



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Konsta Kekkonen

KAUSITTAISET LÄMPÖVARASTOT

Tuntuvan lämmön varastointiin perustuvat maanalaiset

lämpövarastot

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Konsta Kekkonen
Opinnäytetyön nimi	Kausittaiset lämpövarastot
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	35
Ohjaaja	Jukka Hautala

Tutkimuksen tarkoituksena oli perehtyä erilaisiin lämmön varastointimenetelmiin ja selvittää projekteja esimerkkinä käyttäen, minkälaisia teknologioita nykyään käytetään lämpöenergian varastointiin.

Tutkimuksessa keskityttiin ensisijaisesti kausittaisiin maanalaisiin lämpöenergiavarastoihin, jotka perustuvat tuntuvan lämpöenergian varastointimenetelmään näiden maanalaisien lämpövarastojen varastomateriaalissa. Esimerkkiprojektit valittiin Pohjoismaista ja niiden pohjalta syvennyttiin käytettyihin teknologioihin. Kirjalähteitä käytettiin lämmön varastointimenetelmien ja teknologioiden yleisten toimintaperiaatteiden selvittämiseen. Internetlähteitä käytettiin apuna uusimman tiedon hankinnassa ja projektien haussa.

Tutkimuksen perusteella todettiin, että kausittaiset maanalaiset lämpöenergiavarastot ovat jo teknisiltä ominaisuuksiltaan toimiviksi ja taloudellisesti kannattaviksi todettuja ratkaisuja. Niillä pystytään tehokkaasti tasaamaan vuodenaikojen välisiä lämpöenergian tarpeita kysynnän ja tarjonnan suhteen, etenkin Pohjoismaissa. Lämpövarastojen sovelluksien nopeaa määrällistä kasvua hidastaa niiden korkeat käyttöönottokustannukset. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että kiinnostus lämpövarastoja kohtaan kasvaa jatkuvasti ja uusia projekteja suunnitellaan ympäri maailmaa tälläkin hetkellä.

ABSTRACT

Author	Konsta Kekkonen
Title	Seasonal thermal energy storages
Year	2018
Language	Finnish
Pages	35
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The purpose of this thesis was study different kind of thermal energy storage methods. Projects from Nordic countries were selected to present the use of the current state of thermal energy storage usage.

The study focused on underground thermal energy storages and those systems that are based on storing sensible heat. The book sources were used to define the general operation principles of thermal energy storage methods and technologies. Internet sources were used to find the latest information.

Based on the study, it was found that seasonal underground thermal energy storages are already technically feasible and economically viable solutions. They can effectively balance the heat energy needs between the seasons in terms of supply and demand, especially in the North. The rapid quantitative growth of heat storage applications is slowed by their high commissioning costs. Based on the research it can be stated that the interest in thermal energy storage applications continues to grow and new projects are being planned all over the world.

Keywords Thermal energy storages, seasonal thermal energy storages, underground thermal energy storages, thermal energy storage methods, thermal energy storage systems

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	6
2	SYITÄ ENERGIAVARASTOJEN YLEISTYMISEEN	7
3	LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIMENETELMIÄ	9
	3.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi.....	12
	3.2 Latentin lämpöenergian varastointi.....	13
	3.3 Termokemiallisen lämpöenergian varastointi.....	16
4	PROJEKTIEEN ESITTELY JA NIIDEN KÄYTTÄMIEN TEKNOLOGIOIDEN LÄPIKÄYMINEN	17
	4.1 Veden toimiminen lämmön varastointimateriaalina.....	17
	4.1.1 Case Mustikkamaa Suomi.....	18
	4.1.2 Case Vojens Tanska	19
	4.1.3 Case Gram Tanska	20
	4.1.4 Päätelmät	21
	4.2 Pohjavesivaraston käyttäminen lämpövarastona	23
	4.2.1 Case Arlandan lentokenttä	24
	4.2.2 Päätelmät	26
	4.3 Porakaivotekniikan käyttäminen lämmönvarastointiin.....	28
	4.3.1 Case Toholampi Suomi	29
	4.3.2 Päätelmät	30
5	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET.....	34

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Lämpöenergian varastoratkaisujen luokittelua.....	s.11
Kuvio 2. Yleiskatsaus lämpöenergian varastointimenetelmistä	s.12
Kuvio 3. Mustikkamaan luolalämpövarasto.....	s.18
Kuvio 4. Vojensin kaivantolämpövarasto.....	s.20
Kuvio 5. Tukholma-Arlanda lentokenttä.....	s.25
Kuvio 6. Porakaivolämpövarasto.....	s.29
Taulukko 1. Materiaalien ominaislämpökapasiteetteja.....	s.13
Taulukko 2. Epäorgaanisia yhdisteitä	s.15

1 JOHDANTO

Työn keskeinen idea on tutkia erilaisia lämmön varastointitekniikoita ja vastata kysymykseen: miksi ja mihin lämpöä varastoidaan, mitkä tekniikoista ovat kannattavimpia tällä hetkellä ja kuinka tulevaisuudessa voisimme hyödyntää erilaisia lämpövarastoja?

Työn tarkoituksena on tutkia valmistuneita ja onnistuneita kausittaisia lämmön varastointiprojekteja ja selvittää, kuinka tehdään kannattava lämmön varastointiprojekti, mitä teknisiä ominaisuuksia nämä projektit sisältävät ja minkälaisissa olosuhteissa projektit ovat kannattavia. Työn tarkoituksena on myös pohtia, mitä tulevaisuudessa on odotettavissa lämmön varastoinnin kannalta, minkälaisia uusia tekniikoita on kehitetty ja ollaan kehittämässä, sekä kuinka erilaiset lämmön varastointitekniikat tukevat nykyisiä ilmasto- ja energiatavoitteita.

Työssä käydään valittujen esimerkkiprojektien avulla läpi asioita, jotka ajavat energiasektoria muutokseen. Ennen kaikkea työllä pyritään vastaamaan siihen, miksi lämpöenergiavarastot ovat toimivia ratkaisuja tässä energiantuotannon murroksessa ja kuinka ne toimivat osana energiantuotantoa.

Työ rajataan keskittymällä lämpöenergiavarastoihin, jotka hyödynnetään lämmön tuotannossa, esimerkiksi kaukolämmityksessä ja työssä keskitytään vielä erityisesti pitkäaikaiseen lämmön varastointiin, niin kutsuttuihin kausittaisiin lämpöenergiavarastoihin. Työn ulkopuolelle jätetään siis lämmön varastointitekniikat, joita käytetään tuottamaan sähköä.

Työssä käytetään lähteinä internetistä löytyvää tietoa, sekä myös kirjallisuutta. Internetlähteitä valittaessa on tärkeää vertailla monia lähteitä keskenään tietojen oikeellisuuden takaamiseksi. Internetlähteitä käytetään ensisijaisesti uusimman tiedon hakemisessa ja uusimpien projektien löytämisessä.

2 SYITÄ ENERGIAVARASTOJEN YLEISTYMISEEN

Tärkein syy erilaisten energiavarastojen yleistymiseen ja lisääntyneeseen kiinnostukseen energian varastointimahdollisuuksia kohtaan, on tarve pystyä vastaamaan energiantuotannon ja sen kysynnän yhteensopimattomuuteen. Energialla on myös suuri rooli valtioiden taloudellisessa ja teknologisessa kilpailukyvyssä. Koska parhaatkin ennustukset energiamuotojen saatavuudesta, kysynnästä ja hinnoista tulevaisuudessa ovat vain suuntaa antavia, on tärkeää, että meillä on monta eri teknologiaa käytettävissä, jotta pystymme varmemmin vastaamaan tulevaisuuden energian tarpeisiin ja kysyntään. Tarkennettuna, kehitettävien ja käytettyjen teknologioiden pitäisi olla sellaisia, jotka varmistavat energian turvallisuuden, tehokkuuden ja ympäristön laadun valtioille. Lämpöenergiavarastot ovat yksi näistä teknologioista ja niitä käytetään, koska niillä voidaan merkittävästi vähentää kokonaisenergiankulutusta, mikä säästää sekä kotimaisia energiavarastoja, että myös tarvetta maahantuoda fossiilisia polttoaineita. Näin ollen erilaisilla energiavarastoilla, kuten lämpövarastoilla, pystytään luomaan valtioista energiaomavaraisempia, vähentämään ympäristöön syntyviä päästöjä, sekä saamaan taloudellisia hyötyjä, esimerkiksi säästämällä rahtimaksuissa tai ottamalla hyötykäyttöön erilaisissa teollisuuden prosesseissa syntyvää, muuten hukkaan menevää, lämpöenergiaa. /1, s.83–84/

Kun energiajärjestelmiin lisätään varastointimahdollisuus, voidaan listata seuraavia hyötyjä:

- taloudelliset hyödyt: käyttökustannus sekä pääomakustannusten väheneminen
- tehokkuuden paraneminen
- ympäristön saastumisen väheneminen ja CO₂ -päästöjen pieneminen
- järjestelmien suorituskyvyn ja luotettavuuden paraneminen /1, 2/

Ilmastonmuutoksesta johtuen energiasektori pyrkii vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja siirtymään enemmissä määrin uusiutuviin energianlähteisiin. Uusiutuvat energialähteet, kuten tuulivoima ja aurinkovoima, tarvitsevat rinnalleen keinoja, joilla tuottaa sähköä myös silloin, kun ei tuule tai aurinko ei paista, eli kun varsinaista energiantuotantoa ei tapahdu. Tästä syystä erilaiset energiavarastot ovat

kasvattaneet suositaan, mukaan lukien lämpöenergiavarastot. Erilaisilla energiavarastoilla pystytään tasaamaan energiantuotantoa ja syöttämään energiaa asiakkaille silloinkin, kun varsinaista energiantuotantoa ei ole. Energiavarastojen käytämisen yleistymiseen ajaa myös Suomen ilmasto- ja energiatavoitteet. Erilaisilla energiavarastoratkaisuilla pystytään vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja näin pienentämään esimerkiksi syntyvien CO₂-päästöjen määrää. /1, 2/

