ilman viiletessä kierto kääntyy ja lämpövarastoon kesän aikana varastoitua lämpöä hyödynnetään rakennuksen lämmitykseen. Ohjausyksikkö tasapainottaa tätä lämmönjakelua. (Heliostorage 2022.) BTES:n tehokkuus paranee vuosi vuodelta. BTES-

järjestelmään ladataan lämpöä yleensä keskustasta ulos päin pitäen keskustaa lämpimimpänä. Tässä BTES-järjestelmässä on mahdollista syöttää jokaiselle kehälle erikseen. Jos todetaan, että esimerkiksi kehän 2 lämpötila on alempi kuin kehä kolmen, niin kehä kakkoseen voidaan kohdentaa lämpölataus. (Sander 2022.)

Halutun lämpötilan saaminen maaperään arvioidaan kestävän noin 2–4 vuotta. Tämä on riippuvainen käytetystä lämmönlähteestä. (Energiayrittäjyys 2021.) Finn Springin järjestelmä tuotti lämpöä jo vuonna 2020 ja BTES:n sisälämpötilaksi mitattiin elokuussa 60 °C (Heliostorage 2022). Järjestelmän lämpötila ei tipu talvellaan alle 30 °C:een (Energiayrittäjyys 2021).

BTES-järjestelmä itsessään toimii arviolta 50 vuotta, lämpöpumppu noin 10 vuotta. Ympäristön kuormituksesta ei ole merkkejä vielä tänäkään päivänä, jonka myös osoittaa, että viljelmät eivät ole kärsineet ja lämpövarastoa peittää talvisin normaali lumipeite. (Sander 2022.)

Liitetiedostona 1 järjestelmän prosessikaavio, josta ilmenee paremmin lämmönsäädön periaate järjestelmässä. Kylmä neste merkitty sinisellä ja lämmin punaisella. Liitetiedostossa 2 prosessikaavion piirrosmerkkien yleisimmät selitteet ja virtaavien aineiden merkit.

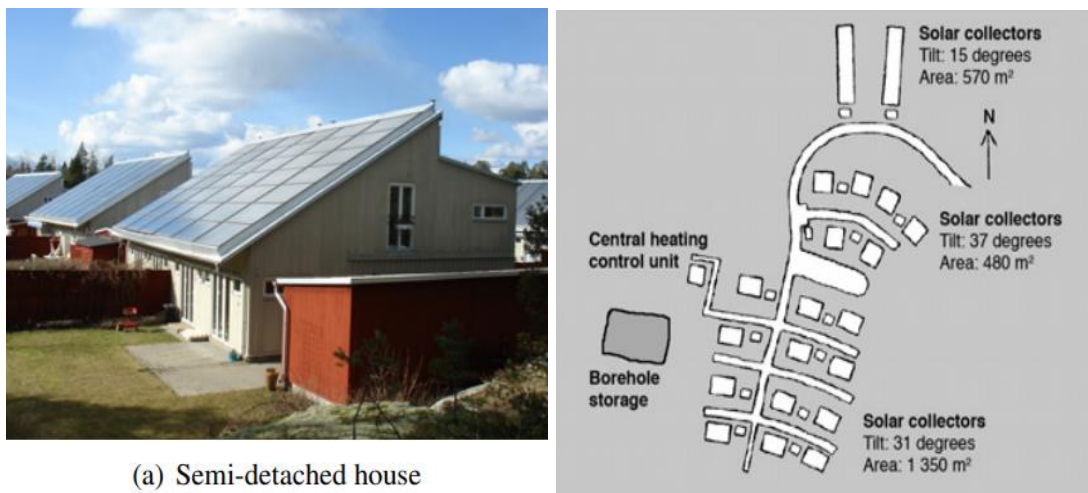
4.2.2 Lämpövarasto Danderydissä Annebergin asuinalueella, Ruotsi

Ruotsissa Danderydin kaupungissa Annebergin asuinalueella valmistui vuonna 2002 BTES-järjestelmä, jonka lämmönlähteenä toimii 2 400 m² aurinkoenergiakenttä. Järjestelmällä lämmitetään 50 asuntoa (pari- sekä rivitaloja) joiden keskimääräinen lämmitettävä pinta-ala on noin 110 m² sekä näiden käyttövesi. Varalämmönlähteenä on sähkölämmitys. Lämpövarasto koostuu 100 porareistä. Näistä yksi on poissa käytöstä toimien testikaivona sisältäen lämpötila-anturin. Aurinkokeräimet yhdistettynä poralämpövarastoon oli tuolloin uusi yhdistelmä, ja tämä pilotointikohde oli ensimmäinen ja osa EU:n THERMIE-hanketta. Pilotointikohteessa käytetään kahta tekniikkaa yhdistettynä

matalan lämpötilan lämmitysjärjestelmään ilman lämpöpumppua. (Lund 2009, 63–64.)

Järjestelmä koostuu 13:sta 750 litran lämminvesivaraajalla varustetusta alayksiköstä. Lämminvesivaraajia on yksi tai kaksi riippuen alayksikköön liitettyjen asuntojen lukumäärästä. Jokaisessa asunnossa on pieni varaaja, matalan lämpötilan lattialämmitysjärjestelmä ja sähkölämmittimet lämmönsaannin varmistamiseksi, mikäli päälämmitysjärjestelmästä saatava lämpöenergian määrä ei riitä. Pääyksikkö sijaitsee osayksiköiden ja lämpökentän välissä ja alayksiköt ovat liitettynä tähän. (Bales ym. 2011, 1.)

Alla olevissa kuvissa näkyy vasemmalla, miten aurinkokeräimet on asennettu talojen katolle. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy yleiskuva asuinalueesta.

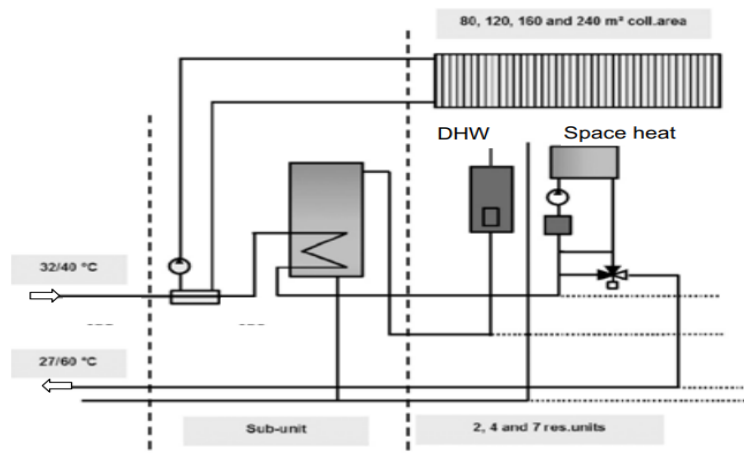


(a) Semi-detached house

Kuva 19. Vasemmalla kuva (a) aurinkokeräimistä asuntojen katolla ja oikeanpuoleisessa (b) järjestelmän yleiskuva (Lund 2009, (a) 64, (b) 65).

Porareivät ovat porattuna kallioon 65 m syvyyteen ja näiden välimatka toisiinsa on 3 m. Aurinkolämpöä syötetään BTES-järjestelmään nostamaan lämpövaraston lämpötilaa. Porareivät on porattu neliön muotoon. Rivejä on 10 ja jokaisessa rivissä 5 porausreikää. Näitä on kaksi kenttää. Kollektoriputket ovat kaksois-U-putkia. Lataus tapahtuu keskeltä ulospäin ja poistolämpötilat vaihtelevat 35 °C:sta 60 °C:een. Toisessa kentässä on tarkkailureikä keskellä, josta mitataan mm. lämpötiloja maaperässä.

Lämmönjakelujärjestelmä koostuu aurinkokeräimien alayksiköistä sekä lämmönsiirtonesteen kierrättämisellä BTES-järjestelmässä varastoimaan lämpöä. Mitoituksessa käytetty 32 °C:een menovirtausta ja 27 °C:een paluulämpötilaa. Keräimien suunnittelussa virtauksen lämpötilaksi on asetettu 40 °C ja paluu lämpötilaksi 60 °C. Porareikälämpövaraston virtaus on yhdistetty yhteen kulkeen rinnakkain kaikkien alayksiköiden läpi, josta se kulkee aurinkolämmönvaihtimen läpi. (Bales ym. 2011, 1-2.) Alla kuva lämmönjakelujärjestelmän toimintaperiaatteesta.



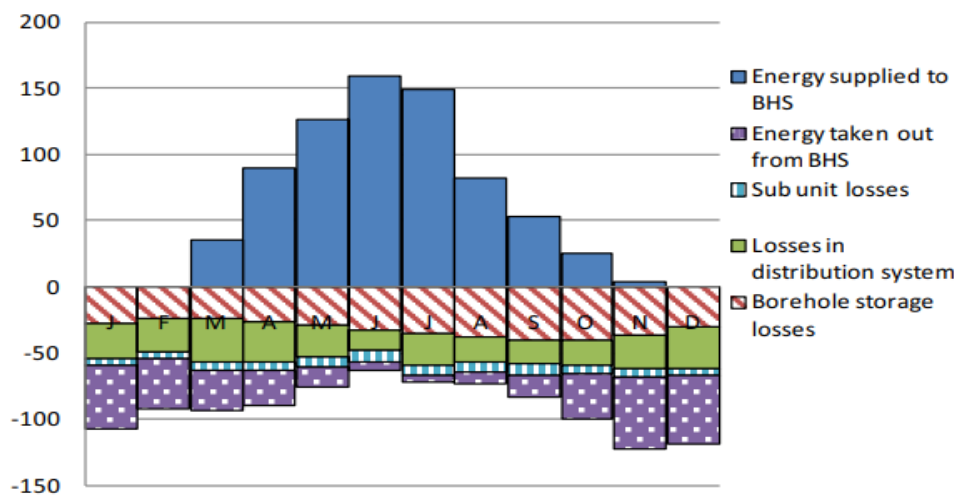
Kuva 20. Annebergin lämmönjakelujärjestelmän toimintaperiaate lämpötilat huomioiden (Bales ym. 2011, 2).

Ensimmäinen tekninen arviointi vuoden 2003 ja 2004 toiminnasta osoitti, että järjestelmän lataus ja purku toimii tarkoitetulla tavalla. Tehokkuus sitä vastoin oli alhaisempi. Ensimmäisten vuosien aikana ongelmia oli useita. Yksi näistä oli vuodot lämpövarastossa. Annebergin lämmitysjärjestelmän tarkoitus on tuottaa yli kaksi kolmasosaa lämmitykseen kuluvasta energiasta. Jäljelle jäävä kolmannes tulee sähkölämmittimistä. (Lund 2009, 65–67.)

Vuonna 2006 lämpövaraston lämpötiloissa oli vielä eroa, mutta vuoden 2010 mittaustulosten perusteella lämpötila oli vakiintunut (Bales ym. 2011, 3).

Nykyisessä vakiintuneessa tilassa BTES:n hyötysuhde on noin 46 %. Luku ei kuitenkaan sisällä järjestelmän lämpöhäviöitä, jotka ovat odotettua suuremmat. Tutkimusten perusteella pääteltiin alhaisen tehokkuuden syiksi useampia

asioita. Näitä ovat jakelujärjestelmä liian alhainen lämpöhäviön arviointi, mitoituksessa käytetty alhaisempi huoneistolämpötila, BTES:ssa tarve tehostaa järjestelmää, jotta saavutetaan vakaus sekä puute hyödyntää täysimääräisesti aurinkokeräin-BTES-kytkentää. (Bakema ym. 2019, 80–81.) Alla oleva kuvio esittää lämpövarastoinnin ja jakelun energialuvut vuonna 2010. Varastointi mitataan pääyksikössä. Kuvio havainnollistaa hyvin BTES-järjestelmän häviöt sekä jakeluhäviöt kuukausittain MWh:ssa. (Bales ym. 2011, 7.)



Kuvio 3. Annebergin lämpövarastoinnin ja jakelun energialuvut vuonna 2010 (Bales ym. 2011, 7).

Järjestelmä tarvitsee paljon lisäsähkölämmitystä kuumaan käyttöveteen myös kesäaikana, vaikka aurinkoenergiaa on enemmän käytettävänä. Mahdollisia syitä tähän on arvioitu kaksi: Pitkät putkietäisyydet alayksiköihin ja asuntoihin sekä nykyisenlainen alayksiköiden suunnittelu. Lämpövaraston vettä lämmitetään aurinkoenergialla päivisin ja se kulkee alayksiköiden varaston kautta lämpövarastoon, josta takaisin aurinkolämmönvaihtimeen. Varastosilmukka jatkaa toimintaansa yölläkin, jolloin aurinko ei paista, jolloin lämpöarvo ei ole niin korkea. (Bales ym. 2011, 8-9.)

