



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

EINO HURTTILA

# Hiekkalämpövaraston tekniikka ja käyttö

Vatajankoski Oy:n Kankaanpään hiekkalämpövarasto projekti

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN  
TUTKINTO-OHJELMA  
2022

|   |                                     |                              |
|---|-------------------------------------|------------------------------|
| Tekijä<br>Hurttila, Eino  | Julkaisun laji<br>Opinnäytetyö, AMK | Päivämäärä<br>Toukokuu, 2022 |
|   | Sivumäärä<br>41                     | Julkaisun kieli<br>Suomi     |
| Julkaisun nimi<br>Hiekkalämpövaraston tekniikka ja käyttö   |                                     |                              |
| Tutkinto-ohjelma<br>Energia- ja Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma   |                                     |                              |
| Tiivistelmä<br><br><p>Tässä opinnäytetyössä kuvaillaan Kankaanpään Vatajankoski Oy:lle rakennetun hiekkalämpövaraston tekniikkaa ja käyttöä. Työssä arvioitiin hiekan käyttämistä lämmönvarastointiaineena ja käytiin läpi perustelut, joilla hiekka valittiin käytettäväksi aineeksi. Työssä tarkasteltiin myös varaston käyttötarkoitusta ja sen rakentamisen syitä, sekä hiekkalämpövarastotekniikan merkitystä kaukolämpöenergian tuotannon kannalta.</p> <p>Työssä tarkasteltiin hiekkalämpövaraston toimintaa Polar Night Energy Oy:n antamien tietojen perusteella luotujen havainnekuvien avulla. Tarkoituksena oli luoda selkeä kuva hiekkalämpövarastojärjestelmän toiminnasta erilaisissa käyttötilanteissa ja kuvailla järjestelmän komponentit.</p> <p>Kaukolämmöntuotanto on liikkumassa kohti hiilineutraalia tuotantoa. Hiekkalämpövarasto on käytännössä sähkökattila, johon on liitetty hiekkaan perustuva lämmönvarastointijärjestelmä. Tämän tarkoitus on mahdollistaa kaukolämpötehon tuottaminen varastoon, kun sähkönkulutus sekä hinta ovat matalalla ja mahdollistaa varastoidun tehon käyttö, kun hinta ja kysyntä ovat korkealla. Uusiutuvan energian, kuten tuulivoiman tuotanto vaihtelee ympäristöolosuhteiden mukaan. Tuotannon ajankohta voi olla ajanhetkellä, kun sähköverkossa on vähän kulutusta. Hiekkalämpövaraston tavoitteena on muuttaa ylimääräinen teho lämpöenergiaksi, joka on mahdollista varastoida helposti myöhempää käyttöä varten.</p> |                                     |                              |
| Avainsanat<br>kaukolämmitys, hiekka, lämmöntuotanto, varastointi, energia-ala, ympäristöystävällisyys   |                                     |                              |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <p>Author<br/>Hurttila, Eino</p>  | <p>Type of Publication<br/>Bachelor's thesis</p> | <p>Date<br/>May, 2022</p>                   |
|   | <p>Number of pages<br/>41</p>                    | <p>Language of publication:<br/>Finnish</p> |
| <p>Title of publication<br/>Technology and use of sand heat storage</p>   |  |   |
| <p>Degree programme<br/>Energy and Environmental Engineering</p>  |  |   |
| <p>Summary</p> <p>This thesis describes the technology and utilization of a sand heat storage facility built in the city of Kankaanpää for Vatajankoski Oy. The work assessed the use of sand as a heat storage medium and went through the rationale for selecting sand as the usable substance. The work also examined the purpose of the sand heat storage system and the reasons for building the heat storage, as well as the importance of sand heat storage technology for district heating energy production.</p> <p>The work examined the functioning of the sand heat storage facility using illustrative images created based on information provided by Polar Night Energy Oy. The purpose was to create a clear picture of the operation of the sand heat storage system in different operating situations and to describe the components of the system.</p> <p>District heat generation is moving towards carbon-neutral production. A sand heat storage facility is in its core an electrical resistive heater with a sand-based heat storage system connected to it. The purpose of the heat storage is to enable the production of district heating power to the storage when electricity consumption and price are low. This enables the use of stored energy when the electricity consumption and price are high. The production of renewable energy such as wind power varies according to natural circumstances. The time of production may be at a time when there is little energy consumption in the power grid. The goal of sand heat storage is to convert this excess power into thermal energy, which can be easily stored for later use.</p> |  |   |
| <p>Keywords<br/>district heating, sand, production of heat, storage, energy sector, environmental friendliness</p>  |  |   |

## ALKUSANAT

Haluan esittää suuret kiitokseni Vatajankoski Oy:lle ja Polar Night Energy Oy:lle, mahdollisuudesta toteuttaa opinnäytetyö hiekkalämpövarastosta. Lisäksi tahdon erityisesti kiittää Vatajankoski Oy:n tuotantopäällikkö Lauri Hölttää ja Polar Night Energy Oy:n toimitusjohtaja Tommi Erosta, projektipäällikkö Liisa Naskalia sekä johdavaa tiedemiestä Ville Kiviojaa. Suuret kiitokset kuuluvat myös opinnäytetyön toteutusta ohjanneelle Petri Lähteelle Satakunnan ammattikorkeakoulusta. Kiitokset kaikille työn toteutuksessa avustaneille.

# SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| 1 JOHDANTO .....  | 6  |
| 2 TOIMEKSIANTAJA .....  | 7  |
| 2.1 Vatajankoski Oy:n ympäristöystävällisen kaukolämmön projektit ..... | 8  |
| 2.2 Polar Night Energy .....  | 10 |
| 3 JÄRJESTELMÄN TARKOITUS JA HIEKKA LÄMMÖNVARASTOINTI<br>AINEENA .....   | 10 |
| 3.1 Lämpövarastojen yleinen tarkoitus .....                             | 10 |
| 3.2 Hiekkalämpövaraston käyttötarkoitus Vatajankoski Oy:llä.....        | 11 |
| 3.3 Varaston kapasiteetti ero veden ja hiekan välillä. ....             | 12 |
| 3.3.1 Varaston teoreettinen kapasiteetti .....                          | 13 |
| 3.4 Hiekka lämmönvarastointiaineena .....                               | 14 |
| 4 HIEKKALÄMPÖVARASTON TEKNIikka .....                                   | 15 |
| 4.1 Hiekkasiilo ja lämmönsiirtoputket .....                             | 17 |
| 4.1.1 Varastossa käytettävä hiekka .....                                | 17 |
| 4.1.2 Lämmönsiirtoputkisto .....  | 18 |
| 4.2 Varaston sähkövastukset .....                                       | 22 |
| 4.3 Puhallin .....  | 22 |
| 4.4 Kaukolämmön ilma-vesilämmönvaihdin .....                            | 23 |
| 4.5 Automaatio ja hiekkalämpövaraston ohjausjärjestelmä.....            | 24 |
| 4.6 Tekniikka kokonaisuutena .....                                      | 25 |
| 4.7 Hiekkalämpövaraston rakentaminen .....                              | 26 |
| 4.8 Tekniikan kehityksen suunta ja hiekkalämpövaraston tulevaisuus..... | 27 |
| 5 HIEKKALÄMPÖVARASTON TOIMINTA ERI TILANTEISSA.....                     | 28 |
| 5.1 Hiekkalämpövaraston lataus .....                                    | 28 |
| 5.2 Hiekkalämpövaraston purkaminen.....                                 | 30 |
| 5.3 Hiekkalämpövaraston käyttö sähköverkon säätämisessä.....            | 31 |
| 6 MUUT HIEKKALÄMPÖVARASTOT .....  | 33 |
| 6.1 Polar Night Energy Oy:n Tampereen hiekkalämpövarasto .....          | 33 |
| 6.2 ENDURING sähkön varastointijärjestelmä .....                        | 34 |
| 7 YHTEENVETO .....  | 35 |
| LÄHTEET   |    |

## 1 JOHDANTO

Suomessa kaukolämpöä tuotetaan useilla eri tavoilla, joista suurin osa perustuu jonkin polttoaineen polttamiseen kattilalaitoksessa. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi lämmönvarastointijärjestelmään yhdistetty sähkökattilaratkaisu, jossa lämmön tuotannossa ei ole tarvetta polttaa mitään polttoainetta. Ympäristöystävällisyyden merkityksen kasvaessa energiantuotannossa, on tarkasteltava muita ratkaisuja, joilla on mahdollista tuottaa asiakkaiden tarvitsema lämpöenergia mahdollisimman matalilla päästöillä. Sähkökattilalla tuotettu kaukolämpöenergia on käytännössä yhtä ympäristöystävällistä kuin laitoksen käyttämän sähkötehontuotanto. Yhdistämällä sähkökattilajärjestelmään lämpöenergianvarastointijärjestelmä, on tuotantoa mahdollista säätää erillään sen hetkisestä kulutuksesta. Näin lämpötehon tuotantoa on mahdollista optimoida taloudellisemmaksi.