3 LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIMENETELMIÄ

Lämpö- ja kylmäenergian varastointi on yksi pisimpään tunnettuja energian varastointitekniikoita ja siitä löytyy nykyään laajamittaisia kaupallisia sovellutuksia. Vaikka perusidealtaan lämpöenergian varastointitekniikat ovat pysyneet jo pitkään samoina, tehdään niiden saralla silti edelleen paljon kehitystyötä uusien menetelmien ja konseptien osalta. Yleistä kehitettävää ja parannettavaa olemassa oleville teknologioilla on ainakin varastojen kokoon liittyen, ympäristöön siirtyvien päästöjen ja kustannusten minimoiminen, sekä varastojen eliniän ja tehokkuuden kasvattamisessa. Tutkimus- ja kehitystyötä erilaisten lämmönvarastointimenetelmien osalta tehdään jatkuvasti ja tulevaisuus vaikuttaa erittäin lupaavalta lämpövarastojen osalta. /1, 2/

Tärkein käyttötarkoitus lämpöenergian varastoinnille on tasoittaa energian tuotannon ja käytön epäsuhtaa. Energian kysynnän ollessa alhaalla, voidaan energiaa varastoida erilaisiin lämpövarastoihin ja käyttää silloin kun kysyntä on korkeammalla. Tällaisella energian varastoinnilla pystytään tasaamaan energiantuotannossa muuten tapahtuvaa vaihtelua kuormituksessa. Kun energiantuotanto pystytään pitämään tasaisempaan, tarkoittaa se yleensä sitä, että tuotantolaitos pystyy operoimaan korkeammalla hyötysuhteella pidempään, mistä seuraa, että samasta määrästä tuotantolaitoksen käyttämää polttoainetta saadaan enemmän energiaa, kuin mitä huonommalla hyötysuhteella operoitaessa. Tällöin saatavia säästöjä tapahtuu siinä, ettei energianlähteinä käytettyä polttoainetta kulu yhtä paljon, jolloin ei ylimääräisiä päästöjäkään synny. Myös tuotantolaitoksen käyttöikä kasvaa, kun kuormitus on optimoidumpaa eikä ylimääräisiä tuotantopiikkejä synny. Kun lämpövarastoja käytetään tasaamaan energiantuotannon ja sen kysynnän eroja, pystytään suurempi määrä energiaa tuottamaan uusiutuvista energianlähteistä. Lämpövarastoilla pystytään saavuttamaan myös taloudellisia hyötyä, sillä sähkön kysynnän ollessa alhaalla voidaan halpaa sähköä varastoida lämmöksi ja myydä sitä taas eteenpäin silloin kun sähkön kysyntä ja hinnat ovat korkeammalla. /1, 2, 4/

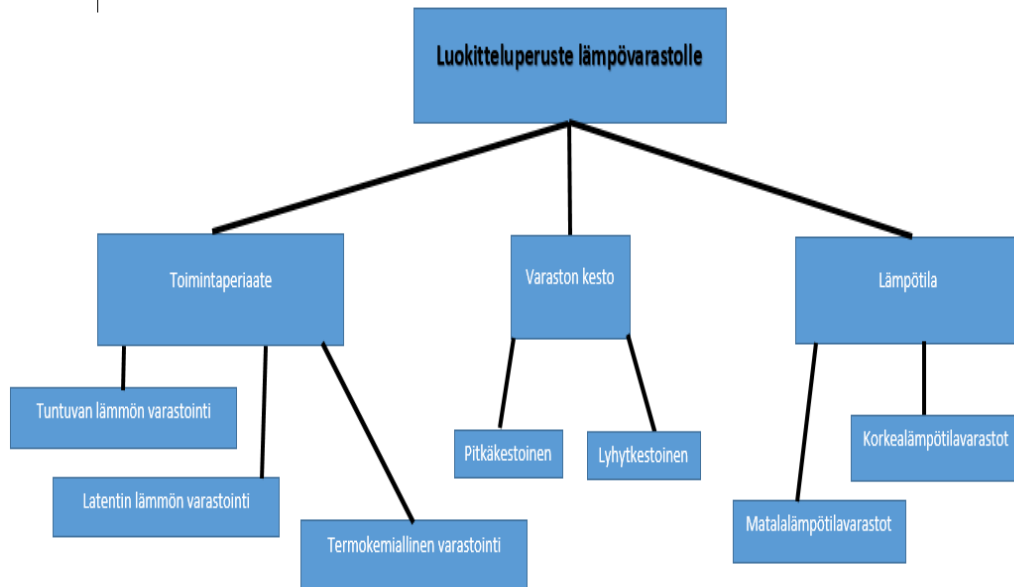
Lämmön varastointi voidaan suorittaa monella erilaisella teknologialla ja tavalla. Käytetystä teknologiasta riippuen lämpöä voidaan varastoida tunneiksi, päiviksi tai

jopa kuukausien ajaksi. Teknologiasta riippuu myös se, kuinka nopeasti varastoitua energiaa voidaan ottaa uudestaan käyttöön varastosta. Lämpöenergiavarastojen koko myös vaihtelee suuresti käyttötarkoituksen mukaan. Pienimmät lämpövarastot perustuvat yksittäisten asuntojen energiatarpeisiin, esimerkkinä vaikkapa omakotitalon lämminvesivaraaja, ja suurimmat voivat vastata kokonaisien kaupunkien lämmittämisestä (esim. pohjavesilämpövarastot). Pidemmän jakson lämpövarastoja, joissa varaston kierto kestää kuukausia, kutsutaan kausiluontoisiksi varastoiksi. Kausiluontoiset lämpövarastot ovat korkeiden leveysasteiden valtioille, kuten Suomi, erityisen mielenkiintoisia ratkaisuja, sillä niiden avulla pystytään varastoi-
maan energiaa vuodenaikojen yli. Esimerkiksi kesällä voidaan varastoida lämpöä, kun sille ei ole niinkään tarvetta, ja käyttämään se talvella hyödyksi lämmityksessä, kun lämpöä ei ole niin hyvin saatavilla. Kausittaisilla lämpövarastoilla voidaan myös varastoida talvella kylmää ilmaa ja käyttää se hyödyksi kesällä asuntojen ja rakennusten viilennyksessä. Näin ollen kausittaisilla lämpövarastoilla pystytään ta-
saamaan vuodenaajoista riippuvaa energiantuotannon epäsuhtaa. /1/

Tärkeimpiä vaatimuksia lämpöenergianvarastointijärjestelmille ovat korkea energiitiheys varastomateriaalissa (varaston kapasiteetti), hyvä lämmönsiirtokyky läm-
mönsiirtoaineen ja lämpövarastossa käytettävän varastomateriaalin välillä, varasto-
materiaalin mekaaninen ja kemiallinen stabiilius, varastomateriaalin ja säiliön ma-
teriaalien yhteensopivuus, käyttöikä eli kokonaisten varastosyklien määrä, vähäiset
lämpöhävikit varastoinnin aikana ja helppo käytettävyys sekä ohjattavuus. Lisäksi,
tärkeimpiä kriteerejä lämpövarastoprojekteja suunniteltaessa ovat operaation stra-
tegia, suurin vaadittava kuorma, suunnitellun varastomateriaalin nimellislämpötila
ja siinä tapahtuvien entalpian muutosten suuruus, sekä koko sovellusjärjestelmän
integroituminen. /2/

Kuten tiedetään, kaikki aineet voivat sitoa itseensä tietyn määrän lämpöenergiaa. Tätä ilmiötä kutsutaan aineen lämpökapasiteetiksi. Kun nestettä lämmitetään, sen lämpötila nousee niin kauan, kunnes neste saavuttaa sille ominaisen kiehumispis-
teen. Kiehumispiste on suurin lämpötila, jonka neste voi saavuttaa tietyssä pai-
neessa. Tuntuva lämmöksi kutsutaan sitä lämpöenergiaa, jonka neste sitoo it-
seensä sitä lämmitettäessä aina kiehumispisteeseensä saakka. Latentiksi lämmöksi

kutsutaan sitä lämpöenergiaa, joka saa nesteen höyrystymään tässä samassa tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Tämä on entalpian muutosta olomuodon muutoksen aikana. /1, s.1–9/



Kuvio 1. Lämpöenergian varastoratkaisujen luokittelua. /1/

Kuvio 1. kuvaa lämpövarastojen luokittelua. Lämpövarastoja on kolme päätyyppiä, jotka eroavat toisistaan toimintaperiaatteidensa mukaan. Nämä päätyypit ovat tuntuvan lämpöenergian varastot, latentin lämpöenergian varastot ja termokemialliset lämpöenergian varastot. Lämpövarastoja voidaan myös luokitella niiden sisältämän energian lämpötilan mukaan, niin kutsutuiksi matala- ja korkealämpötilavarastoiksi. Lisäksi lämpövarastot voidaan luokitella niiden syklien keston mukaan, eli lyhyt- tai pitkäkestoisiksi varastoiksi. **Kuvio 2.** esittää jokaisen lämpövarastoinnin päätyypin toimintaperiaatteen, millä aineen olomuodoilla toimintaperiaatetta toteutetaan ja lisäksi mitkä ovat näitä aineita tai materiaaleja. /1/

Lämpövaraston tyyppi	Toimintaperiaate	Olomuodot	Esimerkkejä
Tuntuva	Lämpötilan muutos korkeimmalla mahdollisella lämpökapasiteetilla	Neste Kiinteä	Lämminvesi, orgaaniset nesteet, sulatetut suolat nestemäiset metallit Metallit, mineraalit, savituotteet
Latentti	Olennaislämpö olomuodonmuutokselle	Neste → kiinteä Kiinteä → kiinteä	Nitritit, kloridit, hydroksidit, karbonaatit, fluoridit, eutektikumit Hydroksidit
Termokemiallinen	Suuri määrä kemiallista energiaa absorboituu ja vapautuu tasapainotilaa muutettaessa paineen ja lämpötilan avulla	Kiinteä → Kaasu Kaasu → kaasu Neste → kaasu	CaO/H ₂ O, MgO/H ₂ O, FeCl ₂ /NH ₃ , CH ₄ /H ₂ O LiBr/H ₂ O, NaOH/H ₂ O, H ₂ SO ₄ /H ₂ O