4.3 Energiapaalut

Energiapaalut määritellään geoenergiarakenteeksi, jolla voidaan varastoida lämpöä maaperään ja hyödyntää viilennyksessä rakennusten rakenteellisessa

muodossa. Energiapaalut ovat taloudellisesti kannattavia niiden palvellessa rakennusta kahdessa roolissa. Energiapaalut ovat samaan aikaan osa rakennuksen energiajärjestelmää ja toimivat samalla rakennuksen kantavana rakenteena. (Sadeghi ym. 2022, 1.)

Energiapaalu on maalämpöratkaisu, joka koostuu kantavasta paalusta ja sen sisään rakennetusta lämmönvaihdinjärjestelmästä. Lämmönkeruujärjestelmä koostuu lämmönkeruuputkista, liitoksista, jakotukeista tai jakokaivosta riippuen lämmönkeruuputkien yhteen liittamisestä sekä sulkuventtiilistä. (Uponor 2015.) Lämmönsiirtoneste kuljettaa lämpöä paalutukseen ja siitä ympäröivään maaperään. Energiaa pumpataan lämpöpumpun kautta rakennuksen lämmittämiseen tai viilentämiseen. (Sadeghi ym. 2022.)

Paalujen kautta maahan ladattava lämpö voidaan ottaa esimerkiksi aurinkokeräimillä, asfalttipinnoilta, ilmanvaihtojärjestelmästä tai teollisen prosessin hukkalämmöstä. Viilennysaikana esimerkiksi syntynyt hukkalämpö johdetaan maaperään, jotta maaperän lämpöprofiili ei muutu heikentäen lämmitystehoa. Energiapaalut ovat aina osa energiasuunnittelun kokonaisuutta, jonka mitoitus on tärkeää. Suunnittelussa on tärkeää tietää lämpötilajakauma savessa sekä pohjavesien liikkeet. (Esterinen ym. 2014, 5.) Suunniteltaessa mitä tahansa energiaratkaisua, tulee ensin selvittää mikä on kokonaistarve. Suunnittelu- ja laskuohjelmat vaihtelevat eri toimijoiden kesken ja suunnitteluun onkin syytä varata aikaa eri vaihtoehtojen läpikäymiseksi. (Brandt 2022.)

Energiapaalut voidaan jakaa asennustyyppin, asennustavan sekä materiaalin mukaan.

Elementtipaalut asennetaan maahan valmiiksi rakennettuina, esimerkiksi teräspaalut tai betonipaalut. (Sadeghi ym. 2022, 2–3.) Teräspaalusta saadaan energiapaalu asettamalla tehtaassa ilmastointiputki paalun sisään. Teräspaalut jaotellaan teräsbetonipaaluun sekä teräsluontipaaluun. Nämä ovat yleisimpiä paalutyyppisiä Suomessa. Paalutuksen jälkeen paaluun asennetaan kollektoriputki, jonka jälkeen paalu täytetään täyteaineella. (Uponor 2015.)

Kaivinpaalut taas asennetaan paalutuspaikalla, jolloin paalun paikalleen laiton ja siihen sijoitetun lämmönkeruuputkisto jälkeen se täytetään täyteaineella. Lyöntipaalut asennetaan nimensä mukaisesti lyömällä nämä maahan tai painamalla staattisen paineen avulla. (Esterinen ym. 2014, 5.)

Porapaalut rakennetaan porausreikiä hyödyntämällä. Porareikään asennetaan rauditus sekä lämmönsiirtoputket ja lopuksi porareikä täytetään täyteaineella. Porapaalut voidaan jakaa edelleen porapaaluihin sekä kairapaaluihin. (Sadeghi ym. 2022, 3.)

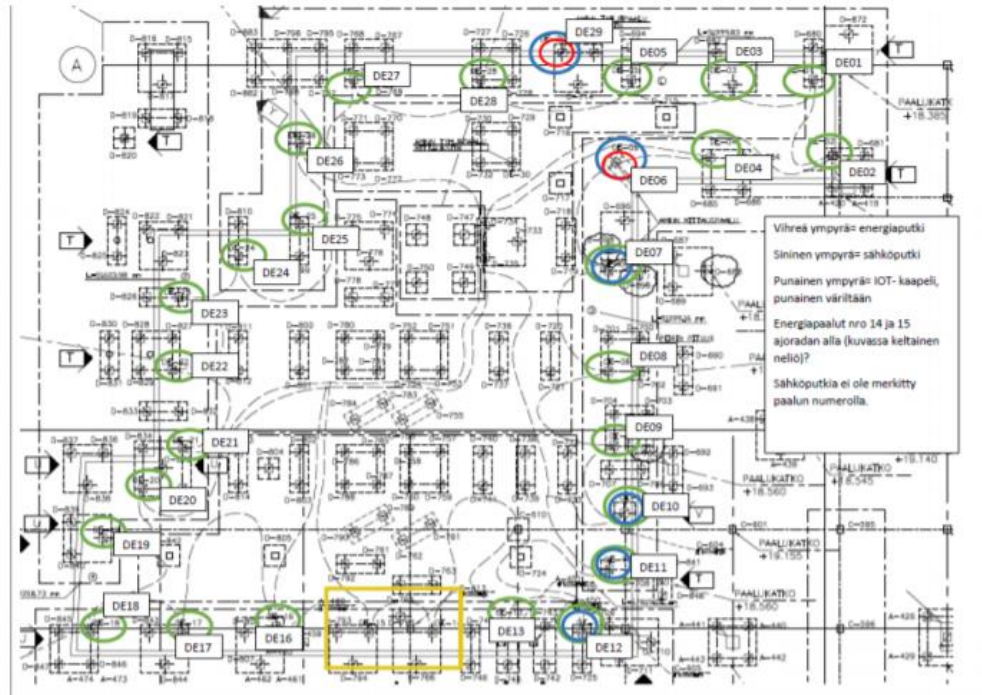
Energiapaalujen täyteaineen lämmönjohtokyvyllä on huomattava vaikutus lämpöenergian varastointikykyyn. Myös lämpöjakauma savessa ja sen geologiset olosuhteet muun muassa pohjavesivirtauksineen tulee tietää lämpöenergiavarastoa mallintaessa. (Esterinen ym. 2014, 13, 16.)

4.3.1 Skanssin Torni Turussa, Suomi

Skanssin Torni valmistui vuonna 2019. Talossa on 71 asuinhuoneistoa, parkkihalli, kuivaushuone sekä varastotilat (YH Kodit Oy 2022). Rakennuksen suunnitteluvaiheessa tehtiin energianoptimointi ja yhtenä ratkaisuna olivat energiapaalut, joilla tuotetaan esilämmitys. Skanssin Tornin energian optimoinnilla energiankulutus on 85 kWh/m², kun se ilman tätä olisi ollut 136 kWh/m². Luvut perustuvat normeerattuihin arvoihin. (nollaE 2019.)

Skanssin Tornissa on 28 energiapaalua, jotka ovat pituudeltaan 15–18 metriä. Paalut ovat betonipaaluja, joiden sisälle on asennettu tehtaalla halkaisijaltaan 100 mm ilmanvaihtoputki. Paalun asennuksen jälkeen paalussa olevaan ilmanvaihtoputkeen asennettiin työmaalla lämmönkeruuputki. Energiapaalujen määrä ja sijoittelu perustuvat rakennuksesta tehtyyn energiaoptimointiin. Energiapaalut on jaettu niin, että kolmessa piirissä on kuusi paalua sekä kahdessa piirissä viisi paalua. Piirit ovat keskenään rinnan, josta ne ovat yhdistetty jakotukkiin vaakaputkituksen avulla. Jakotukkeja on aina kaksi, paluu- ja menopuolelle omansa. (Lautkankare 2021.)

Alla olevassa kuvassa pohjapiirustus energiapaalujen sijoituksesta rakennuksen alla.



Kuva 21. Pohjapiirustus energiapaalujen sijainnista (Lautkankare 2021).

Jakotukeista jaetaan lämmönkeruuneste (vesi-glykoliseos haluttuun paikkaa esimerkiksi esilämmityspattereille tai maalämpöpumpulle. Talvella maasta otetaan lämpöä huoneistojen lämmitykseen, kesäisin taas lämpöä ladataan maaperään ja maaperää käytetään viilennykseen. Kyseisessä asuinrakennuksessa lämpöenergia varastoidaan kesällä hyödyntäen huoneistokohtaisia esilämmitys- ja viilennyspattereita, jotka keräävät lämpöenergiaa ilmanvaihtokoneelle tulevasta ilmasta samalla viilentäen huoneistoon tulevaa ilmaa. Tästä se siirtyy lämmönkeruunesteessä energiapaalujen kautta maaperään. Korkean hyötysuhteen ilmanvaihtokoneet eivät voi vastaanottaa alle 0 °C ilmaa. Paaluissa kiertävällä nesteellä ulkoilma lämmitetään talvella 0 °C ja kesällä viilennetään +4 °C. IV-koneen LTO-kenno ottaa osan lämmön talteen kesällä, talvisin taas lämmittää sen +18 °C. Poistoilma on +21–23 °C. (nollaE 2018.)

Asuinrakennuksessa on siis optimoitu ilmanvaihto. Talossa on 71 kpl esilämmitys- ja viilennyspatteria, yksi huoneiston ilmanvaihtokonetta kohden.

Skanssin Tornissa huomattiin heti käyttöönoton jälkeen ongelmia verkoston paineiden laskettua nolnaan. Vuonna 2020 porattiin viereen lämpökaivo, jolla oli tarkoitus korvata kahden paalupiirin energia, mutta koska paineongelmat eivät hävinneet, jouduttiin yksi jakotukki ottamaan pois käytöstä. Tämä yksi porattu lämpökaivo ei riitä korvaamaan kuin pienen osan suunnitelman energiasta. Otettua lämpöenergian määrää ei ole porakaivosta mitattu. (Nyström 2022.)

Energiapaalujen yhtenä heikkoutena voidaankin pitää niiden korjattavuutta. Paalut ovat sijoitettuna rakennuksen alle ja ne ovat yhdistettyinä toisiinsa talon alle vaakaputkistoilla.

Skanssin Tornin energiapaaluperustus on yksi LÄMPÖÄ-hankkeen pilotointikohteista, jonka tarkoituksena on myös energiapaalujen tutkimus pidemmällä aikavälillä. Geologian tutkimuskeskukselta hankittiin maaperän lämpötilojen mittaamiseen kuitukaapelia ja mittauslaitteisto. Maaperän lämpötilan mittaamiseen käytetään valokuitukaapelia. Mittaus voidaan suorittaa siitäkin huolimatta, että kaapeli olisi poikki ja kaapelin käyttöikä on yli 20 vuotta. Paaluihin asennettujen mittauskaapelien avulla pystytään mittaamaan energiapaalun lämpötilaa sen toiminnan aikana ja saada jatkuvaa informaatiota maaperän lämpötilasta ja lämpökäyttäytymisestä. Kuitukaapeli asennettiin keruuputkien asennuksen yhteydessä. Käytettävä mittaus on lyhenteeltään DTS (Distributed Thermal Sensing). (Lautkankare 2021.)

DTS-mittaus Skanssin Tornissa 26.- 27.2.2021

Skanssin Tornissa suoritettava DTS-mittaus antaa oleellista tietoa maaperän lämpöenergian monitoroinnin lisäksi myös paalujen käyttäytymisestä pidemmällä aikavälillä. Vastaavaa mittausta ja tulosten keruuta ei tiettävästi ole muualla. (Martinkauppi 2022.)