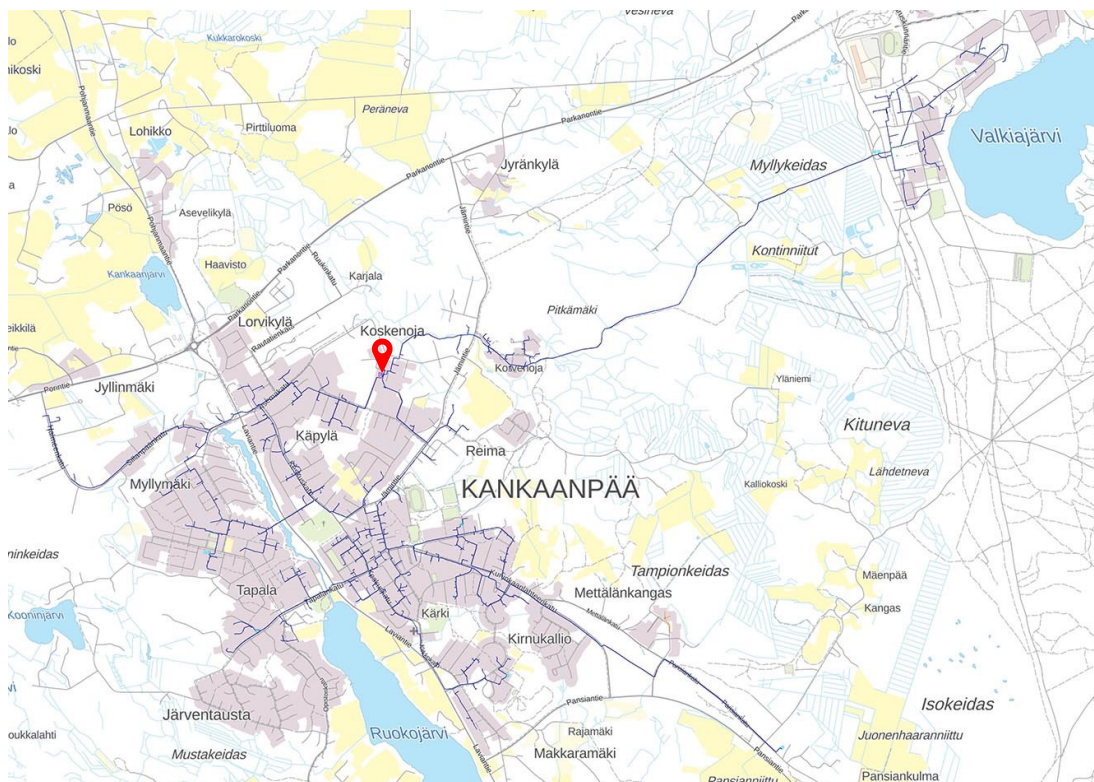


*Kuva 1 Hiekkalämpövarasto sähkötöiden ollessa vielä kesken 17.3.2022 Kuvaaja: Eino Hurttila*

Tässä opinnäytetyössä käyn läpi Vatajankoski Oy:lle rakennettavan kuvassa 1 olevan, Polar Night Energy Oy:n patenttiin perustuvan hiekkalämpövarastoratkaisun tekniikkaa ja toimintaa erilaisissa tilanteissa. Työntoteutuksessa käytetyistä tiedoista suurin on saatu Vatajankoski Oy:ltä sekä Polar Night Energy Oy:ltä. Idea opinnäytetyön aiheesta on peräisin kesältä 2021, jolloin työskentelin projektityöntekijänä Vatajankoski Oy:llä. Työn yhteydessä sain mahdollisuuden tutustua hiekkalämpövarastoprojektiin, joka herätti mielenkiintoni aiheeseen.

## 2 TOIMEKSIANTAJA

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Vatajankoski Oy. Yritys on pääasiassa Kankaanpään, Honkajoen, Karvian, Lavian ja Lassilan alueella toimiva sähkö- ja lämpöverkkoyhtiö. Sähköverkon käyttö- ja tuotantopuolesta vastaa Vatajankosken sähkö Oy, joka on sataprosenttisesti Vatajankosken omituksessa oleva tytäryhtiö. Yrityksen toiminta on karkeasti jaettavissa kolmeen osaan, jotka ovat: sähkön jakelu, kaukolämpöenergian jakelu ja sähkö- sekä kaukolämpöenergian tuotanto. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävä hiekkalämpövarasto kuuluu kaukolämmön tuotannon piiriin. Vatajankoski Oy työllisti 58 henkilöä vuonna 2020, jolloin liikevaihto oli 24,8 miljoonaa euroa (Fonecta Finder, 2022).