Kuvio 2. Yleiskatsaus lämpöenergian varastointimenetelmistä. /1/

3.1 Tuntuvan lämpöenergian varastointi

Tuntuvan lämpöenergian varastoinniksi kutsutaan sitä, kun lämpövarastomateriaaliin varastoidaan energiaa sen lämpötilaa muuttamalla. Varastomateriaalina voidaan käyttää vettä, ilmaa, öljyä, kallioperää, tiiltä, betonia ja ynnä muita materiaaleja. Jokaisella materiaalilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mutta yleensä materiaali valitaan sen lämpökapasiteetin ja myös varastolle käytettävän tilavuuden mukaan. /2/

Varastoidun energian määrä lasketaan seuraavasti:

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (1)$$

jossa Q on varastoidun energian määrä materiaaliin (J), m on varastomateriaalin massa (kg), c_p on varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti (J/kg × K) ja ΔT on lämpötilan muutos (K). /2/

Sopivia varastomateriaaleja valittaessa tärkeitä tarkasteltavia ominaisuuksia ovat aineen tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtokyky ja terminen diffusiviteetti, höyrynpaine, yhteensopivuus säiliön materiaalien kanssa ja kemiallinen stabiilius. Valittavan materiaalin pitää myös esiintyä runsaasti, olla halpaa ja omistaa

korkea lämpökapasiteetti, jotta se voi toimia taloudellisesti kannattavasti lämpövarastoprojektissa. Tuntuva lämpöä varastoidaan yleensä joko kiinteisiin tai neste-mäisiin aineisiin. Kuitenkin myös kaasuja pystytään käyttämään varastomateriaalina, nämä ratkaisut vievät kuitenkin paljon enemmän tilaa. Tuntuvan lämmön varastointi on yleisimmin käytetty varastointimenetelmä ja yleisemmin sen sovelluk-sissa käytettävä varastomateriaali on vesi. /2/

<u>Materiaali</u>	<u>Tiheys (kg/m³)</u>	<u>Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)</u>	<u>Lämpösisältö tilavuutta kohden (J/m³K)</u>
<u>Vesi</u>	988	4182	4.17
<u>Lasi</u>	2710	837	2.27
<u>Kallio</u>	2560	879	2.1
<u>Savi</u>	1458	879	1.28
<u>Tiili</u>	1800	837	1.51
<u>Hiekkakivi</u>	2200	712	1.57
<u>Puu</u>	700	2390	1.67
<u>Betoni</u>	2000	880	1.76
<u>Alumiini</u>	2710	896	2.43
<u>Teräs</u>	7840	465	3.68
<u>Sora</u>	2050	1840	3.77

Taulukko 1 Yleisimmin käytettyjen materiaalien ominaislämpökapasiteetteja 20 °.
/3/

3.2 Latentin lämpöenergian varastointi

Latentin lämpöenergian varastointi perustuu varastoaineen faasimuutokseen, jossa joko sitoutuu tai vapautuu energiaa. Useimmin käytetään varastoaineen kiinteästä-nesteeksi faasimuutosta, sulattaen ja kiinteyttäen ainetta. Tällöin sulamislämpöä siirretään varastointiaineeseen, jolloin lämpöenergiaa sitoutuu varastoaineeseen va-kiolämpötilassa. Sitoutunut lämpö vapautuu, kun varastoaine jälleen kiinteytyy. La-tentin lämmön varastointiin käytettäviä materiaaleista käytetään termiä PCM (phase change materials) eli faasimuutosmateriaalit. /2/

Latentin lämmön varastointi tarjoaa paljon korkeamman varastointitiheyden ja kaapeamman lämpötilan vaihteluvälin lämmön varastoinnin ja sen vapauttamisen välillä, kuin tuntevan lämmön varastointi. Faasimuutosmateriaalien tulisi olla helposti käytettävissä isoissa määrin halvoilla kustannuksilla. Ihanteellisen faasimuutosmateriaalin tulisi täyttää myös useita seuraavia haluttuja termofysikaalisia, kineettisiä ja kemikaalisia ominaisuuksia:

Lämpöominaisuuksia:

- Sulamislämpötila halutulla toiminta-alueella
- Korkea latentti lämpö faasimuutoksessa tilavuusyksikköä kohden
- Korkea ominaislämpökapasiteetti
- Korkea lämmönjohtavuus molemmissa faasimuodoissa

Fysikaalisia ominaisuuksia:

- Vähäinen tilavuuden muuttuminen faasimuutoksessa
- Alhainen höyrynpaine toimintalämpötilassa
- Faasin stabiili kiderakenne vallitsevissa olosuhteissa
- Yhdenmukainen sulaminen faasimuutosmateriaalilla
- Korkea tiheys

Kineettisiä ominaisuuksia:

- Ei alijäähtymistä
- Aineen olomuodon muutoksen ensimmäisen vaiheen nopea alkaminen
- Riittävä kiteytymisnopeus

Kemikaalisia ominaisuuksia:

- Pitkäkestoinen kemikaalinen stabiilius
- Kokonaan palautuva jäätymis- ja sulamiskierto
- Yhteensopivuus säiliön materiaalien kanssa
- Ei korroosiota säiliön materiaaleissa
- Myrkytön, syttymätön ja räjähtämätön turvallisuuden takaamiseksi. /3/

Varastoidun energian määrä lasketaan seuraavasti:

$$Q = m \times \Delta h \quad (2)$$

jossa Q on varastoidun energian määrä materiaaliin (J), m on varastomateriaalin massa (kg) ja Δh on faasimuutoksen entalpia (J/kg). /2/

Eniten tutkittu ja käytetty faasimuutosmateriaali on vesi, jota on käytetty kylmävarastoimisessa jo aikojen alusta. Monia faasimuutosmateriaaleja on tutkittu, mutta harvasta ollaan saatu käyttökelpoisia kaupalliseen käyttöön. Useimmiten faasimuutosmateriaalien ongelmia ovat korrosio, alijäähtyvyys, faasin erottuminen, pitkäaikainen stabiilius ja alhainen lämmönjohtavuus. Yleensä faasimuutosmateriaalien valintaan ovat eniten vaikuttaneet niiden sopivat sulamislämpötilat ja lämpötila-entalpiat, saatavuus, sekä hinta. **Taulukossa 2** esitetään joitakin potentiaalisia faasimuutosmateriaaleja ja niiden sulamislämpötiloja sekä faasimuutoksen lämpöenergian määriä. /2/

<u>Yhdiste</u>	<u>Sulamislämpötila (°C)</u>	<u>Faasimuutoksen lämpöenergia (J/g)</u>
AlCl ₃	192	280
LiNO ₃	250	370
KNO ₃	333	263
<u>LiH</u>	699	2678
NaCl	800	492
MgF ₂	1271	936
KClO ₄	527	1253
<u>NaF</u>	993	750

Taulukko 2. Potentiaalisia epäorgaanisia yhdisteitä faasimuutosmateriaaleiksi. /3/

3.3 Termokemiallisen lämpöenergian varastointi

Termokemiallinen lämpöenergiavarasto syntyy, kun kemiallisessa reaktiossa sitoutuu tai vapautuu energiaa molekyylisidosten muodostuessa tai katketessa. Reaktiossa syntyneet tuotteet pitäisi pystyä varastoimaan ja reaktiossa sitoutunut energia palauttamaan takaisin lämmöksi käänteisessä reaktiossa. Kemiallisissa reaktioissa käytettäviltä aineilta vaaditaan reaktion palautettavuutta ja korkeaa energiatiheyttä. Termokemiallisilla varastomateriaaleilla on yleensä huomattavasti suurempi energiatiheys kuin tuntuvan- ja latentin lämpöenergian varastomateriaaleilla. Suurin haaste termokemialliselle energianvarastoinnille on löytää sopiva kaksisuuntainen kemiallinen reaktio käytettävälle energianlähteelle. /2, 4/

Termokemiallisen energian varastointi voidaan jakaa joko ainoastaan kemiallisesti reagoiviin tai lämpökemiallisesti reagoiviin varastoihin. Kemialliset varastointijärjestelmät perustuvat kahden erillisen kemikaalin palautuvaan reaktioon, jossa suuri määrä energiaa syntyy eksotermisen synteisireaktion tuloksena. Lämpökemialliseen reaktioon perustuvat varastointijärjestelmät perustuvat absorptio- ja adsorptiomekanismeihin. Absorptio- ja adsorptiojärjestelmässä tuotetaan suhteellisen pieni määrä energiaa pienemmällä lämpötilalla kuin ainoastaan kemiallisissa varastoissa, mutta näiden reaktioiden käynnistämiseen vaadittava energiamäärä on myös pienempi. Tämä takaa absorptio- ja adsorptio energiavarastojärjestelmille selvän hyödyn matalanlämpötilan sovelluksissa. /4/

Termokemiallisilla lämpövarastoilla on joitakin erittäin varteenotettavia hyötyjä verrattuna muihin varastojärjestelmiin, kuten; korkea energiatiheys, pieni tarvittava tilavuus, sekä vähäiset lämpöhäviöt myös pitkällä varastointiajanjaksoilla. Kuitenkin termokemiallisilla varastointimateriaaleilla löytyy vielä paljon heikkouksia ja niiden kehitys on vasta alkuvaiheessa. Tutkimuksia termokemiallisista materiaaleista tehdään jatkuvasti tälläkin hetkellä ja odotettavissa on, että tulevaisuudessa kehitetään tapoja, jotka soveltuvat kaupalliseen tuotantoon. /4/