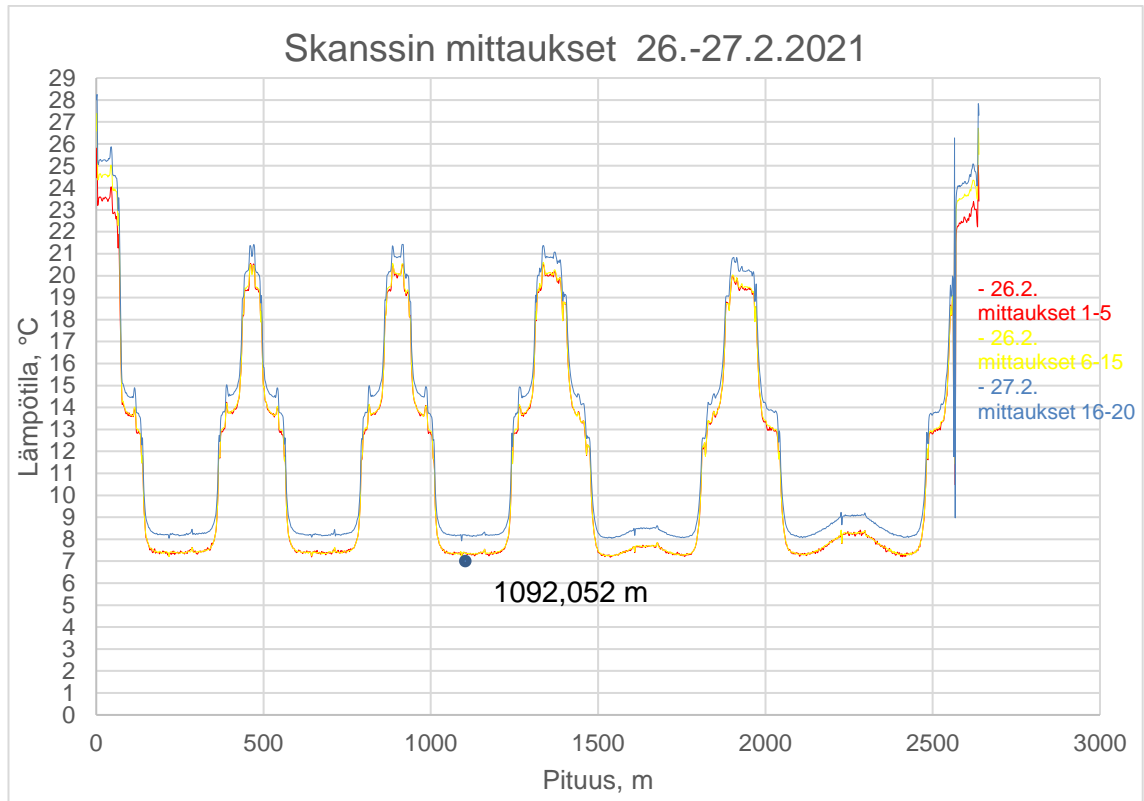
DTS-mittaus saa nimensä sen kyvystä havaita muutoksia lämpötilassa koko mittauksessa käytettävän optisen kuidun matkalla perustuen samoihin periaatteisiin kuin valokaapelitutka eli OTDR (Optical Time Domain Reflectometer). Mittaus on optinen mittaustapa, joka perustuu valon takaisin sirontaan optisessa lasikuitukaapelissa. DTS-mittauksessa käytettävä valokuitukaapeli toimii lineaarisena sensorina koko pituudeltaan ja mahdollistaa näin energiakaivon lämpötilan mittaamisen samanaikaisesti koko kaivon syvyydeltä. Tulokset saadaan etäisyyden funktiona. (APSENSING 2022.)

Skanssin Tornin energiapaalujen mittaus aloitettiin 26.2.2020 aamulla juottamalla kuitukaapeleita yhteen. Laitteistona toimi Fujikura FSM-60S. Fujikura FSM-60S laitteeseen sisältyvä ohjelmisto tarjoaa muun muassa mahdollisuuden ladata dataa PC: lle raportointia varten sekä ladata liitännän käyttöohjelmiston internetin kautta suorituskyvyn ylläpitämiseksi.

Mitattujen sirontojen etäisyys mittalaitteesta määritetään ajasta, joka valolla kestää matkata sirontakohtaan ja sieltä takaisin mittalaitteelle. (Bakker ym. 2020, 2.) Ennen varsinaisen mittauksen aloittamista suoritettiin mittauksen kalibrointia ja säätöä. Tähän lukeutuivat muun muassa mittaustiheyden ja herkkyden säätö. Tämän jälkeen mittauslaitteen annettiin tasaantua ennen varsinaisen mittauksen aloittamista. (Martinkauppi 2021.)

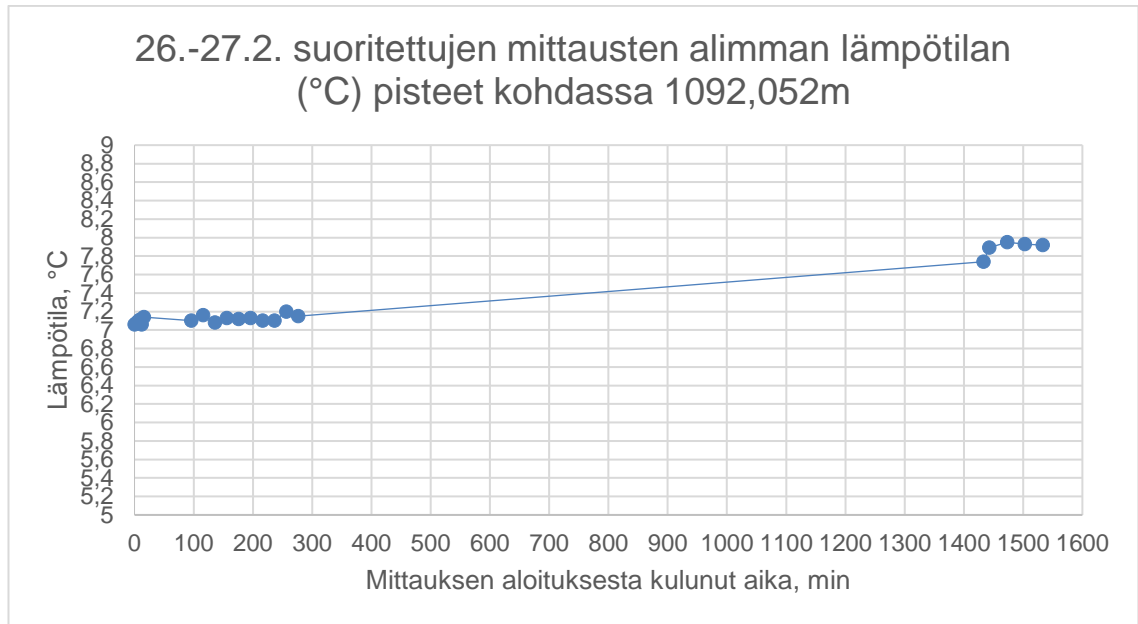
Mittaustuloksia:

Tarkkaa analysointia ei tuloksista voi tehdä, koska tiedossani ei ole mitattujen paalujen sijaintia. Maaperän lämpötila ei ole kuitenkaan alentunut. Mittaustuloksia taltioitiin yhteensä 20. Ensimmäiset 15 mittaustulosta 26.2. ja 27.2. viimeiset viisi mittausta. 26.2. mittauksista alin mittaustulos paalun alapäässä oli 7,1 °C kohdassa 1 092,052 m (kaapelin kulkema matka). Tämä sijoittuu kolmannen paalun alapäähän. Alla olevassa kaaviossa esitetty 26.2. mittaus 5 ja 10 sekä 27.2. mittaus 5. Tuloksissa näkyy, että lämpötila on noin 0,8 °C ylempi 27.2. mittauksissa, joiden viiden mittauksen keskiarvo on 7,9 °C. Vastaavasti 27.2. mitatut tulokset ovat ylätasolla korkeampia. Muotojen suhteen mittaukset ovat yhtenäiset. Kuvio alla.



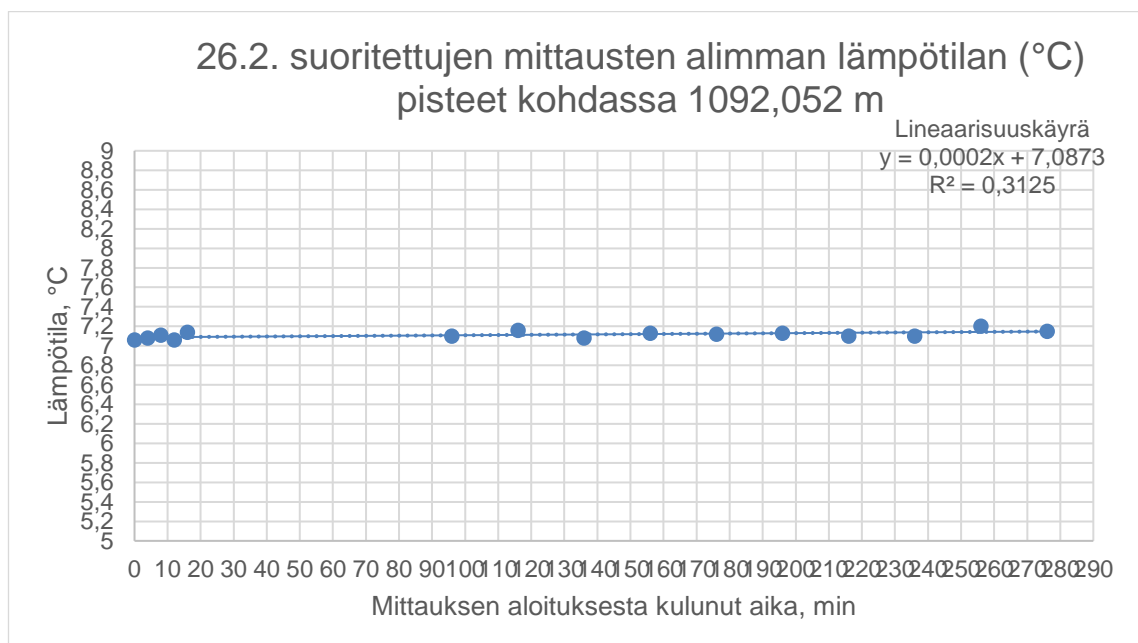
Kuvio 4. Skanssissa suoritetuista mittauksista kolmen mittauksen käyrät.

Mittauspäivien välillä lämpötilat nousevat, mutta tuloksista ei nähdä, milloin lämpötila on alkanut siirtymään ylöspäin ja jatkuuko nousu ensimmäisten 27.2. mitattujen viiden tuloksen jälkeen. Alla olevassa kuviossa kaikkien 20 mittauksen tulokset lämpötilaltaan alimmassa pisteessä kohdassa 1 092,0520 m.



Kuvio 5. 26.–27.2. suoritettujen mittausten pisteet kohdassa 1 092,052 m.

Sitä vastoin 26.2. mitatut tulokset ovat yhteneväisiä. Keskiarvo alimmassa lämpötilassa yhdessä paalussa on 7,1 °C. Lineaarisuuskäyrä alla olevassa kuviossa alimman lämpötilapisteen (1 092,052 m) kohdalla mittauksissa 1–15.



Kuvio 6. Lineaarisuuskäyrä 26.2. mittauksista kohdassa 1092,052 m.

Tuloksena mittauksessa maaperän alimmaksi lämpötilaksi saadaan 7,1 °C, joka on 26.2.2021 suoritettujen mittausten keskiarvo kolmannen paalun alapäässä keskihajonnan ollessa 0,039. Muiden paalujen alimpien lämpötilojen keskiarvoksi saatiin 7,2 °C. Syklin kierto (lataus/purku) sekä varastointiaika on otettava huomioon tuloksia arvioitaessa. Lämpövarasto on ollut toiminnassa tällöin noin kaksi vuotta ja mittaustilanteessa ollaan purkukauden loppupuolella (alku: marras-/joulukuun alku, loppu: maaliskuu-/huhtikuun loppu). Huomioitavaa on myös, että tiedossani ei ole mitattujen paalujen sijaintia. Mikäli nämä ovat rakennuksen reunoilla, on keskiosa yleensä lämpimämpi. Toinen huomioitava asia on, että käytöstä on poissa yksi jakotukki.

4.3.2 Turun Toriparkki, Suomi

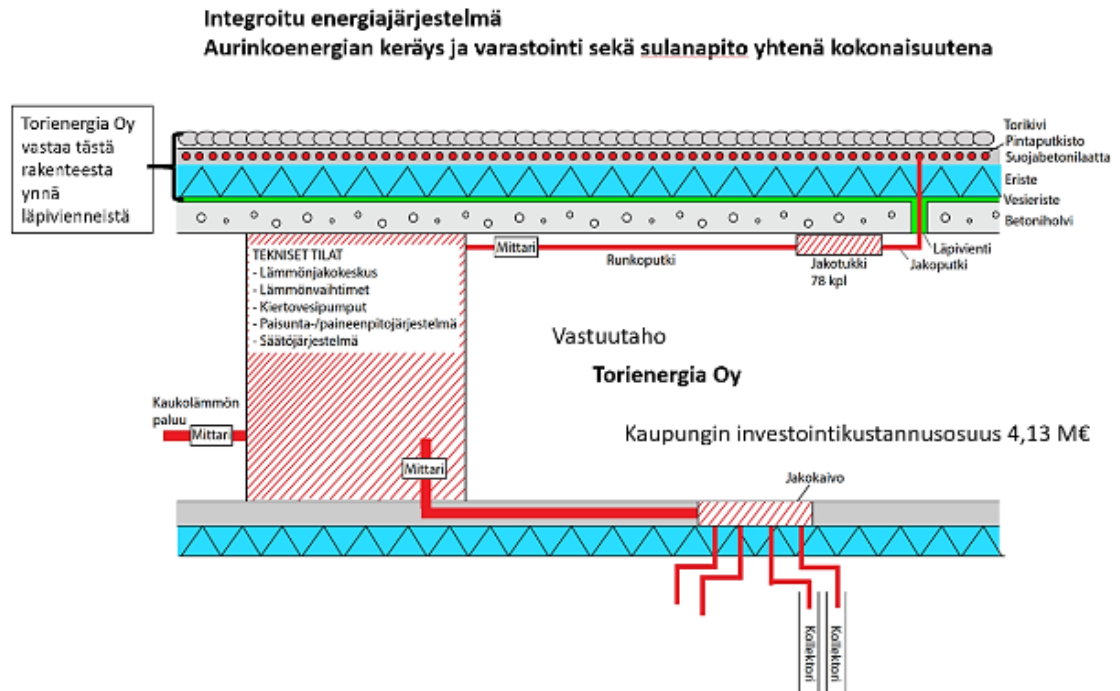
Turun Kauppatorin uudistus käynnistyi toukokuussa vuonna 2018. Tällöin vanhat torirakennukset purettiin ja aloitettiin kaivaustyöt. Uusi kauppatori valmistui syyskuussa 2022. Kauppatorin alle valmistui 30 322 m² Toriparkki, jonka alapuolella oleva maaperä toimii samalla myös suurena 11,2 GWh lämpövarastona. Toriparkkia suunniteltaessa energiatehokkuus oli ratkaisevassa asemassa. Suunnittelussa on yhdistetty aurinkoenergia, geoterminen energia sekä maanalainen lämpövarastointi. (Salomaa 2021.)

Toriparkki Torin maaperä on savimaata. Alla oleva kallioperä on ylimmillään luoteissivulla ja viettää kaakkoon. Kallion päällä on 3–10 m moreenikerrostuma, jonka päällä 5–50 m savikerros. (Heikinheimo 2012, 1.) Alueella tehtiin kolmesta paikasta TRT-mittaukset. Näistä saatiin 15–20 % suurempi lämpökapasiteetti kuin savella yleensä johtuen sen tiiviyydestä. Rakennus- ja energiaratkaisuja suunniteltaessa selvitettiin ensin, mikä on energian kokonaistarve ja laskettiin taloudellisesti kannattavin energiaratkaisu huomioiden myös lämpöhäviöiden minimointi.

Turun Toriparkin suunnittelua ohjasi energiatehokkuus ja tämän aikaansaamiseksi luotiin alla olevan kuvan mukainen integroitu energiajärjestelmä, jossa yhdistyy aurinkoenergian talteenotto, lämpöenergian

varastointi, Toriparkin ja paviljonkien lämmitys sekä viilennys ja torialueen katutason sulanapito. (Brandt 2022.)

Alla olevassa kuvassa havainnollistettu Toriparkin energiajärjestelmää.



Kuva 22. Kuvassa Toriparkin energiajärjestelmä (Turun kaupunki 2019).

Toriparkkia tukemaan tarvittiin paalut. Geoenergian hyödyntäminen sekä lämpövarastoinnin osalta energiapaalut olivat siis luonteva ratkaisu. Paalutuksista noin kolmasosa toimii energiapaaluina. Energiapaalut ovat noin 50 m ja lämmönsiirtoaineena on vesi. Rakennuslupa määrittää, että lämpövarasto savimaalla ei saa ylittää 40 °C. Tämän ylittäminen ei ole teoreettisesti mahdollista, koska torikivityksessä käytetyn kiven pintalämpötila ei ylitä 35,8 °C. Kauppatorin kivetyksen alle on asennettu vaakaputkisto, jonka tehtävänä on ottaa talteen aurinkoenergiasta syntyvä lämpöenergia. Lämmönkeruunesteinä toimii vesi-glykoliseos. (Brandt 2022.)

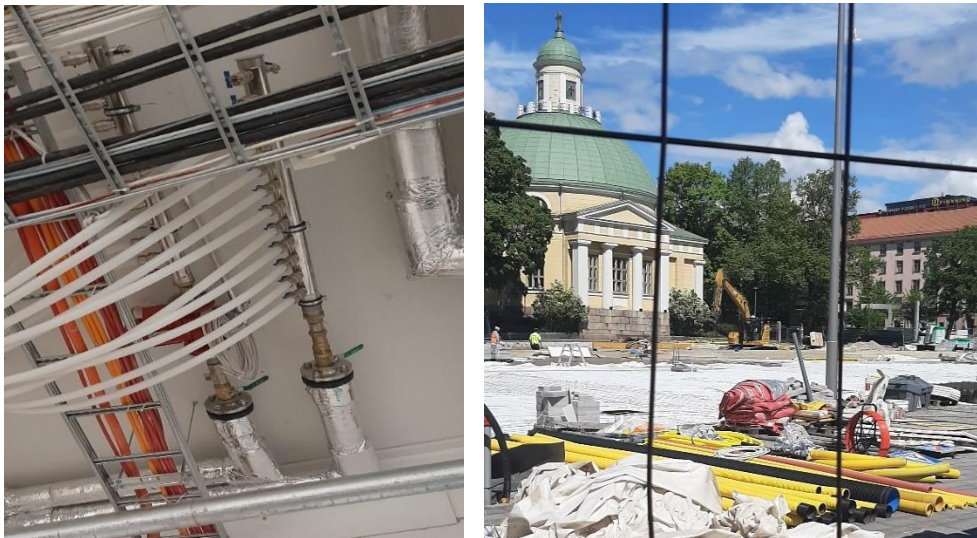
Simuloinnin avulla optimoitiin tarvittavien energiapaalujen määrä sekä näiden etäisyys toisistaan energiavirtojen funktiona. Tässä varmistettiin myös, että energiapaaluja ympäröivä maaperä ei pääse missään jäätymään tai lämpötila

nousemaan liian korkeaksi. Näin estetään saven rakenteenmuuttumista sekä kantavuuden heikkenemistä. (Salomaa 2021.)

Aurinkoenergia talteenotto toteutetaan yhdistetyllä aurinkoenergian keräimellä ja liukkaudentorjuntaputkistolla. Sulanapidossa tärkeää on tasaisen lämmön tuottaminen tarkoin määritellyissä olosuhteissa koko torin alueelle liukkaudentorjumiseksi. Aurinkoenergiaa taas kerätään enemmän alueilta, joissa aurinkolämpö vaikuttaa pintakivetykseen parhaiten.

Liukkaudentorjuntajärjestelmään kuuluu pintaputkiston lisäksi mm. runkoputket ja jakoputket, jakokaivot ja jakotukit säätö- ja sulkuventtiileineen, kiertovesipumput, lämmönjakokeskus, lämmönvaihtimet, paisunta-/paineenpitojärjestelmä sekä säätöjärjestelmä. (Turun kaupunki 2019.)

Alla vasemmalla kuva Toriparkin katossa olevasta jakotukista sekä oikealla kuva torialueen sulanapitojärjestelmän ja aurinkolämpökeräimien asennustöistä.



Kuva 23. Vasemmalla Toriparkin katossa oleva jakotukki ja oikealla kuvassa torialueen päällisen sulanapitojärjestelmän ja lämpökeräimien asennusta.

Lämpövarastoon kesän aikana ladattavan lämpöenergian määräksi on arvioitu 11,2 GWh lämpötehon energiaratkaisussa ollessa 6,6 MW. Talteen otettavan lämpöenergian määrä vastaa noin 560 omakotitalon vuosittaista lämmönkulutusta. Verrattaessa lämpöpumpuilla toteutettuun malliin

kausivarastointijärjestelmällä saadaan noin 950 000 CO₂-vähennys vuositasolla. (Salomaa 2021.)

Järjestelmä on kaksisuuntainen; kesällä otetaan viilennystä ja talvella lämmitystä. Tällä on tarkoitus kattaa sekä toriparkin että kolmen makasiinin lämmitys torin sulanapidon lisäksi. Energiasta suurin osa kuluu sulanapitoon. Sulanapidon huipputehon tarve ei kuitenkaan osu samaan aikaan toriparkin huipputehon tarpeeseen, sillä sulanapitoa ei suoriteta alle -15 °C:een lämpötilassa. (Salomaa 2020, 52–53.) Lämpövaraston latautumiseen kuluva aika on noin viisi vuotta. Käytössä on tällöin varajärjestelmänä toimiva kaukolämpö. (Brandt 2022.)

Ympäristön näkökulmasta maaperän lämpeneminen on huomioitu eikä energiapaaluissa käytettävä lämmönsiirtoneste (vesi) ole vaaratekijä ympäristölle. Sulanapitojärjestelmän merkitys ympäristölle ja vieressä oleville rakennuksille on huomattava vähentyvän suolauksen takia. Suolaus sekä hiekotus aiheuttavat muun muassa keväisin ilmanlaadun heikkenemistä ja suolaus itsessään edistää korroosioriskiä rakennuksissa. (Tiehallitus 1991, 3.)

4.4 MD-BTES (Keskisyvä porareian lämpöenergiavarastointi)

Kysyntä on vuosien aikana kasvanut keskisyvien energiakaivojen osalta. Keskisyvillä energiakaivolla tarkoitetaan 500–3 000 m syvyyteen porattuja kaivoja. Maankamaran lämpötila nousee syvemmälle mentäessä ja täten itse kaivosta saatava lämpömäärä nousee. Perinteisiin maalämpökaivoihin verrattuna etu on myös pienemmän maapinta-alan tarve. Yleisimmin käytetty keruuputki näissä syvyyksissä on koaksiaaliputki. (Heinonen ym. 2021, 10.) Suomessa kiven keskimääräinen lämmönjohtavuus on noin 3,2 W/(m·K). Erot johtuvat pääasiassa mineraalikoostumuksesta. Geoterminen gradientti taas vaihtelee 8–17 K/km johtuen vuotuisesta maan keskilämpötilasta. (Arola ym. 2022, 4.)

Suomen maaperän sekä geologisten ominaisuuksien tuntemus ovat äärimmäisen tärkeitä suunniteltaessa geoenergian ja lämpövarastoinnin

hyödyntämistä. Tätä varten Geologian tutkimuskeskus on suorittanut useita koeporauksia eri syvyyksillä ja putkimateriaaleilla eri puolilta Suomea. Näiden avulla on kyetty luomaan mallinnuksia, joita voidaan hyödyntää niin yksittäistä poralämpökaivon toimintaa arvioitaessa kuin porareikäkaivon hyödyntämisessä lämpövarastona. Mallinnuskohteita Suomessa on esimerkiksi Vantaalla, Jyväskylässä ja Rovaniemellä. Näiden paikkakuntien tietojen avulla tehtiin mallinnuksia, joissa on käytetty neljän pituisia porareikälämmönvaihtimia kahdella eri putkityypillä. Käytetyt pituudet ovat 600 m, 1 000 m, 2 000 m sekä 3 000 m ja putkityyppien eroavaisuus korostuu lämmönjohtavuudessa. Kyseisessä tutkimuksessa VIT:lle käytettiin lämmönjohtavuutta $0,02 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. VIT-putkella (Vacuum Insulated Tubing) tarkoitetaan tyhjiöeristettyä putkea. Tämä koostuu kahdesta teräsputkesta, jotka on erotettu toisistaan ja niiden välillä vallitsee tyhjiö. Mallit osoittivat, että kunkin paikan lämpöenergian tuotto on suoraan verrannollinen porareikien syvyyteen. Kun syvyys kasvaa 600 metristä 1 000 metriin, lämpöenergian tuotto on suurin piirtein kaksinkertainen ja lähes kolminkertainen mentäessä 1 000 metristä 2 000 metriin. (Arola ym. 2022, 4, 7.)