4 PROJEKTIEEN ESITTELY JA NIIDEN KÄYTTÄMIEN TEKNOLOGIOIDEN LÄPIKÄYMINEN

4.1 Veden toimiminen lämmön varastointimateriaalina

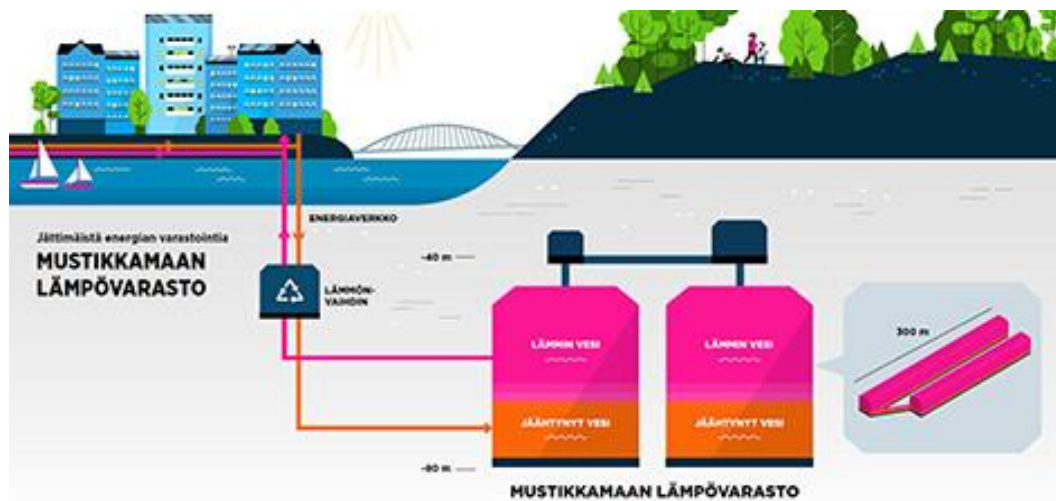
Tuntuvan lämmön varastoinnissa käytetään lämmönvarastointimateriaalin lämpötilan kohottamista lämmön varastoimiseen. Jotta saavutetaan korkea lämmön varastointitiheys suhteessa tilavuuteen, eli korkea lämpösisältö suhteessa tilavuuteen, pitää lämmönvarastointimateriaalilla olla korkea lämpökapasiteetti ja tiheys. **Taulukko 1.** voidaan huomata, että vedellä on erittäin korkea lämpösisältö niin tilavuus- kuin painoyksikköä kohden, verrattuna muihin potentiaalsiin lämpövarastomateriaaleihin. Lisäksi vesi on harmitonta ympäristölle, suhteellisen halpaa, helposti saatavilla, sekä helppo käsitellä ja varastoida jäätymispisteestä aina kiehumispisteeseen asti. Näiden asioiden takia vesi on eniten käytetty varastointimateriaali lämpövarastoissa. /5/

Lämpimän veden kausittaiseen varastointiin käytetään nykyään muutamia erilaisia tekniikoita, esimerkiksi erilaiset tankkijärjestelmät ovat eniten käytetty lämpimän veden varastointitapa. Nämä tankit voivat olla tehty teräksestä, ruostumattomasta teräksestä, betonista, muovista. Näitä tankkijärjestelmiä kutsutaan maanpäällisiksi varastoiksi. Maanalaiset lämpövarastot ovat toisenlainen tapa varastoida vettä ja siihen sitoutunutta lämpöä yli vuodenvaihteiden, ja näitä ovat esimerkiksi erilaisilla vesitiiviillä aineilla eristetyt kaivantovarastot ja luolavarastot. Vaikka tankkijärjestelmät ovat eniten käytetty lämpövarastotekniikka, on niillä kuitenkin selviä heikkouksia verrattuna maanalaisiin varastoihin. Näitä ovat esimerkiksi niiden vaatima tila, sekä isoimpana ongelmana se, että muihin varastointi keinoihin verrattuna tankkijärjestelmien varastoitu energia on suhteessa kalliimpaa, johtuen niiden lämpöhäviöiden suuruudesta ja järjestelmien rakennuskustannuksista suhteessa tilavuutta kohden. Lämminvesivarastot ovat yleensä eristetty materiaaleilla, joilla on heikko lämmönjohtavuus, jotta lämpövarastoissa ei tapahtuisi lämpöenergian häviämistä. Maanalaisissa varastoissa eristyksenä toimii yleensä varastoa ympäröivä maa-aines tai maaperä, mutta erilaisia muovieristyksiä saatetaan myös käyttää. Tär-

keimpiä lämpöominaisuuksia lämpövesivarastolle ovat: lämpövaraston kapasiteetti, lämpöhäviöt, lämmönvaihdon kapasiteetti lataamiselle ja purkamiselle, sekä lämpötilan kerrostuminen lämpövesivarastossa. /5/

4.1.1 Case Mustikkamaa Suomi

Helen on päättänyt rakentaa Helsingin Mustikkamaalle tähän asti Suomen suurimman lämpövaraston ja nyt valmistuessaan lämpövarasto olisi maailman tämän hetkisesti suurin. Lämpövarastoina käytetään kallioluolia, joita on aikaisemmin käytetty varastoimaan raskasta polttoöljyä ja jotka on poistettu käytöstä jo vuonna 1999. Lämpövarastomateriaalina käytetään vettä. Varastoitava vesi otetaan kaukolämmityksestä sellaisena ajankohtana, kun kysyntä on alhaalla ja sitä hyödynnetään kaukolämmityksessä, kun kysyntä on korkeammalla. Lämpövarastoon investointi on arviolta noin 15 miljoonaa euroa ja sen pitäisi olla käyttövalmis vuonna 2021. Tilavuutta lämpövarastoilla on 260 000 m³ ja purkutehoa noin 120 MW, joka mahdollistaa 4 vuorokauden purun tai latauksen. Varastoitava energiamäärä on yhteensä noin 11,6 GWh. /6/



Kuvio 3. Havainnekuvitus Mustikkamaan luolalämpövarastojen koosta. Lämpövarastot sijaitsevat 40–80 metrin syvyydessä. /6/

Kun lämpövarastona toimiva luola ensimmäistä kertaa täytetään, on syntyvät lämpöhäviöt ympäröivään kallioon huomattavia. Kuitenkin kahden ensimmäisen vuoden aikana kallioperään muodostuu suhteellisen stabiili lämpökehä, joka vähentää

lämmön katoamista sen lämpimästä keskustasta. Lämpöhäviötä silti tapahtuu, mutta kuiva kallio on yleensä huono johtamaan lämpöä. Luolalämpövarastoissa lämpöhäviöt pitäisi olla alle 10 % yhden operaationallisen syklin aikana, olosuhteet vaikuttavat kuitenkin lämpöhäviöihin suuresti. /7, s.125–129/

4.1.2 Case Vojens Tanska

Vojensissa Tanskassa sijaitsee tällä hetkellä maailman suurin lämpövarasto, joka käyttää varastomateriaalinaan vettä. Tämä kaivantolämpövarasto on kooltaan 200 000 m³ ja se on valmistunut vuoden 2015 toukokuussa. Lämpövaraston yhteydessä toimii 70 000 m² suuruinen aurinkolämpövoimala, joka tuottaa yli 50 % vuotuisesti tarvittavasta lämmöstä. Loput tarvittavasta lämmöstä tuotetaan 3 kaasumoottorilla, 10 MW sähköhöyrykattilalla, absorptiolämpöpumpulla ja kaasuhöyrykattilalla. /8/

Lämpövarasto on rakennettu vanhaan hiekkakuoppaan. Varastomateriaalina käytettävä vesi on eristetty ympäröivästä hiekasta erikoishitsatun muovisen vuorauksen avulla, jotta vettä ei katoaisi maaperään ja vesi pysyisi puhtaana. Veden yläpinta on myös eristetty samalla muovisella vuorauksella, sekä vielä tämän lisäksi eristävällä kannella ja myös sadeveden tyhjennysjärjestelmällä. Järjestelmän maksimi lämpötila on käytännössä 95 °C, mutta varaston lämpötila pidetään noin 80 °C, vuorauksen eliniän pidentämiseksi. Varaston 200 000 m³ vesimäärä pidetään erillään muusta kaukolämmityksessä toimivasta vedestä erillisen lämmönvaihtimen avulla. Lämpövaraston rakennuttaja Rambollilla on kokemusta aikaisemmista kaivantovaroista ja siksi Vojensin lämpövarastoa rakennettaessa on keskitytty erityisesti viiteen asiaan, joilla projektin toimivuutta ja kannattavuutta pystytään parantamaan. Nämä erityishuomiota vaativat asiat ovat:

- Teräsputkien suojaaminen korroosiota vastaan
- Veden pitäminen puhtaana ilman orgaanisia aineita
- Eristävän kannen vahingoittumisen estäminen
- Muovivuorauksen asentaminen
- Prosessiveden tuottaminen. /8/



Kuvio 4. Kuva Vojensin kaivantolämpövarastosta. /8/

Kun maaperän ympäröiviä lämpövarastoja otetaan käyttöön, kestää aina pari vuotta, jotta varastoa ympäröivä maa-aines lämpenee. Tässä ajassa saavutetaan lämpötasapaino lämpövaraston ja sen ympäröivän maaperän välillä, koska kestää pitkän aikaa ennen kuin suuri määrä varastoa ympäröivää maaperää saadaan lämmitettyä. Tämä kuiva ympäröivä maaperä on osa lämpövaraston eristystä ja auttaa vähentämään lämpöhäviöitä. /8/

4.1.3 Case Gram Tanska

Vuonna 2015 kuluttajiensa omistama kaukolämpöyhtiö Gram Fjernvarme rakennutti jo olemassa olevan 10 000 m² aurinkolämpövoimalaitoksen lisäksi uudet 34 000 m² aurinkolämpövoimaa, yhteensä pinta-alaksi voimalaitokselle tuli näin 44 000 m². Samana vuonna rakennettiin myös kausittainen kaivantolämpövarasto, jonka koko on 120 000 m³. Suunnittelijana ja rakennuttajana toimi sama yhtiö kuin Vojensissa, eli Ramboll. Projekti toteutettiin 2500 asukkaan pikkukaupungissa Gramissa. Gram Fjernvarme toimittaa lämpöä lähes jokaiseen Gramin kunnan asuntoon. /9, 10/

Gramin kaivantolämpövarasto rakennettiin tasaiselle pellolle, jonka maaperä on saviperäistä. Lämpövarastolle jouduttiin tämän takia rakentamaan ympäröivä pato. Noin 10 metriä syvä kaivanto ja 5 metriä korkea pato muodostavat yhteensä 15 metriä korkean varastotilavuuden, joka on sama korkeus kuin Vojensin projektilla. Gramin projektin hinnaksi tuli siten 15 % korkeampaa tilavuusyksikköä kohden kuin mitä Vojensin projektilla, eli noin 2,8 miljoonaa euroa. /9/