Alla olevassa taulukossa suurin lämpöenergiantuotanto (MWh/a) VIT-putkella. 600 m porakaivolla virtausnopeus 3 l/s, muilla syvyyksillä 5 l/s. (Arola ym. 2022, 11.)

Taulukko 4. Lämpöenergiantuotanto VIT-putkella (Arola ym. 2022, 11).

Well depth (m)	Vantaa (MWh/a)	Jyväskylä (MWh/a)	Rovaniemi (MWh/a)
600	170	150	125
1000	330	310	270
2000	980	950	830
3000	1880	1830	1590

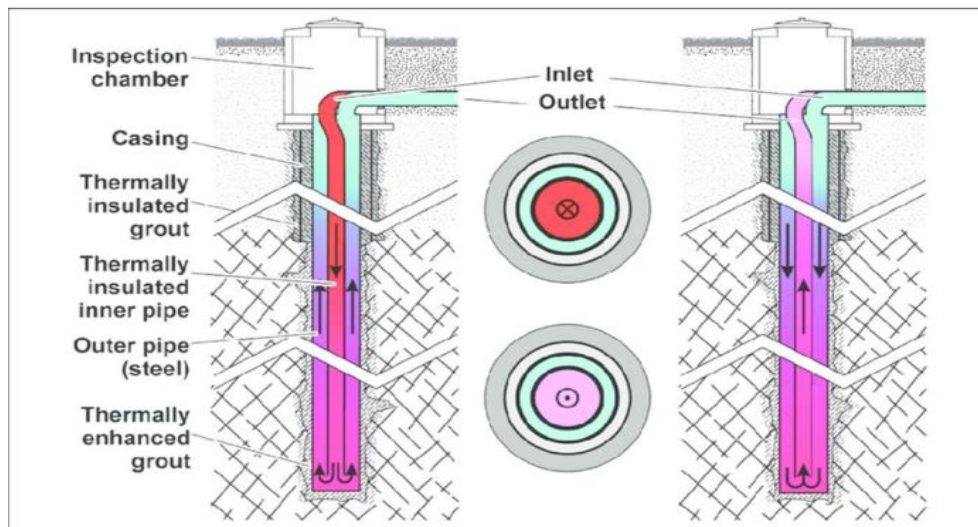
Keskisyvässä 1 000 m lämpökaivossa esiintyy sama ilmiö kuin matalassa 300 m syvässä lämpökaivossa. Mitä ohuempi kerros on savikiveä ja maapeitettä,

sitä parempi on kaivon antoisuus. Tämä johtuu kaivon suuremmasta kosketuksesta hyvän lämmönjohtavuuden omaavan graniitin/gneissin kanssa. Keskisyvissä 2 000 m kaivoissa savikivi toimii myös eristeenä ja nostaa gradienttia. (Heinonen ym. 2021, 30.)

Keskisyvään maalämpöpumpputjärjestelmään kuuluvat lämmönlähde, lämmönpoisto- tai keräysjärjestelmä sekä lämpöpumppu. Porakaivosta saatava lämpötila on nostettava vastaamaan käyttötarvetta ja tämä tapahtuu lämpöpumpussa. Lämmönpoistopiiri koostuu avoimesta tai suljetusta putkistosta. (Lund 2019, 7–8.) Avoimessa kierrossa kaivon keskellä on yksi eristetty putki, joka nostaa kiertävän nesteen ylös pumpulle. Kaivon yläosasta esimerkiksi ylin 300 m putkitetaan ulkolaidalta ja tästä alaspäin mentäessä porareian seinämä eli kallio toimii ulkoputken roolissa. Energiakaivon syvyyden kasvaessa lämmönkeruunesteen virtausnopeutta voidaan kasvattaa, mutta pumppausenergian vähentämiseksi ja painehäviöiden minimoimiseksi myös keruuputken halkaisijan tulisi kasvaa. Koaksiaaliputkella saadaan suurempi lämmönsiirtopinta-ala sekä suurempi virtausnopeus. Nämä pienentävät painehäviöitä verrattaessa samanpituiseen U-putkeen. (Heinonen ym. 2021, 10.) Porakaivon käytössä tulee huomioida, että toisin kuin pintamaan sen olosuhteet eivät normalisoidu nopeasti ennalleen, vaan siinä piilee jäätymisriski, mikäli kallioperän palautumisesta ei huolehdita esimerkiksi lämmönoton tauottamisella (Puranen 2016, 6).

Porakaivoa voidaan käyttää kausiluontoisena lämpöenergiavarastona varastoimalla siihen esimerkiksi aurinkoenergiaa tai teollisuuden hukkalämpöä myöhempää käyttöä varten. Kaivon toiminta voidaan jakaa lämmön poistoon ja ruiskuttamiseen. Lämpöä kaivosta nostettaessa kylmää vettä syötetään porauskaivoon, joka kerää lämpöä kallioista. Ruiskutuksessa porareian lämmönvaihtimeen ruiskutetaan lämmintä vettä lataamaan lämpöä kallioperään. Putkessa virtaussuunta vaihdetaan ruiskutuksen aikana ja tämä vaikuttaa kaivon suorituskykyyn. Virtausolosuhteita saatetaan joutua säätämään erikseen lämmön poistossa ja ruiskutuksessa. (Bär ym. 2015, 1–2.) Alla olevassa

kuvassa koaksiaalisen poralämmönvaihtimen toiminta lämmön lataus- ja lämmön purkuvaiheessa.



Kuva 24. Vasemmalla puolella lämmön lataus ja oikealla puolella lämmön purku koaksiaalisessa lämmönvaihtimessa (Bär ym. 2015, 2).

Porakaivoja voi olla myös useampi, jolloin puhutaan lämpökaivokentästä. Lämpökaivojen välinen etäisyys toisistaan vaikuttaa lämpötilajakaumaan ja täten saantoon. Lämpökaivokentän mitoitus on tärkeää ja tämä tulee suunnitella tarkoin. Liian suuresta lämpökaivokentästä aiheutuu enemmän taloudellisia kustannuksia, kun taas liian pieni kenttä ei vastaa tarpeita. 2 000 m syvästä porakaivosta tehdyt simuloinnit osoittavat, että lämpökaivo saattaa tuottaa lämpöä 110 kW saavutettuaan tasapainotilan. Lämmön varastoinnilla lyhyillä latausjaksoilla voidaan saavuttaa jopa 1 MW:n latausteho. Kaivoja ollessa useampia suorituskyky paranee, mutta porakaivot alkavat myös vuorovaikutukseen keskenään niiden määrän ollessa yli neljä. Tämä vähentää yhdestä kaivosta saatavan energian määrää. (Lund 2019, 64–65.)

Maiden geologiset ominaisuudet vuoden keskilämpötiloista lähtien vaihtelevat suuresti, joten esimerkiksi Etelä-Euroopan ja Suomen porakaivoista saatavien lämpöenergian määrien erot voivat olla suuria. Porareikäkaivon suunnittelussa on myös huomioitava kallioperässä olevat raot, kallioperän tiheys sekä pohjaveden vaikutukset. (Arola ym. 2022, 3, 16.)

4.4.1 Salon Korvenmäen Ekovoimalaitos, Suomi

Salon Korvenmäen Ekovoimalaitoksen toiminta alkoi vuonna 2021. Ekovoimalaitoksen polttoaineena on polttokelpoinen jäte ja tästä syntyvää hukkalämpöä tullaan hyödyntämään porareian latauksessa. (Lounavoima 2022.) Ekovoimalaitoksen kaukolämpöteho on 34 MW. Lämpökaivojen on suunniteltu kattavan 400–500 omakotitalon vuotuista lämmöntarvetta, noin 8–10 GWh. (QHeat 2021.)

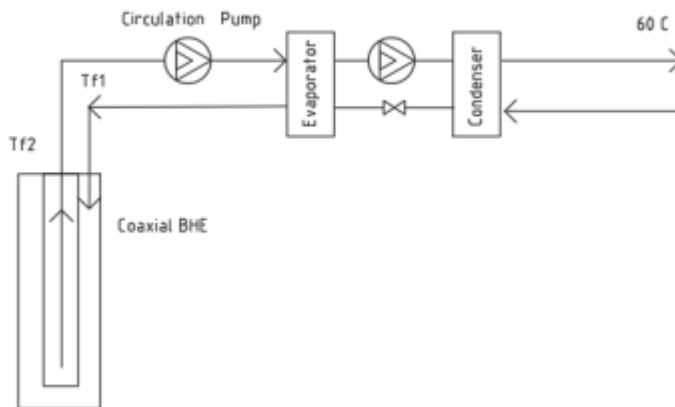
Korvenmäelle on suunniteltu porattavaksi kuusi keskisyvää lämpökaivoa. Ensimmäisen lämpökaivon valmistustyöt aloitettiin vuonna 2019 sen valmistuessa loppukesästä 2021. Lämpökaivo oli suunniteltu kytkettäväksi Korvenmäen ekovoimalaitoksen kaukolämmön tuotantoprosessiin jo samana vuonna, mutta komponenttien saatavuusongelmat viivästyttivät suunnitelman toteutumista. Porareikää on tarkoitus ladata ja purkaa vielä tämän vuoden aikana, jotta lopullinen päätös ja suunnitelmat viiden muun porareian porauksen aloittamisesta voidaan tehdä. Alkuperäinen tavoite oli 2 000 m syväkaivo, mutta tämä keskeytettiin 1 600 m:iin. Tähän saakka poraus meni vaivattomasti ja harkinnan jälkeen porausta ei jatkettu enää syvemmälle, koska haluttiin minimoida riskit. (Onikki 2022.)

Purku- ja lataustehoja simuloitiin COMSOL Multiphysics 5.5, jolla määritettiin myös 45 MW:n tehoon vaadittavien lämpökaivojen lukumäärä sekä optimaaliset etäisyydet. Tarkastelu tehtiin 25 vuoden ajanjaksolle. Kuuden lämpökaivon on tarkoitus tuottaa lämpöä noin 8–10 GWh/vuosi. (Lund ym. 2020.)

Lämpökaivoon ladataan 80 °C vettä ja lämpökaivojen etäisyydeksi tulee 15–20 m. Energiavarastoa ladataan huhtikuusta marraskuun loppuun ja purku tapahtuu talvikuukausina, kun lämmitysenergiaa tarvitaan enemmän. (Onikki 2022.)

Alla olevassa kuvassa kuvataan lämpöjärjestelmän toimintaperiaatetta. Tässä kaksi asteista vettä syötetään porareikäkaivoon ulkoputkea pitkin, jossa se lämpenee kallioperän lämpötilan vaikutuksesta ja pumpataan lämpöpumpulle

koaksiaaliputken sisäputkea pitkin. Lämpöpumpussa lämmönsiirtoneste lämmitetään kaukolämpöön soveltuvaan lämpötilaan. Lämpöä varastoidessa kiertosuunta muuttuu ja hukkalämmöllä lämmitettyä vettä ladataan sisäputkea pitkin. (Lund ym. 2020.)



Kuva 25. Lämpöjärjestelmän toimintaperiaate (Lund ym. 2020).

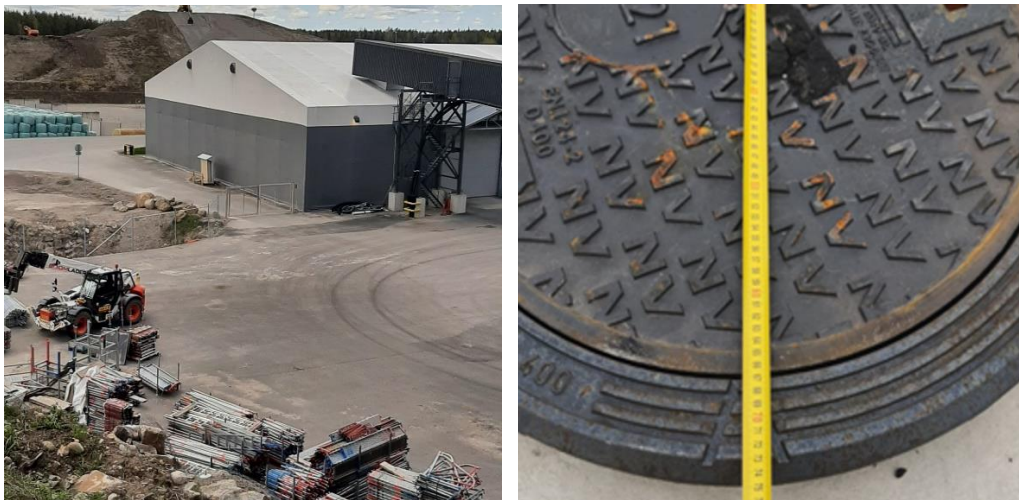
Simuloinneissa tärkeitä arvoja ovat muun muassa käytetty lämmönsiirtoneste, maaperän ominaisuudet ja sen lämpökapasiteetti, kaivon pituus, ladattava lämpömäärä sekä BHE-putken ominaisuudet. Parametrit vastaavat Espoon Koskelon pilottisuunnitelmassa käytettyjä parametreja, jotka vastaavat keskimääräisiä olosuhteita Suomessa. Kallioperän (graniitti) lämmönjohtavuudeksi on arvioitu $3 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ja vakuumputken lämmönjohtavuus on $0,02 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Lämmönsiirtonesteena toimii vesi. Mallinnuksessa lämmönsiirtoon putkissa arvot laitetaan sekä ulko- että sisäputkesta ja ne mallinnetaan käyttäen lämmönsiirtoa johtumisen ja konvektion avulla. (Lund 2019, 42.)