Lämpövarasto mahdollistaa aurinkokeräimillä tuotetun lämmön osuuden nousemisen 16 prosentista aina 61 prosenttiin Gram Fjernvarmen kokonaiskaukolämmön tuotosta. Kokonaislämmöntuotannon hinta aurinkolämmölle ja sen varastoinnille on arvioitu olevan noin 40 €/MWh. Yhtiön tuottaa yhteensä 30 GWh lämpöä vuodessa ja aurinkokeräimien lisäksi se tuottaa loput tarvittavasta lämmöstä 10 MW sähköhöyrykattilalla (15 %), 900 kW lämpöpumpulla (8 %), teollisuudesta saatavalla hukkalämmöllä (8 %), sekä sähköä ja lämpöä tuottavalla kaasumoottorilla (8 %). /9/

4.1.4 Päätelmät

Kausittaisissa lämpövarastojärjestelmissä, jotka käyttävät vettä lämpövarastomateriaalina, voidaan huomata, että varaston tilavuutta kasvattamalla saadaan suhteellisesti pienennettyä lämpöhäviöiden suuruutta. Tämä johtuu lämpövaraston pinta-alan ja tilavuuden suhteesta, sillä veden määrää lisättäessä pinta-alan suuruus suhteellisesti pienenee tilavuuden kasvaessa. Vesi on eniten käytetty lämpövarastomateriaali sen korkean lämpökapasiteetin ja tiheyden takia. Lisäksi vesi on ympäristölle harmitonta, sitä on helposti saatavilla, sen käyttäminen on helppoa ja sen käytöstä on paljon kokemuksia pitkältä ajalta. Veden käyttöön perustuvaa lämmön varastointia on tutkittu paljon ja se on todistetusti taloudellisesti kannattavaa. /11/

Mustikkamaan luolalämpövarastolla saadaan aikaan joustoa energiajärjestelmään, koska sen avulla voidaan tasata lämmön kulutusta. Tämän avulla voidaan välttää muiden, esimerkiksi öljyllä tai kaasulla toimivien lämpölaitosten, ylimääräinen käynnistäminen. Näin ollen lämpövarastolla pystytään vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja pystytään tukemaan kansallisia energian- ja ilmastostrategioiden toteutumista. Taloudellisesti kannattavamman lämpövarastosta tekee sen jo valmiina oleva infrastruktuuri. Suurimmat kustannukset maanalaisissa lämpövarastoissa syntyvät yleensä maan muokkaamisesta ja kallionlouhinnasta, joten on tärkeää Mustikkamaan projektin kannattavuuden kannalta, että infra on jo osittain tai lähes kokonaan valmiina. On myös tärkeä huomata, että parin ensimmäisen käyttövuoden aikana lämpöhäviöt tulevat olemaan huomattavasti suurempia kuin odotetut

10 %, sillä kestää kauan lämmittää lämpövaraston ympärillä oleva kalliomassa. Parin vuoden aikana kuitenkin kallio on lämmennyt ja toimii myös tärkeänä osana lämpövaraston eristystä.

Vojensin ja Gramin kaivantolämpövarastoista voidaan muodostaa helposti johtopäätöksiä, toisaalta projektien samankaltaisuuden, mutta myös yhden huomattavan eron takia. Vojensin ja Gramin projekteista voidaan huomata, kuinka suuri etu taloudellisesti on sillä, että kallio- tai kaivantolämpövarasto pystytään rakentamaan mahdollisimman vähällä maanmuokkaamisella ja näin ollen saada aikaseksi taloudellisesti mahdollisimman kannattava projekti. Vojensin lämpövarastoprojektin kustannukset olivat noin 4 miljoonan euron luokkaa ja Gramin noin 2,8 miljoonaa euroa, Vojensin projektin kuitenkin ollessa 1,7 kertaa Gramia suurempi. Näin saadaan selville, että Gramin projekti on 15 % kalliimpi tilavuusyksikköä kohden johdettua maanmuokkaamisesta ja lämpövarastoa ympäröivän padon rakentamisesta syntyneistä kustannuksista. Projekteista voidaan myös huomata, kuinka aurinkolämmön ja lämmönvarastointitekniikka yhdessä käyttämällä voidaan lisätä huomattavasti uusiutuvista energialähteistä tuotettua energiaa, sekä kuinka lämpövarastojen avulla pystytään vastaamaan kausittaisiin kysynnän vaihteluihin ja näin ollen tukemaan uusiutuvia energialähteitä ja niiden käytön yleistymistä.

Luolalämpövarastot ja kaivantolämpövarastot näyttävät olevan varteenotettavia teknologioita kausittaiseen lämpöenergian varastointiin. Erityisesti kannattavia tämän tyyppisistä projekteista tulee, kun infrastruktuuri on lähes kokonaan valmiina ja kun säästetään isoimmilta maanmuokkauksilta. Suomessa näyttää olevan selvästi kiinnostusta erityisesti luolalämpövarastojen käyttämisen suhteen ja tästä kertoo suunnitteilla olevat, jo aikaisemmin esitelty Mustikkamaan projekti, sekä myös Helsinkiin suunnitteilla oleva Kruunuvuorenrannan projekti. Molemmissa näissä projekteissa käytetään valmiina olevia vanhoja öljyluolia veden varastointiin. Kruunuvuorenrannan projekti eroaa sillä tavalla aikaisemmin esitellystä Mustikkamaan projektistä, että lämmin vesi otettaisiin kesän aikana merivedestä ja käytettäisiin talvella lämmittämiseen. Näin ollen varastoitava energia olisi tuotettu kokonaan uusiutuvasti ja olisi ilmaista. Helsingissä sijaitsee myös vuonna 2015 valmis-

tunut Esplanadin puiston alla sijaitseva tekojärvi, jota käytetään kaukojäähdytysjärjestelmän akkuna. Kesällä tästä lämpövarastosta saadaan viilennystä kaupungin rakennuksiin. Voidaankin todeta, että Suomi on yksi edelläkävijöistä, mitä tulee luolalämpövarastojen hyödyntämiseen kausittaisessa lämpöenergiavarastoinnissa ja se tulee kasvattamaan asemaansa lämpövarastojen käyttäjänä entuudestaan tulevaisuudessa. /20, 21/

4.2 Pohjavesivaraston käyttäminen lämpövarastona

Pohjavesivaraston käyttäminen lämpövarastona edellyttää sen, että käyttökohde sijaitsee lähellä paikkaa, jossa pohjavesivarasto esiintyy. Pohjavesi määritellään olevan se maanalainen vesikerros, jossa kaikki maa- ja kallioperän huokokset ovat veden kyllästämiä. Pohjavesivarasto voidaan käytännössä määritellä olevan geologinen muodostuma, joka sisältää pohjavettä. Pohjavesivarasto eli akviferi sijaitsee geologisessa muodostumassa, jonka maa-aines on riittävän läpäisevä tuottamaan ja varastoimaan suuria määriä pohjavettä. /7, s.59–91/

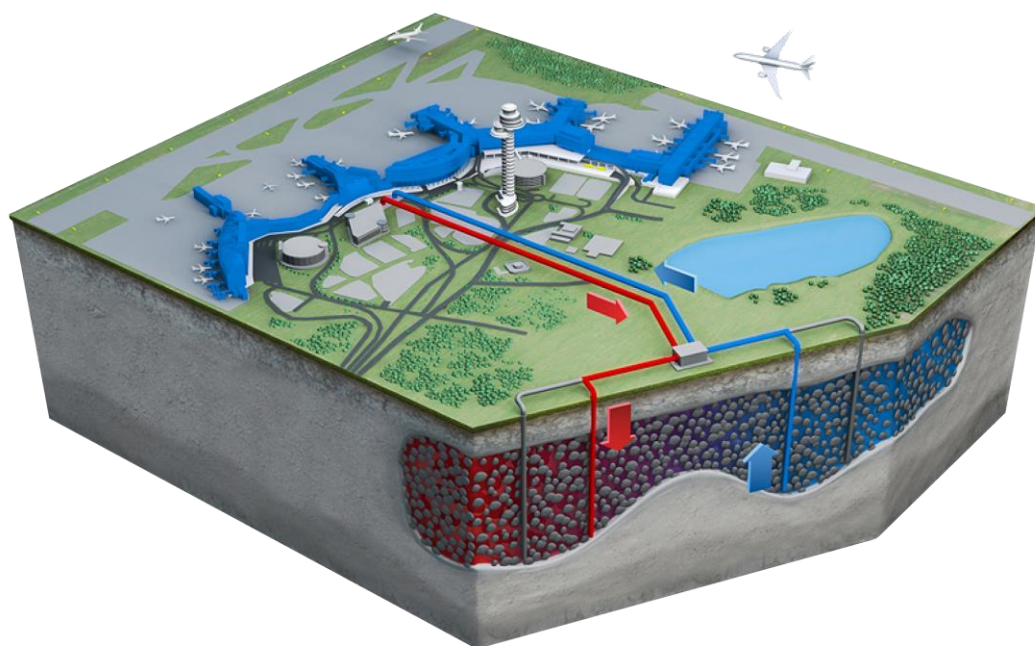
Pohjavesivaraston käyttäminen lämpövarastona on toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertainen. Talven kylmäilma voidaan ottaa talteen ja varastoida pohjavesivarastoon. Kesällä viilennystä tarvittaessa, voidaan talvella varastoitu kylmä käyttää viilennykseen. Pohjavettä käytetään kuljettamaan lämpöenergiaa pohjavesivarastoon ja sieltä pois. Järjestelmässä varastoitava energia varastoituu osittain pohjaveen itseensä, mutta myös pohjavesivaraston muodostamaan maa-ainekseen. Vähimmillään, pohjavesivarastoja käytettäessä lämpövarastoina, tarvitaan yksi kylmä kaivo ja yksi lämmin kaivo. Isommissa järjestelmissä molempia kaivotyyppejä on useita. Kun käyttäjä tarvitsee viilennystä, voidaan se ottaa kylmäkaivoista. Kun vesi on käytetty viilennykseen, se palautetaan lämpimiin kaivoihin, koska veden lämpötila on noussut sen luovuttaessa varastoimansa kylmän. Kun taas tarvitaan energiaa lämmitykseen, voidaan ottaa vettä lämpimästä kaivosta luovuttamaan lämpöä. Kun vesi on luovuttanut lämpönsä lämmitykseen, se pumpataan takaisin kylmiin kaivoihin. Tämän teknologian avulla pystytään, ainakin vähentämään, joissakin tapauksissa jopa luopumaan kokonaan, jäähdyttimien ja lämpöpumppujen käyttämisestä.