Simuloinnissa todettiin, että lämpöä saadaan alussa enemmän, mutta ajan kuluessa kallioperä jäähtyy. Tätä tehon muutosta saadaan vähennettyä lataamalla lämpöä kaivoon. (Lund 2019, 65.)

Kaivojen etäisyyksien vaikutusta toisistaan on simuloitu muun muassa ottotehon lisääntymisen osalta sekä lataustehon laskun osalta kaivoetäisyyksien vähentyessä. Tämä osoittaa, että kaivosta saatavan tehon määrä nousee, mutta vastaavasti lataustehon määrä laskee kaivoetäisyyksien pienentyessä. (Lund ym. 2020.)

Tässä viitatus simuloinnit eivät täysin vastaa Korvenmäen porakaivossa toteutuneita parametreja. Eroavaisuuksia löytyy niin lämmönsiirtonesteen lämpötilassa kuin lämpökaivokentän muodossa sekä kaivojen etäisyyksissä. Myös ensimmäisen porareikäkaivon pituuden alenema vaikuttaa lopulliseen saatavaan tehoon. Lämpökaivot on suunniteltu kolmion muotoon 15–20 m etäisyyksillä toisiinsa. Kuuden kaivon ryhmä todettiin optimaalisimmaksi ratkaisuksi. (Onikki 2022.)

Alla olevista kuvista vasemmalla (a) asfaltoitu pihamaa-alue kuvastaa porakaivolämpövaraston sijoituspaikkaa ja oikealla kuva (b) yhden kaivonkannen koosta.



Kuva 26. Kuvassa vasemmalla lämpökaivojen sijoituspaikka (Hiltunen 2022) ja oikealla lämpökaivon kannen kokoa, jonka läpimitta on noin 70 cm (QHeat 2021).

Vuoden 2023 alkupuolella ratkeaa lisäkaivojen rakentaminen aikatauluineen sekä muun muassa suunniteltujen viiden lisäkaivon porausvyvydet.

4.4.2 Darmstadtin teknillinen yliopisto, Saksa

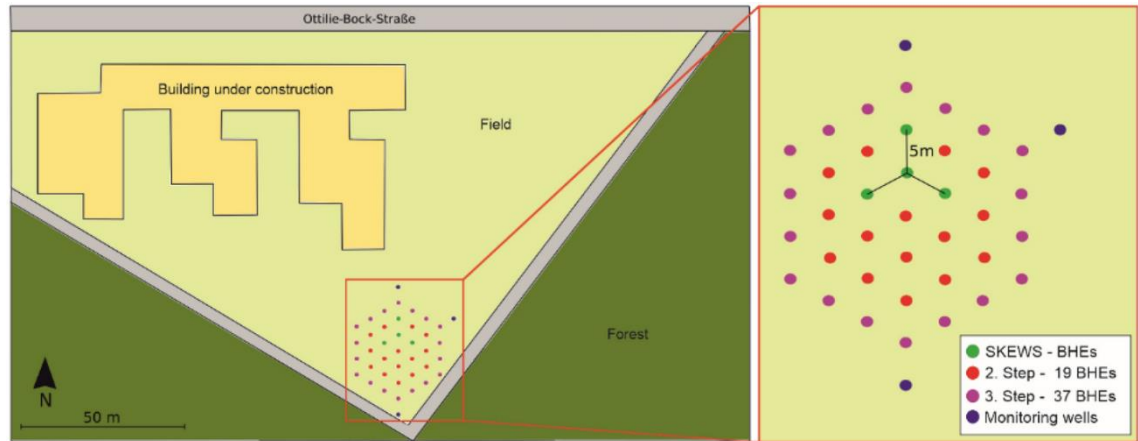
Darmstadtin teknillisellä yliopistolla Lichwiese-kampuksella on rakenteilla pilotointijärjestelmä osana SKEWS hanketta. Pilotointijärjestelmään on tarkoitus rakentaa neljä keskisyvää 750 m porareikäkaivoa. Tästä saadut tulokset ratkaisevat, laajennetaanko lämpövarasto ensin 19 reikään ja tästä vielä myöhemmin 37 reikään. (Bossennec ym. 2022, 1, 3.) MT-BTES:in paikan maaperä koostuu pääasiassa granodioriitista, jonka ylin 4–5 m on sedimenttikerrosta. Granodioriitin ylemmät 30–40 m ovat rapautunutta. (Bär ym. 2015, 4.) Granodioriitti on graniittia muistuttava syväkivilaji, joka on yleinen Suomessakin (Turunen 2018).

Porakaivojen poraustekniikkana käytetään reiän hydraulivasaraporaus tekniikkaa (DTH). Hydraulisen vasaran valinnan syitä ovat muun muassa parempi reiän vakaus ja poikkeaman hallinta. Minimaalinen poikkeama pystyporauskuksen kulmassa BHE-kentillä, joiden porareikien välinen etäisyys on alle 10 m, on tärkeää. (Bär ym. 2015, 7–8.)

MD-BTES:n numeraalisessa mallinnuksessa käytettiin FEFLOW-ohjelmistoa. Maaperän lämpöominaisuuksien myötä mallinnuksessa oletetaan lämpötilan olevan 1 000 m syvyydessä 50 °C. Tämä vastaa geotermistä gradienttia 4 °C/100 m ja pintalämpötilassa käytettiin Darmstadtin 10,1 °C:een keskilämpötilaa. Simulointia varten yhdistettiin geologiset porausaineistot sekä pohjavesimittauksista saadut tiedot. Lämpövarastointi simuloitiin 30 vuoden aikajaksolle, jossa latausaika on 6 kuukautta ja poisto 6 kuukautta. Varastointialueella sijaitsee pohjavesivirtausta, mutta tarkkoja tuloksia niiden aiheuttamista lämpöhäviöistä tiedetään vasta koeporausten jälkeen.

Porakaivo-ryhmän suunnitteluparametreihin porareikien etäisyys toisistaan on 5 m ja lämpövarastokenttä on kuusikulmainen (Bossennec ym. 2022, 3, 7, 10–11).

Alla olevassa kuvassa keskisyvän lämpövaraston suunniteltu sijainti sekä porareikien sijoittelu, jossa huomioitu kolme eri rakennusvaihetta. Lisänä myös pohjaveden seuranta-kaivot sinisellä merkityissä kohdissa.



Kuva 27. Lämpövaraston suunniteltu sijainti alueella vasemmalla ja oikealla porareikien sijoittelu rakennusvaiheineen (Bossennec ym., 2022, 7).

Simuloinneissa latauksen lämpötilaksi määriteltiin 90 °C, joka voidaan tuottaa aurinkolämpökeräimillä. Tämä on myös PE-X-putkien ylälämpötila.

Lämmönpoiston aikana tulolämpötilaksi määritettiin 30 °C ja virtausnopeudeksi 2 l/s⁻¹. Alustavien arvioiden mukaan tämä on paras kompromissi, jotta porakaivo saavuttaisi alhaisen painehäviön sekä korkean lämmönvaihdon. Käytettävät lämpökollektorit ovat koaksiaaliputkia. Tämän etuihin kuuluvat lämpöhäviöiden väheneminen lataus- ja purkusyklien aikana virtaussuunnan vaihdettavuuden myötä. (Bossennec ym. 2022, 7, 11.)

Alla olevassa taulukossa mallinnuksessa käytettyjä koaksiaaliputken parametrisia arvoja.

Taulukko 5. Koaksiaaliputken parametreja (Bossennec ym., 7).

BHE geometry	Coaxial
Borehole diameter	0.203 m
Inlet pipe diameter	0.1143 m
Outlet pipe diameter	0.1683 m
Refrigerant thermal conductivity	0.48 W m ⁻¹ K ⁻¹
Refrigerant volumetric heat capacity	4 MJ m ⁻³ K ⁻¹
Computational method	Quasi-stationary (Eskilson an Claesson 1988)

Simulointeja tehtiin viidellä eri mallinnuksella 30 vuoden käyttöajalla. Lämpöä arvioitiin varastoituvan 456–463 GWh tänä aikana. Lämpöä saatiin nostettua taas 318–326 GWh. Varastointitehokkuus kuvaa 3 %:n muutosta.

Varastointitehokkuus kasvaa kaikilla käytetyillä malleilla noin 40 %:sta lähes 60 %:iin ensimmäisen käyttövuoden aikana. Varastoidun lämmön määrä vastaavasti laskee ensimmäisten toimintavuosien aikana varastointilämpötilojen noustessa.

SKEWS-hankkeessa tullaan tekemään lisää yksityiskohtaisempia mallinnuksia ja projektin toteutuksen myötä tietoja päivitetään. Tällöin saadaan tarkempia malleja myös lataus- ja purkuvaiheista. (Bossennec ym., 2022, 11–12, 19.)

5 PÄÄTELMÄT

Geotermisen energian hyödyntämisen ja lämpövarastoinnin mahdollisuudet ovat moninaiset ja järjestelmät kehittyvät ja ovat kehittyneet useamman vuoden aikana. Tämä edesauttaa energian säästämässä ja mahdollistaa energian kysynnän tasapainottamisen niin lämmittämisessä kuin viilennyksessä.

Lämpövarastointia suunniteltaessa on aina huomioitava geologiset olosuhteet sekä haluttu tehon määrä. Järjestelmän pinta-alan tarve vaikuttaa myös valittavaan järjestelmään.

BTES-järjestelmät ovat kehittyneet laajuudessaan vuosien varrella ja tekniikka kehitty edelleen. Keskisyvät ja syvät termiset porareivät eivät vielä ole yleisiä, mutta näitä on tutkittu ja pilotointikohteita löytyy jo Suomestakin. Nämä vaativat vähemmän tilaa, joten niiden hyödynnettävyys tiheämmin rakennetussa ympäristössä on mahdollista. BTES-järjestelmät auttavat mahdollistamaan rakennusten energiatehokkuusvaatimusten saavuttamisen myös monipuolisten järjestelmäintegraatioiden osalta.

Opinnäytetyössä esitellään useita pilotointikohteita. Osa näistä on ollut toiminnassa useampia vuosia, toiset rakenteilla. Pilotointikohteet eivät aina toimi odotetulla tehokkuudella, mutta saattavat myös toimia yli odotusten. Pilotointikohteet auttavat kehittämään järjestelmiä entisestään antaen laajaa informaatioita niin maaperän käyttäytymisestä kuin itse energijärjestelmän tehokkuudesta. Nämä tiedot itsessään eivät ole rahalla mitattavissa ja edustavat mukana olevilta yrityksiltä, yhteisöiltä ja kaupungeilta/kunnilta oppilaitoksia unohtamatta, kykyä ja halua toimia edelläkävijöinä. Pilotointikohteet takaavat tiedon lisääntymisen ja kehityksessä mukana pysymisen.

Jatkossa seurattavia kohteita on opinnäytetyössä useita. BTES-järjestelmistä lisää tietoa saadaan lähivuosien aikana niin energiapaalujen kuin keskisyvien porareikäkenttien tehokkuuden ja järjestelmien toimivuuden osalta.