Koska jäähdyttimet ja lämpöpumput käyttävät isoja määriä sähköä, voidaan näin säästää suuria määriä sähkökuluissa. /7, s.59–91, 12/

4.2.1 Case Arlandan lentokenttä

Tukholma-Arlanda lentokenttä on Ruotsin suurin lentokenttä ja se sijaitsee 40 km pohjoiseen Tukholmasta. Joka vuosi 18 miljoonaa matkustajaa kulkee lentokentän kautta ja 15 000 ihmistä työskentelee siellä. Ympäristöasiat ovat olleet lentokentälle tärkeitä jo vuosia ja sen täytyy täyttää noin 40 ympäristöolosuhteisiin liittyvää ehtoa, jotta se saa luvan toimia lentokenttänä. Tukholma-Arlanda lentokenttä on maailman ainoa lentokenttä, jolla on asetettu päästöraja hiilidioksidipäästöille. Tähän päästörajaan sisälletään lentokoneiden lähtökiihdytyksissä ja laskeutumisissa syntyvät päästöt, liikenteen aiheuttamat päästöt lentokentälle saapuvista ja sieltä lähtevistä kuljetuksista, sekä lentokentän lämmityksestä ja viilennyksestä syntyvät päästöt. Toinen tavoite lentokentälle on vähentää sen energiankulutusta, sekä sen käyttämästä energiasta 100 % täytyisi tulla uusiutuvista energianlähteistä tulevaisuudessa. Lentokentän itse käyttämä sähkönmäärä on 77 GWh per vuosi ja lämmitykseen sillä kuluu 40 GWh per vuosi. /13/

Lentokenttä käyttää pari kilometriä terminaaleista sijaitsevaa pohjavesivarastoa lämpövarastonaan. Pohjavesivaraston pohjalla sijaitsee luonnollinen harju, joka jakaa sen kahteen osaan. Kylmää ja lämpöä varastoidaan kausittaisesti pohjavesivarastoon eri puolelle harjua, näin luodaan niin kutsutut kylmät kaivot ja lämpimät kaivot. Talvella varastoitua lämpöä käytetään lentokentän lämmitykseen, sekä kiitoratojen sulana pitämiseen. Näin ollen viilentynyt vesi johdetaan takaisin pohjavesivarastoon sen kylmälle puolelle. Kesällä kylmää vettä käytetään lentokentän viilennykseen. /13/



Kuvio 5. Havainne kuva Tukholma-Arlanda lentokentästä ja sen käyttämästä pohjavesilämpövarastosta. /14/

Idea pohjavesivaraston käyttämisestä lämpövarastona sai alkunsa vuonna 2005 ja vuonna 2006 tehtiin projektin toteutettavuustutkimus, jota seurasi alueen hydrogeologiset tutkimukset. Tarvittavat luvat projektille myönnettiin vuonna 2008 ja lämpövaraston rakennusurakka alkoi samana vuonna. Järjestelmä suunniteltiin niin, että se kattaisi 6–8 MW lämmitys- ja viilennyskuorman, pohjaveden maksimivirtauksen ollessa 720 m³/h. Järjestelmä sisältää 5 kylmää kaivoa, jotka sijaitsevat pohjavesivaraston harjun pohjoispuolella ja 6 lämmintä kaivoa, jotka sijaitsevat harjun eteläisellä puolella. Vesi pumpataan toiselta puolelta harjua ja ohjataan lämmönvaihtimeen luovuttamaan sen sisältämä lämpö tai kylmä, jonka jälkeen se palautetaan toiselle puolelle pohjavesivarastoa. Veden kierrättäminen rakennuksissa hoidetaan paikallista kaukolämpöputkistoa pitkin. /13, 15/

Talvella lämpö käytetään terminaalien ilmastoinneissa ilman esilämmitykseen ja kiitoratojen sulana pitämiseen. Lämpöenergiansa luovuttanut vesi siirretään pohjavesivaraston kylmälle puolelle. Normaaleissa olosuhteissa kylmän puolen lämpötila pohjavesivarastossa vaihtelee arviolta +3 °C ja +5 °C välillä. Järjestelmällä pystytään korvaamaan 15 GWh edestä kaukolämmityksellä tuotettua lämpöenergiaa.

Kesällä veden kiertosuunta käännetään päinvastaiseksi ja kylmä ilma käytetään terminaalien ilman viilentämiseen. Tällä tavoin korvataan vanhoilla perinteisillä jäädyttimillä tuotettua viilennystä noin 4 GWh edestä. Kun vesi on käytetty viilennykseen, sen lämpötila on noussut noin +15 °C, mutta tätä lämpötilaa pystytään nostamaan kiitoratojen alla olevalla lämmitysjärjestelmällä, sekä aurinkoisina päivinä aurinkokeräimien tuottamalla lämmöllä noin +25 °C. /13/

Pohjavesivaraston käyttäminen lämmön varastointiin Tukholma-Arlandan lentokentällä on laskenut huomattavasti energiankulutusta. Lämpövarastolla säästetään 4 GWh/vuosi sähkön käyttöä viilennyksessä ja 15 GWh/vuosi kaukolämmityksestä. Näin ollen arvioidut syntyneet säästöt energiankulutuksen vähenemisestä ovat 1 miljoonan euron luokkaa, lämpövaraston rakentamiseen käytettyjen varojen ollessa vain 5 miljoonaa euroa. Järjestelmän tehokkuus on siis erittäin suuri, kun lämpöpumppuja ei käytetä, eikä se ole silloin täysin riippuvainen sähkön hinnan vaihtelusta. /12/

4.2.2 Päätelmät

Kaikista maanalaisista kausittaisista lämpöenergian varastointitekniikoista, pohjavesivarastoja käytettäessä lämpövarastoina, on niillä suurimmat varastokapasiteetit ja siksi ne sopivat parhaiten suurikokoisiin sovellutuksiin. Kuitenkin tällaista lämpövarastoa luodessa, pitää pohjavesivaraston esiintyä lähellä käyttöpaikkaa ja sillä täytyy olla oikeanlaiset hydrogeologiset olosuhteet, kuten alhainen pohjaveden virtaus, korkea läpäisevyys ja geokemialliset olosuhteet, jotka vähentävät kaivojen tukkeutumista ja korroosiota. Pohjavesivaraston käyttäminen kylmän ja lämmön varastointiin mahdollistaa lämpövaraston tehokkaamman toiminnan, kuin mitä ainoastaan pelkän lämmön tai kylmän varastointi mahdollistaa. Järjestelmän kokoa kasvatettaessa saadaan energian hintaa laskettua (€/kW), koska kuten muissakin tuntuvan lämmön varastointiin perustuvissa tekniikoissa, varaston isompi koko vähentää suhteellisesti lämmön katoamista varastosta. Lämpövarastoa käytettäessä suoraan viilentämiseen, voidaan sillä saavuttaa 90 % hyötysuhde, epäsuorassa vain

40–85 %. Tyypillisesti pohjavesivarastoa käytettäessä lämpövarastona, sen takaisinmaksu aika vaihtelee 2–10 vuoden välillä. Arviot pohjavesivaraston eliniästä, kun se toimii lämpövarastona vaihtelevat aina 25–50 vuoteen. /15/

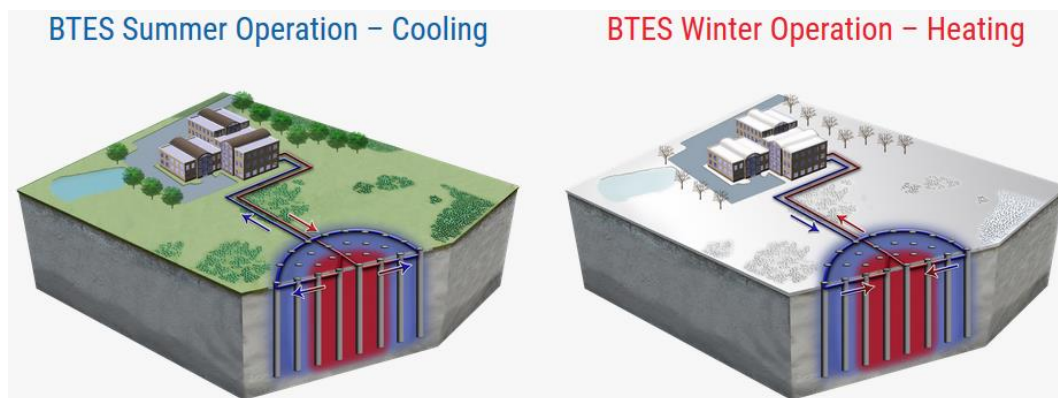
Alankomaissa sijaitseviin 74 pohjavesilämpövarastoprojektiin perustuvissa tutkimuksissa saatiin selville, että keskimäärin pumpatusta pohjavedestä saatiin 0,46 kg/m³ CO₂ -päästöjen väheneminen verrattuna perinteisiin lämmitys- ja viilennystapoihin. Suurissa järjestelmissä tämä vastaa noin 1500 tonnin CO₂ -päästöjen vähenemistä vuodessa. Tästä esimerkkinä voidaan käyttää Eindhovenin Yliopiston kampuksella sijaitsevaa, maailman toistaiseksi suurinta pohjavesilämpövarastoprojektia, joka säästää vuodessa yli 13 000 tonnia CO₂ -päästöissä. /15/