LÄHTEET

Aalborg CSP -Changing Energy 2022. Viitattu 17.7.2022. [15 000 m³ PTES kaukolämpöön, Tiibet \(aalborgcsp.com\)](https://aalborgcsp.com) ja STATE ON GREEN 4.2.2022

<https://stateofgreen.com/en/solutions/15000-m3-ptes-for-district-heating-tibet/>

Ahtola, T., Pokki, J., Aumo, R., Kananoja, T., Hyvärinen, J., Kallio, J., Kinnunen, K., Luodes, H., Sarapää, O., Selonen, O., Tuusjärvi, M., Törmänen, T. & Virtanen, K. 2012. Geologisten luonnonvarojen hyödyntäminen Suomessa vuonna 2012, Geologian Tutkimuskeskus. Viitattu 15.5.2022 https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_210.pdf

Arola, T. 2022. Haastattelu. Geologian Tutkimuskeskuksen geoenergian johtava asiantuntija, haastatteli 12.5.2022 Paula Hiltunen.

Arola, T., Kauppila, K. (Energys CM Oy) & Vallin, S. 2020. Pohjavesienergian hyödyntäminen – Turku Skanssin alue. Viitattu 4.6.2022. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/66_2020.pdf

Arola T., Korhonen K., Martinkauppi A., Leppäharju N., Hakala P., Ahonen L. & Pashkovskii M. 2019. Creating shallow geothermal potential maps for Finland. Viitattu 18.5.2022. <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/130.pdf>

Arola, T., Piipponen, K., Martinkauppi, A., Vallin, S., Leppäharju, N., Korhonen, K. & Bischoff, A. 2022. The Deeper the Better? A Thermogeological Analysis of Medium-deep Borehole Heat Exchanger Efficiency in Crystalline Rocks. Geologinen tutkimuskeskus. Viitattu 15.9.2022. <https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40517-022-00221-7>

APSENSING, advanced photonic 2022. Distributed Temperature Sensing (DTS). Viitattu 1.9.2022. <https://www.apsensing.com/technology/dts>

Bakema, G., Nielsen, J.E., Sorensen, P.A., Drijever, B., Pittens, B., Buik, N., Egermann, P., Rey, C., Maragna, C., Hamm, V., Guglielmetti, L., Hahn, F., Nardini, I., Koornneef, J. & Dideriksen, K. 2019. Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned. HEATSTORE Geothermica. Viitattu 3.6.2022. <https://www.heatstore.eu/downloads.html>

Bakker, M., des Tombe, B. & Schilperoort, B. 2020. Estimation of Temperature and Associated Uncertainty from Fiber-Optic Raman-Spectrum Distributed Temperature Sensing. MDPI. Viitattu 1.9.2022. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2235/htm>

Bales, C., Sotnikova, H., Heier, J. & Sotnikov, A. 2011. Evaluation of a high temperature solar thermal seasonal borehole storage. Viitattu 16.8.2022.

https://www.researchgate.net/publication/308117477_EVALUATION_OF_A_HIGH_TEMPERATURE_SOLAR_THERMAL_SEASONAL_BOREHOLE_STORAGE

Berglund, S., 2020. Rock cavern as thermal energy storage. Luleå University of Technology. Viitattu 10.6.2022. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1441324/FULLTEXT01.pdf>

Bossennec, C., Seib, L., Welsch, B., Frey, M. & Sass, I. 2022. Finite element simulation of permeable fault influence on a medium deep borehole thermal energy storage system. Geothermal Energy. Viitattu 22.10.2022. <https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40517-022-00224-4>

Brandt, J. 2022. Haastattelu. nollaE:n Projektijohtaja, haastatteli Paula Hiltunen 7.6.2022.

Bär, K., Homuth, S., Ryhaak, W., Schulte, D., Welsch, B. & Sass, I. 2015. Coupled Renewable Energy System for Seasonal High Temperature Heat Storage via Medium Deep Borehole Heat Exchangers. Viitattu 20.9.2022. https://www.researchgate.net/publication/274704461_Coupled_Renewable_Energy_Systems_for_Seasonal_High_Temperature_Heat_Storage_via_Medium_Deep_Borehole_Heat_Exchange

Cabeza, L. F. (ed.) 2014. Advances in Thermal Energy Storage (TES) Systems. Methods and Applications. Elsevier Science & Technology, Cambridge. Viitattu: 30.5.2022. Saatavissa ProQuest Ebook Central.

Choi, B.-H., Park, D., Kim, H.-M., Ryu, D.-W., Sunwoo, C. & Han, K.-C. 2012. Numerical Study on the Thermal Stratification Behavior in Underground Rock Cavern for Thermal Energy Storage (TES). Viitattu 15.6.2022. https://www.researchgate.net/publication/264018637_Numerical_Study_on_the_Thermal_Stratification_Behavior_in_Underground_Rock_Cavern_for_Thermal_Energy_Storage_TES

Deschaintre, L & Mangold, D. 2015. Seasonal thermal energy storage. SHS Solar Heating & Cooling Programme. Viitattu 21.7.2022. http://task45.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA_SHC_Task45_B_Report.pdf

Dincer, I. & Rosen, M.A. 2011. Thermal energy storage: Systems and applications, second edition. Wiley. Viitattu 26.5.2022.

Dunn D.J., Tutorial no1, Fluid Flow Theory. s. 5. <http://www.freestudy.co.uk/fluid%20mechanics/t1203.pdf>

Energiateollisuus 2022. Geoterminen energia. Viitattu 15.5.2022. https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/geoterminen_voima

Energiayrittäjyys 2021. Uutta energiassa: Lämpö kesästä talveen. Energiayrittäjyys 7.6.2021. Viitattu 26.7.2022. <https://energiayrittajyys.fi/?q=content/uutta-energiassa-lampo-kesasta-talveen>

Eronen, T. 2022. Haastattelu. Polar Night Energyn Toimitusjohtaja, haastatteli 25.5.2022 Paula Hiltunen.

Esterinen, J., Lehmikangas, M. & Ojala, M. 2014. Aurinkolämmön varastointi Östersundomissa. Pöyry. Viitattu 20.8.2022. <https://docplayer.fi/542058-Aurinkolammon-varastointi-ostersundomissa.html>

EVAKOT-hanke, Centria AMK. 2022. Viitattu 1.9.2022.

FINGRID 2022. Reservimarkkinat. Viitattu 20.7.2022. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Gehlin, S. 2002. Thermal Response Test -Method Development and Evaluation. Doctoral Thesis. Viitattu 28.7.2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991442/fulltext01.pdf>

Gehlin, S. 2015. Riktlinjer för Termisk Responstest (TRT). Svenskt Geoenergicentrum. Viitattu 28.7.2022. http://media.geoenergicentrum.se/2015/11/0_Riktlinjer-f%C3%B6r-Termisk-Responstest_2015.pdf

Geologian tutkimuskeskus 2018. Geoenergiatutkimus. Poratek geoenergiaseminaari 25.10.2018. Viitattu 28.7.2022. <https://docplayer.fi/108156250-Geoenergiatutkimus-poratek-geoenergiaseminaari-energia-geoenergiaseminaari.html>

Geologian tutkimuskeskus 2019. Helsingin geoenergiapotentiaali. Viitattu 28.7.2022. https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/Helsingin_geoenergiapotentiali_luonnos.pdf

Gombert, P., Abdoulaye, G., Hamed, H.B., Beji, H. & Laouafa, F. 2019. Installation of a thermal energy storage site in an abandoned mine in Picardy (France). Part 1 : Selection criteria and equipment of the experimental site. Environmental Earth Sciences. Viitattu 10.6.2022. https://www.researchgate.net/publication/331393399_Installation_of_a_thermal_energy_storage_site_in_an_abandoned_mine_in_Picardy_France_Part_1_Selection_criteria_and_equipment_of_the_experimental_site#fullTextFileContent

Hakala, P., Martinkauppi, A., Witick, I. & Huusko, A. 2017. Ääneniemen geoenergiapotentiaali. Geologian tutkimuskeskus. Viitattu 1.8.2022. <https://docplayer.fi/59033291-Aanenien-geoenergiapotentiaali.html>

Hakula, J. 2022. Haastattelu. Muovitech Oy:n Toimitusjohtaja, haastatteli Paula Hiltunen 10.6.2022.

Heikinheimo, R. 2012. Raportti -Torin alle suunniteltavan maanalaisen pysäköinnin geotekniikasta. Ramboll. Viitattu 3.9.2022. <https://docplayer.fi/3711280-Torin-alle-suunniteltavan-maanalaisen-pysa-koinnin-geotekniikasta.html>

Heinonen, S., Martinkauppi, A., Piipponen, K., Huusko, A. & Lahti, I. 2021. Geotermisen energian hyödyntämismahdollisuuksien arviointi Muhos-muodostuman ja Muhoksen Kirkkosaaren alueilla. GTK:n tutkimustyöraportti 46/2021. Viitattu 2.8.2022. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/46_2021.pdf

Heliostorage 2022. Lämpöenergian Kausivarastointi. Video. Viitattu 30.7.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=GOgmF1h2e0E>

Heliostorage 2022. Industrial Waste Heat. Case Study -Finn Spring Bottling Plant. Viitattu 30.7.2022. <https://heliostorage.com/industrial-waste-heat/>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. Helsinki. Oy Edita. Viitattu 30.8.2022.

Huusko A. 2016. Geologian tutkimuskeskus kartoittaa Suomen geoenergiapotentiaalia. Geologian Tutkimuskeskus. Viitattu 15.5.2022. https://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document_library/get_file?uuid=de87c3c4-532d-4179-8918-1c7b8aa07551&groupId=108478

Ilmasto-opas 2022 (SYKE). Rakennusten lämmitys kuluttaa runsaasti energiaa. Viitattu 10.10.2022. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/rakennusten-lammitys-kuluttaa-runsaasti-energiaa>

IRENA 2020. Innovation outlook, Thermal Energy Storage. International Renewable Energy Agency. Viitattu 20.7.2022. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>

Jouhara, H., Zabnie`nsja-Gòra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D. & Lipinski, T. 2020. Latent Thermal Energy Storage Technologies and Applications: A Review, International Journal of Thermofluids. Viitattu 20.6.2022. https://www.researchgate.net/publication/343011784_Latent_Thermal_Energy_Storage_Technologies_and_Applications_A_Review

Juvonen, J. 2009. Lämpökaivo -Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2009. Viitattu 2.8.2022. <http://www.suomenporakaivo.fi/pdf/ymparisto-opas-lampokaivo.pdf>

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo -Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2013. Viitattu 28.7.2022.

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Kallio J. 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Finland. Geologian Tutkimuskeskus. Viitattu 16.5.2022. <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-10-Finland.pdf>

Khyad, A., Samrani, H. & Bargach, M.N. 2016. s. 1187. State of the art review of thermal energy storage system using PCM operating with small temperature differences: Focus on Paraffin.

Viitattu 29.5.2022. http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N4/133-JMES-2276-2015-Khyad.pdf

King, W.P., Yang, T. & Miljkovic, N. 2021. Phase change material-based thermal energy storage. Viitattu 20.6.2022.

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2666386421002514?token=5CC34C3DD2DC88D03880656D2A9587FD8FC81BFC0780AF7F8A88C067153D89280902DC337CB74BAF1C8BADB58ABD93DF&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221213181349>

Korpjaakko, E. 2017. Viitattu 4.6.2022.

http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk217/mk217_1976_korpjaakko.pdf

KS-Geoenergi 2022. Viitattu 1.9.2022.

Laloui, L. & Loria, A. 2020. Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Application. ACADEMIC PRESS An imprint of Elsevier

Lautkankare, R. 2021. Haastattelu. Turun AMK:n lehtori ja projektipäällikkö, haastatteli Paula Hiltunen 25.2.2021.

Lounavoima 2022. Korvenmäen ekovoimalaitos. Viitattu 1.10.2022. <https://www.lounavoima.fi/>

Lund, A. 2019. Analysis of deep-heat energy wells for heat pump systems. Aalto University. Viitattu 20.9.2022.

https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/41674/master_Lund_Andreas_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lund, A. & Kurvinen, T. 2020. Grandlund. HUKATON-hanke tuloswebinaari 8.12.2020. Viitattu 10.6.2022. https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Korvenm%C3%A4en-ekovoimalaitoksen-hukkal%C3%A4mm%C3%B6n-hy%C3%B6dynt%C3%A4minen-ja-varastointi_Raportti-9.7.2020.pdf

Lund, M. 2009. Domestic Heating with Solar Thermal. Studies of Technology in a Sosial Context and Social Components in Technical Studies. Uppsala Universitet. Viitattu 15.8.2022. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:212624/FULLTEXT01.pdf>

Maalämpö Tietoportaali 2022. Viitattu 2.8.2022. <http://www.xn--maalmpumpu-jcb8w.org/lampokerroin/>

Maalämpötyöryhmän ehdotus 2019. Maalämpökaivot Helsingissä. Helsingin kaupunki. Viitattu 3.8.2022. https://www.hel.fi/static/public/hela/Kaupunginhallitus/Suomi/Paatos/2019/Keha_2019-06-24_Khs_28_Pk/F477BE8E-8F04-CED1-92BA-6B2156400001/Liite.pdf

Mangold, D. & Schmidt, T. n.d. NEW STEPS IN SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE IN GERMANY. Viitattu 21.7.2022. https://my.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/14A-2.pdf

Martinkauppi, I. 2021. Haastattelu. Geotekniikan tutkimuslaitoksen tutkija, haastatteli Paula Hiltunen 26.2.2021.