Toteutettuja pohjavesilämpövarastoprojekteja on maailmanlaajuisesti melkein 3 000, joten sen teknologia voidaan luokitella todistetusti tehokkaasti tavaksi tasata kausittaisten energiantarpeiden vaihteluita. Nämä projektit sijoittuvat kuitenkin oikeastaan kokonaan Länsi- ja Pohjois-Euroopan maihin, suurimpina Alankomaat (2500 järjestelmää) ja Ruotsi (220). Suurimpana syynä siihen, ettei pohjavesivarastojen käyttö lämpövarastoina ole yleistynyt, on yleinen tiedottomuus teknologiasta, sillä varaston lämpötilan ollessa alle 40 °C on melkein kaikki teknilliset ongelmat jo ratkaistu. Tiedottomuuden takia markkinoilta puuttuu oikeanlaiset rakenteet pohjavesivarastojen käyttämiseen lämpövarastoina. Rajoitteita tämän teknologian yleistymiseen ovat myös sen erityiset hydrogeologiset vaatimukset, pohjavesivaraston sijaitseminen lähellä käyttökohdetta, sekä mahdolliset huolet syntyvistä ympäristöllisistä ongelmista pohjaveden saastumisen myötä yms. Voidaan kuitenkin olettaa, että kyseinen teknologia yleistyy tulevaisuudessa muuallakin kuin vain Alankomaissa ja Ruotsissa, ja tästä on jo saatu viitteitä, sillä viimeisinä vuosina uusia pohjavesivarasto projekteja on aloitettu esimerkiksi Saksassa, Kiinassa ja Japanissa. /15/

4.3 Porakaivotekniikan käyttäminen lämmönvarastointiin

Maanalaisista lämpöenergian varastointijärjestelmistä porakaivolämpövarastot ovat yksi lupaavimmista pitkän ajan varastoista sen teknologisten ominaisuuksien vuoksi. Porakaivotekniikkaa pystytään hyödyntämään moniin erilaisiin maaperiin sen teknologisen joustavuuden takia, joka tekee siitä suosittua. Porakaivolämpövarastoissa varastoidaan lämpöenergiaa kiinteeseen varastomateriaaliin lähekkäin sijoitettujen porakaivolämmönvaihtimien avulla. Ensimmäisiä porakaivotekniikkaa hyödyntäviä lämpövarastoja maailmassa oli 1980-luvulla Ruotsissa tehdyt projektit, jossa aurinkokeräimillä kerättyä lämpöä ja hukkalämpöä varastoitettiin kesällä käytettäväksi myöhemmin talvella rakennusten lämmittämiseen. Porakaivotekniikan sovelluksia käytettiin sen kehittämisen alussa enimmäkseen lämmitykseen, mutta nykyään ovat yleistyneet pelkät rakennusten viilennykseenkin käytettävät sovellukset. Suurin osa nykyään tehtävistä projekteista ovat kuitenkin yhdistetyt lämmitys ja viilennys sovellukset. Tyypillisimpiä sovelluksia ovat nykyään hyvin eristetyt toimistorakennukset, joissa tarvitaan viilennystä kesäisin niiden sisäisesti tuotaman lämmön takia. Tämä kesäinen hukkalämpö varastoidaan ja käytetään hyödyksi talvella. Tämän kaksoiskäytön takia energiansäästö on melko korkea ja taloudellisesti kannattava. /7, s.95–122, 16, 17/

Tuntuvan lämmön varastointiin tarvitaan teoriassa korkeaa lämpökapasiteettia varastomateriaalilta. Kuitenkin jokaiselle maaperätyypille voidaan huomata keskimääräinen lämpökapasiteetti $4.15 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, joka on noin puolet veden lämpökapasiteetista. Suurimmat vaikutukset tälle arvolle ovat materiaali itsessään, sen irtotiheys ja veden määrä materiaalissa. Jotta saavutettaisiin kunnollinen lämmön johtuminen maaperään ja takaisin maaperästä, on hyvä lämmönjohtavuus toivottavaa. Toisaalta lämmön häviämisen kannalta edullisinta olisi, että lämmönjohtavuus olisi mahdollisimman pieni. Huokoisessa maaperässä korkea pohjavesi voi kasvattaa lämpökapasiteettia, mutta samalla pohjaveden virtaus heikentää porakaivolämpövaraston suorituskykyä huomattavasti konvektion lisätessä lämpöhäviöitä. Siksi paikallinen geologia ja hydrologia ovat tärkeitä projektin kannattavuuden ja toimintaperiaatteen valitsemisen kannalta. /16/



Kuvio 6. Havainnekuva porakaivolämpövarastosta kesällä ja talvella. /18/

Porakaivolämpövarastoissa käytetään maahan kaivettuja porakaivoja, joiden syvyys vaihtelee yleensä 20–300 metriin tyypillisessä sovelluksessa. Lämpöenergia siirretään maaperään monien lähekkäin sijoitettujen porakaivojen sisällä virtaavan lämmönvaihtoväliaineen avulla. Yleensä lämmönvaihtoväliaineena käytetään vettä, johon on sekoitettu glykolia tai alkoholia, jotta järjestelmä pystyy toimimaan jäätymispistettä alemmissa lämpötiloissa. Jokaisessa porakaivossa kulkee U-putki, joka liittyy yhteen pinnalla olevan keskusputkijärjestelmän kanssa. Joskus käytetään tehokkaampaa lämmönvaihtojärjestelmää, niin kutsuttua kaksinkertaista U-putkijärjestelmää. Tätä teknologiaa voidaan käyttää lähes jokaiseen maaperään, saveista kalliioon. Kylmä tai lämpö toimitetaan tai kerätään maaperästä kierrättämällä lämmönvaihtoväliainetta porakaivojen läpi suljetussa järjestelmässä, jolloin lämmönvaihto lämmönvaihtoaineen ja maaperän välillä tapahtuu johtumalla. /7, s. 95–122/

4.3.1 Case Toholampi Suomi

Toholammilla virvoitusjuomayhtiö Finn Spring Oy suunnittelee projektia, jossa tehtaalla muovipulloja tehdessä syntyvä hukkalämpö otetaan talteen ja varastoidaan porakaivotekniikka käyttäen maaperään. Hukkalämmön tukena käytetään myös tehtaalla olevia aurinkokeräimiä. Projektin tarkoituksena on varastoida kesällä syntyvä ylimääräinen lämpöenergia ja käyttää se talvella tehtaan yhteydessä olevien toimistotilojen lämmittämiseen. Noin 60–70 °C lämmintä vettä kierrätetään 50 metriä syvissä porakaivoissa, joita on porattu noin 60 ja ne sijaitsevat halkaisijaltaan

25 metrin kokoisessa ympyrässä 2,7 metrin välein toisistaan. Säilöttävä energian määrä on joitakin MWh. Tehtaan ympäristön maaperä on melko paksua ja sillä on huono lämmönjohtavuus. Alustavien arvioiden mukaan projektin lämmönvarastoinnin hävikki on joitakin kymmeniä prosentteja. Projektin budjetti on noin miljoona euroa. /19/

4.3.2 Päätelmät

Porakaivolämpövarastot on tänä päivänä eniten käytetty maanalaisten lämpövarastojen tekniikka. Isoja porakaivolämpövarastoja käytetään kausittaisina lämpövarastoina. Tyypillisesti varastoitavan lämmön lähteinä käytetään aurinkolämpöä, sekä teollisuudesta saatavaa hukkalämpöä. Ruotsi on yksi johtavimmista maista tässäkin teknologiassa. Kaikista kannattavampia järjestelmiä ovat korkean lämpötilan varastot alhaisen lämpötilan sovellutuksissa, jossa ei tarvita lämpöpumppuja tai muuten lisättyä lämpöä. Tukholmassa Annebergissä sijaitseva aurinkolämpöjärjestelmä on hyvä esimerkki tästä. Tässä tapauksessa noin 1 000 MWh lämpöä varastoidaan kesän aikana ja käytetään talvella 60 omakotitalon lämmittämiseen talvella. Varastoitu lämpö käytetään 32 celsiusasteisena käyttöveden lämmittämiseen ja rakennuksen lämmittämiseen matalan lämpötilan lattialämmityksessä. /7, s. 95–122/

Yleisellä tasolla porakaivolämpövarastot vaativat oikeanlaiset geologiset ja hydrogeologiset olosuhteet ollaksensa kannattavia. Tällaisia ovat esimerkiksi heikosti läpäisevä maa-aines tai kallio, jossa ei ole pohjaveden virtausta. Jotta porakaivojärjestelmä olisi tehokas sen tulisi olla kooltaan vähintään 1000 m³. Porakaivolämpövarastoja käytetään yleensä matalan lämpötilan sovellutuksissa ja yleisimmin varastojen lämpötilat ovat 0–90 °C, sillä alle 0 °C ongelmia saattaa ilmestyä maaperän jäätyminen myötä ja yli 90 °C lämpötiloissa porakaivoissa käytettyjen muovimateriaalien kestävyys saattaa heikentyä. Tällaisissa järjestelmissä tapahtuvat lämpöhäviöt riippuvat kallion ja maaperän ominaisuuksista, käytetystä lämpötilasta, porakaivon geometriasta ja tilavuudesta. Isoimmista porakaivolämpökaivoissa vuotuiset lämpöhäviöt ovat 10–15 % luokkaa. /7, s. 95–122/, /16/

Toholammelle tehtävä projekti on kooltaan (MWh) suhteellisen pieni ja muita samaa teknologiaa käyttäneitä projekteja tutkittaessa on saatu selville, että mitä suurempi kokonaistilavuus porakaivolämpövarastolla on, sitä vähäisemmät ovat ympäristöön johtuvat lämpöhäviöt. Muiden projektien pohjalta voidaankin olettaa, että Toholammella tehtävä lämpövarastoprojekti ei tule olemaan taloudellisesti erityisen kannattava sen oletettujen lämpöhäviöiden ollessa joitakin kymmeniä prosentteja.