Martinkauppi, I. 2022. Haastattelu. Geotekniikan tutkimuslaitoksen tutkija, haastatteli Paula Hiltunen 30.12.2022.

McClenahan, D. & Sibbitt, B. 2015. Seasonal Borehole Thermal Energy Storage -Guidelines for design & construction. SHS. Viitattu 25.7.2022. <https://task45.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA-SHC-T45.B.3.1-TECH-Seasonal-storages-Borehole-Guidelines.pdf>

nollaE 2019. YH Kodit vastaanotti Skanssin Tornin nollaE-sertifikaatin. Viitattu 1.8.2022. <https://www.nollae.fi/yh-kodit-vastaanotti-skanssin-tornin-nollae-sertifikaatin/>

nollaE 2018. Viitattu 1.8.2022. <http://www.nollae.fi/skanssin-tornin-nollae-ratkaisu-3d-animaationa/>

Nordell, B. 1999. RENEWABLE ENERGY SYSTEM AND STORAGE. Luleå University of Technology, Sweden. Viitattu 15.6.2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1293858/FULLTEXT01.pdf>

Nordell, B. 2015. Using ice and snow in thermal energy storage system. Luleå University of Technology. Viitattu 21.6.2022. https://www.researchgate.net/publication/281601181_Using_ice_and_snow_in_thermal_energy_storage_systems

Nordell, B. & Skogsberg, K. 2007. THE SUNDVALL SNOW STORAGE -SIX YEAR OF OPERATION. Luleå University of Technology. Viitattu 21.6.2022.

https://www.researchgate.net/publication/226859656_THE_SUNDSVALL_SNOW_STORAGE-SIX_YEARS_OF_OPERATION

Nyström, T. 2022. Haastattelu. YH kodit Oy:n Tekninen asiantuntija, haastatteli Paula Hiltunen 7.10.2022.

Onikki, P. 2022. Haastattelu. Lounavoiman Toimitusjohtaja Petri Onikki, haastatteli Paula Hiltunen 10.5.2022.

Puranen, J. 2016. Maalämpökentän simulointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. Viitattu 1.10.2022. <https://core.ac.uk/download/pdf/250162939.pdf>

QHeat 2021. Lounavoiman ekovoimalaitoksen hukkalämpö säilötään maan alle QHeatin teknologialla. 24.9.2021. Viitattu 1.10.2022. <https://www.qheat.fi/fi/lounavoiman-ekovoimalaitoksen-hukkalampo-sailotaan-maan-alle-qheatin-teknologialla/>

Roussel, M. 19.5.2020. Vojens district heating. Solar Heat Europe ESTIF. Viitattu 5.7.2022. <http://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/>

Sadeghi, H. & Singh, R.M. 2022. Driven precast concrete geothermal energy piles: Current state of knowledge. Viitattu 24.11.2022. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360132322010204?token=94B8C9222F3AE4320A2687B3ABD9C07B3D684607FC62C60E9A147FB3291D2CAAB270AE68C5793641458A1AEBE E3AB33F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221218103152>

Salomaa, N. 2021. Lämmön kausivarastoinnilla saataisiin Suomessakin satojen miljoonien hyöty. Rakennuslehti 5.3.2021. Viitattu 2.9.2022. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/03/lammon-kausivarastoinnilla-saataisiin-suomessakin-satojen-miljoonien-hyoty/>

Salomaa, N. 2020. Matalalämpöisen lämpöenergian kausivarastointi savimaahan. Opinnäytetyö Turun AMK. Viitattu 4.9.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/501145/Nikolas_Salomaa.pdf.pdf?sequence=2

Sander, F. 2022. Haastattelu. Centrian AMK:ssa, työskennellyt aikaisemmin Heliostoragessa, haastatteli Paula Hiltunen 6.6.2022.

Sarbu, I. & Sebarchievici, C. 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Viitattu 20.6.2022. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>

Sirola, V.-P. & Tiitinen, M 2018. Tekniset toimintaohjeet verkkoon liittämiseksi. Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä. Energiategollisuus 16.10.2018. Viitattu 20.8.2022. https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot_kaukolampoverkkoon_tekniset_ohjeet_20181016.pdf

Socaciu L. 2012. Seasonal thermal energy storage concepts. Viitattu 20.5.2022. https://www.researchgate.net/publication/272179312_SEASONAL_THERMAL_ENERGY_STORAGE_CONCEPTS

Sulpu 2022. Lämpöpumpputilasto 2021. Viitattu 25.5.2022. <https://www.sulpu.fi/wp-content/uploads/2022/01/SULPU-lampopumpputilasto-2021-kuvaajat.pdf>

Tiehallitus 1991. Tien kunnossapidon ympäristöhaitat. Yleisselvitys. Viitattu 4.9.2022. <https://doria.fi/bitstream/handle/10024/133475/tie1918.pdf?sequence=1>

Tilastokeskus 2021. Energia. Viitattu 25.5.2022. https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html

Turun kaupunki 2019. Turun Kauppatorin ja sitä ympäröivien katualueiden liukkauden torjunta. Kaupunginhallitus. Kokouspöytäkirja. Viitattu 20.9.2022. <https://ah.turku.fi/kh/2020/0113001x/4016108.htm>

Turunen, M. Magmakivien luokittelu 25.6.2018. Geologia.fi. Viitattu 22.10.2022. <https://www.geologia.fi/2018/06/25/magmakivien-luokittelu/>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2022. Energia- ja ilmastostrategia. Viitattu 2.10.2022. <https://tem.fi/energia-ja-ilmastostrategia>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2022. EU:n uusiutuvan energian tavoitteet ja lainsäädäntö. Viitattu 2.10.2022. <https://tem.fi/eu-lainsaadanto>

Uponor 2015. Viitattu 20.8.2022. <https://www.uponor.com/fi-fi/search-page?query=energiapaalut>

Vantaan Energia 2022. World's largest cavern thermal energy storage to be built in Vantaa. Viitattu 15.6.2022. <https://www.vantaanenergia.fi/en/fossil-free-2026/worlds-largest-cavern-thermal-energy-storage-to-be-built-in-vantaa/>

Vantaan Energia 2021. VECTES-lämmön kausivarasto. Kesän lämpö talteen talvea varten. Lämmön kausivarasto 05/2021. Viitattu 15.6.2022. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20210528155516/Vantaan_Energia_White_Paper_2_VECTES_FI_260521-1.pdf

Vatajankoski 2022. Iso askel kohti hiilineutraalia kaukolämpöä. Viitattu 15.12.2022.

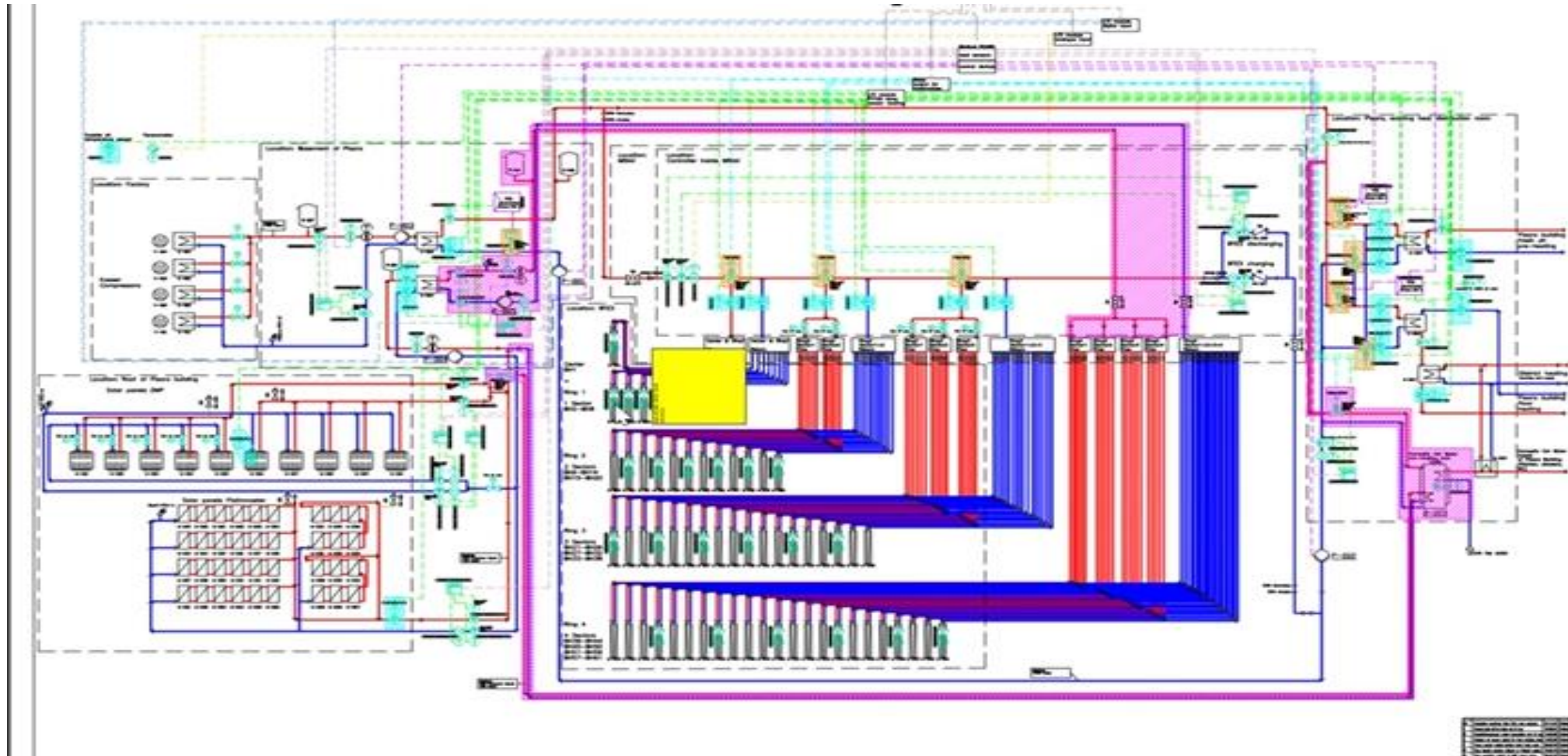
<https://www.vatajankoski.fi/hiekka-akut-saastavat-euroja-ja-vahentavat-paastoja-suomeen-tulee-yhteydenottoja-ympari-maailmaa/>

Wiheriäkoski, V. 2021. Lämpöenergian kausivarastointi maaperään. Tampereen yliopisto, kandidaatintyö. Viitattu.28.7.2022.

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/132699/Wiheri%C3%A4koskiVeeti.pdf?sequence=3>































YH Kodit Oy 2022. Viitattu 1.8.2022. <https://www.yhkodit.fi/kiinteisto/20730-skanssinkatu-22/>











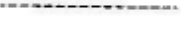
Liite 1. Finn Springin lämpövarastointijärjestelmän prosessikaavio



(Sander 2022).

Liite 2. Prosessikaavioiden piirrosmerkkejä ja virtaavien aineiden merkit

	Valvuri		Lämpösiirrin		Kuljetin		Syklooni
	Varoventtiili		Lämpösiirrin		Syöttölaite		Märkäpesuri
	Paineenalennusventtiili		Lämpösiirrin+alijäähdytin		Kattila		Jäähdytystorni
	Takalähtöventtiili (virtaus oikealle)		Kulutuskohta		Lämpöalteenottokattila		Turbiini
	Lauhteenpoistin		Syöttövesisäiliö		Ydinreaktori		Generaattori
	Pumppu		Rusketus/sekoituslämpösiirrin		Kattila+tulistin		Moottori
	Keskipakopumppu		Erotin		Haihdutin		Vedenkäsittely
	Kompressori						
	Mylly						

Virtaussuunta	Kallistus		
			
			Litos
			
			
			
			Risteävät putket ilman liitosta
			
			

(Huhtinen ym. 2004, 320).