On kuitenkin hyvä huomata, että ilman lämpövarastoa prosesseissa syntyvä hukkalämpö olisi mahdotonta käyttää muuten hyödyksi. Näin ollen varastoitava energia voidaan katsoa olevan osittain ilmaista, mikä parantaa projektin kannattavuutta. Myös mahdolliset sähkön hinnan nousut tulisivat nostamaan projektin kannattavuutta. Tärkeimpänä asiana projektissa voidaan pitää erikseen tuotettavan lämmitykseen käytettävän energian tarpeen vähenemistä ja näin tapahtuvia päästöjen vähenemistä. Toholammen projekti onkin pääasiallisesti tutkimusprojekti, jolla pyritään selvittämään varaston, sen maanpäällisen siirtotekniikan ja digitaalisen ohjauksen vaikutussuhteita projektin tuottavuuteen ja kannattavuuteen. Onkin erittäin tärkeää, että tämän kaltaisia pilottihankkeita tehdään, joista voidaan saada jatkossa tärkeää tietoa, kuinka vastaavista projekteista voidaan saada kannattavia tulevaisuudessa.

5 YHTEENVETO

Lämpövarastoja pystytään käyttämään energian kysynnän ja tuotannon välisten vaihtelujen tasaamiseen niin päivittäisten, viikoittaisten tai jopa useampien kuukausien aikaisten tarpeiden suhteen. Tulevaisuuden energiantuotannossa, varsinkin uusiutuvien energianlähteiden yleistyessä, tarvitaan keinoja, joilla pystytään vastaamaan näihin energian kysynnän ja tarjonnan vaihteluihin. Kausittaiset lämpövarastot ovat yksi näistä keinoista. Suunnitteilla olevien ja jo valmistuneiden projektien määrästä, sekä niihin panostetuista raha määrien suuruudesta voidaan päätellä, että kausittaiset lämpövarastot ovat todettu toimiviksi ratkaisuisiksi ja tulevaisuudessa niiden käytön voidaan uskoa yleistyvän entisestään.

Pohjoismaat ovat edelläkävijöitä maanalaisten lämpövarastoteknologioiden käyttämisessä. Osaksi tämä johtuu ilmastollisista olosuhteista, minkä vuodenaikojen vaihtelut tarjoavat, sekä geologisista olosuhteista, jotka ovat suotuisia maanalaisten lämpövarastojen toteuttamiseen. Pohjoismaissa tehdään myös jatkuvaa tutkimus ja kehitystyötä, niin vanhojen teknologioiden, kuin uudempienkin lämpövarastomenetelmien suhteen. Esimerkiksi Suomessa on kehitetty aineseos, joka laboratorio olosuhteissa pystyy varastoimaan suuren määrän energiaa pieneen määrään ainetta /22/. On nähtävissä, että tämänkaltaisia uusia teknologisia oivalluksia tulee tulevaisuudessa syntymään jo vanhojen toimivien teknologioiden rinnalle.

Maanalaisten lämpövarastojen yleistymistä hidastaa eniten niiden geologiset ja hydrogeologiset vaatimukset, joka tarkoittaa sitä, ettei kannattavia projekteja pystytä rakentamaan aivan kaikkialle. Erityisesti pohjavesivarastojen käyttämistä lämpövarastoina hidastaa myös tietämättömyys tästä teknologiasta. Toki juuri näillä varastotyypeillä huomataan olevan myös suurimmat vaatimukset geologisten ja hydrogeologisten olosuhteiden suhteen, mikä vähentää mahdollisuuksia tämän teknologian käyttämisessä. Myös mahdollinen pohjaveden saastuminen ja muut ympäristölle aiheutuvat haitat aiheuttavat usein huolta tässä teknologiassa ja vähentää teknologian yleistymistä. Myös muiden lämpövarastojen teknologioiden mahdolli-

set haitat ympäristölle huolettavat, vaikka suurin osa näistä onkin jo pystytty ratkaisemaan. Jokainen lämpövarastoprojekti vaatii kuitenkin omat ympäristöarvionsa.

Taloudellisesti kannattavin maanalaisista lämpövarastoteknologioista on pohjavesivarastoon perustuvat lämpövarastot. Tämän jälkeen kannattavimpia ovat luolalämpövarastot, sitten kaivantolämpövarastot ja viimeiseksi porakaivolämpövarastot. Käytettävään teknologiaan ja sen kannattavuuteen vaikuttavat kuitenkin monet eri asiat ja näin ollen jokaiselle teknologialle löytyy käyttötarkoituksensa. Tällä hetkellä eniten käytetty maanalaisten lämpövarastojen teknologia maailmanlaajuisesti on porakaivolämpövarastot. Tämä johtuu siitä, että vaikka porakaivolämpövarastojen rakennuskustannukset ja näin ollen varastoitavan energian hinta tilavuusyksikköä kohden, on suurempi kuin muilla tekniikoilla, on se geologisilta ja hydrogeologisilta vaatimuksiltaan paljon pienempi kuin muut maanalaiset lämpövarastoteknologiat ja näin ollen sitä pystytään soveltamaan useampiin olosuhteisiin.

Olemassa ja suunnitteilla olevat lämpövarastoprojektit perustuvat lähes kokonaan tuntuvan lämpöenergian varastoinnin menetelmiin ja niissä eniten käytetty varastomateriaali on vesi, sen ylivoimaisten ominaisuuksien takia. Maanalaiset lämpövarastot tarjoavat taloudellisesti kannattavia ratkaisuja vihreämpään ja ympäristöystävällisempään energiantuotantoon. Maanalaiset lämpöenergiavarastot soveltuvat parhaiten kausittaisiksi energiavarastoiksi ja niiden käytön voidaankin olettaa yleistyvän tulevaisuudessa.

LÄHTEET

/1/ Dincer, I., Rosen, M. 2010. Systems and Applications. 2. painos. Thermal Energy Storage. Ontario, Canada. Wiley.

/2/ Cabeza, L., Martorell, I., Miro, L., Fernandez, A., Barreneche, C. 2015. Introduction to thermal energy storage (TES) systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems. 1-26. Barcelona, Spain. WP.

/3/ Piolichowska, K., Pielichowski, K. 2014. Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. Progress in Materials Science. 67-123. Viitattu 17.10.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642514000358>

/4/ Aydin, D., Casey, S., Riffat, S. 2015. The Latest Advancements on Thermochemical Heat Storage Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 356-367. Viitattu 19.10.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007308>

/5/ Furbo, S. 2015. Using Water for Heat Storage in Thermal Energy Storage (TES) Systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems. 31-45. Barcelona, Spain. WP.

/6/ Galkin-Aalto, M. 2018. Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustamaalle. Viitattu 23.10.2018. https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustik-kamaa_toteutus/

/7/ Sang Lee, K. 2013. Underground Thermal Energy Storage. Seoul, South Korea. Springer.

/8/ Dyrelund, A. World Largest Thermal Heat Storage Pit in Vojens. Viitattu 23.10.2018. <https://stateofgreen.com/en/partners/ramboll/solutions/world-largest-thermal-pit-storage-in-vojens/>

/9/ Dyrelund, A. Large-Scale Solar Water Heating and Seasonal Heat Storage Pit in Gram. Viitattu 23.20.2018. <https://stateofgreen.com/en/partners/ramboll/solutions/large-scale-solar-heating-and-seasonal-heat-storage-pit-in-gram/>

/10/ Dyrelund, A. 2017. Ramboll Projects Among The Most Efficient District Energy Systems In The EU. Viitattu 24.10.2018. <https://ramboll.com/media/rgr/two-ramboll-projects-among-the-eight-most-efficient-district-heating-and-cooling-systems-in-the-eu>

/11/ Novo, A., Bayon, J., Castro-Fresno, D., Rodriguez-Hernandez, J. 2010. Review of Seasonal Heat Storage in Large Basins: Water Tanks and Gravel-Water Pits. Applied Energy. 390-397. Viitattu 31.10.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002694>

/12/ Nordell, B., Snijders, A., Stiles, L. 2015. The Use of Aquifers as Thermal Energy Storage (TES) Systems. *Advantaces in Thermal Energy Storage Systems*. 87-113. Barcelona, Spain. WP.

/13/ Wingstrand, I. The ATES Project – A Sustainable Solution for Stockholm-Arlanda Airport. Viitattu 27.10.2018. https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/55.pdf

/14/ ATES – Aquifer Thermal Energy Storage. Viitattu 27.10.2018. <http://underground-energy.com/our-technology/ates/>

/15/ Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P. 2018. Worldwide Application of Aquifer Thermal Energy Storage – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 861-876. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304933>

/16/ Reuss, M. 2015. The Use of Borehole Thermal Energy Storage (BTES) Systems. *Advantaces in Thermal Energy Storage Systems*. 117-147. Barcelona, Spain. WP.

/17/ Xie, K., Nian, Y., Cheng, W. 2018. Analysis and Optimization of Underground Thermal Energy Storage Using Depleted Oil Wells. *Energy*. 1006-1016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218317250>

/18/ BTES – Borehole Thermal Energy Storage. Viitattu 31.10.2018. <http://underground-energy.com/our-technology/btes/>

/19/ Ämmälä, E. 2018. Kaurapellossa varastoidaan hukkalämpöä. Viitattu 27.10.2018. <http://verkkolehti.geofoorumi.fi/fi/2018/05/25/kaurapellossa-varastoidaan-hukkalampoa/>

/20/ Ylioja, T., Marttinen, V. 2018. Kruunuvuorenrannan luolat täytetään merivedellä, joka lämmittää kolmanneksen alueen asunnoista - ”yksinkertaisuudessaan viisas hanke”. Viitattu 6.11.2018. <https://yle.fi/uutiset/3-10036485>

/21/ Malmberg, L. 2017. Helsingin salainen ase ilmastonmuutosta vastaan on valtava maanalainen järvi – katso miltä veden täyttämä luola näyttää. Viitattu 6.11.2018. <https://www.rakennuslehti.fi/2017/09/helsingin-salainen-ase-ilmastonmuutosta-vastaan-on-valtava-maanalainen-jarvi-katso-milta-veden-tayttama-luola-nayttaa/>

/22/ Rantanen, K. 2018. Kesähelle varastoon talveksi – Aalto-yliopiston tutkijat kehittivät sokerialkoholin, joka voisi pidätellä lämpöenergiaa sisällään jopa vuosia. Viitattu 6.11.2018. <https://www.hs.fi/tiede/art-2000005783160.html>