Kuva 2 Vatajankosken kaukolämpöverkko vuodelta 2021. Kuva: Vatajankoski.fi

Rakennettu hiekkalämpövarasto kytketään osaksi Vatajankoski Oy:n kaukolämpöverkkoa. Kaukolämpöverkko on kuvan 2 kartassa merkitty sinisellä viivalla. Punaisella karttaneulalla kartassa on merkattuna Vatajankoski Oy:n kiinteän polttoaineen lämpölaitos, jonka laitosalueelle hiekkalämpövarasto on sijoitettu. Samalle alueelle hiekkalämpövaraston viereen on myös sijoitettu datalämmöntuotantoon käytettäviä laskentayksiköitä, joiden tuottamaa kaukolämpöä lisälämmitetään hiekkalämpövarastolla tai KPA-laitoksella. (Hölttä, 2022a)

## 2.1 Vatajankoski Oy:n ympäristöystävällisen kaukolämmön projektit

Vatajankoski yrityksenä pyrkii edistämään ympäristöystävällisen kaukolämpöenergian tuotantoa ja hukkaan menevän energian hyötykäyttöä. Tästä hyvänä esimerkkinä on Pansian hiekkalämpölaitos, datalämpöprojekti ja tässä opinnäytetyössä käsiteltävä hiekkalämpövarastoprojekti. (Vatajankoski, 2021a, Vatajankoski, 2021b ja Vatajankoski, 2022)

Hiekkalämpölaitos on otettu käyttöön maaliskuussa 2021. Laitos toteutettiin yhteistyössä Knauf Oy:n ja Vatajankoski Oy:n kanssa. Hiekkalämpölaitoksella kerätään



talteen Knauf Oy:n kipsilevyn tuotannosta syntyvä lämmin vesihöyry. Vesihöyrystä saadaan lämpöä talteen ja käytettyä hyväksi Kankaanpään kaukolämpöverkossa. Samalla tiivistynyt vesi suodatetaan ja palautetaan tehtaan käyttöön prosessivedeksi. Vesihöyrystä lämpö otetaan talteen käyttäen märkäpesuriteknologiaa. (Vatajankoski, 2021b)

Märkäpesuri tunnetaan myös nimityksellä savukaasupesuri. Märkäpesurissa lämmin höyry lauhdutetaan vastavirtaavalla kiertovedellä, josta lämpöenergia otetaan talteen käyttämällä lämmönvaihdinta. Tyypillisesti savukaasupesuria käytetään pienhiukkas-ten suodattamiseen laitoksen savukaasusta, ruiskuttamalla savukaasun sekaan vettä, mutta tässä tilanteessa pääasiallinen käyttö on lämmöntalteenotto. Tyypillisesti savukaasun pesuvaiheen jälkeen jäähtyneestä kosteasta kaasusta otetaan lämpöenergia talteen, käyttäen yllä mainittua kiertovesijärjestelmällä. Varsinainen vesihöyryn lauhtuminen tapahtuu myöhemmin märkäpesurin tätekappalekerroksissa. (Promaint, 2014)

Datalämmöllä tarkoitetaan laskentayksiköiden tuottaman hukkalämmön talteenottoa ja hyödyntämistä. Tietokoneiden prosessorien jäähtytyksestä syntyy hukkalämpöä, joka datalämpöprojektissa otetaan hyötykäyttöön. Lämpöenergiaa hankkeessa tuotetaan käyttämällä palvelimia, jotka hajautetaan kiinteistöihin, joihin tuotettu lämpöenergia myydään hyötykäyttöön. (Vatajankoski, 2022)

Tyypillisesti palvelimien energiatehokas jäähtyttäminen konesaleissa on tärkeää, jotta palvelimien käyttökustannukset pysyvät mahdollisimman alhaisina. Palvelimia voidaan jäähtyttää monilla eri tavoilla, esimerkiksi ilma- tai vesikiertoisilla jäähdytysratkaisuilla. Usein palvelimien tuottama lämpö ohjataan ulkoilmaan, jolloin se käytännössä menee hukkaan. (Motiva, 2010, s.4–9) Vatajankosken datalämpöprojektissa laskentapalvelimet sijoitetaan kiinteistöön, jossa hukkalämmölle on käyttöä. Hyvänä esimerkkinä tästä on Kankaanpään uimahalliin sijoitetut kahdeksan laskentayksikköä, joiden hukkalämmöllä lämmitetään uimahallin uima-altaiden vettä. (Vatajankoski, 2022)

## 2.2 Polar Night Energy

Kankaanpäähän Vatajankoski Oy:lle rakennettu hiekkalämpövarasto, on toteutettu käyttäen Polar Night Energy Oy:n patentoitua tekniikkaa. PNE on tamperelainen lämpöenergianvarastointijärjestelmiä suunnitteleva yritys, joka käyttää hiekkaa lämpöenergianvarastointiaineena suunnittelemissaan lämpövarastoissa. Yritys on uusi ja tähän mennessä PNE on toteuttanut yhden pilottilaitoksen Tampereen Hiedanrantaan sekä lämpövarastoratkaisun Vatajankoski Oy:lle. Vatajankoski Oy:lle toteutettu laitos on yrityksen ensimmäinen kaupallinen toteutus hiekkalämpövarastosta. (Polar Night Energy, n.d a)

## 3 JÄRJESTELMÄN TARKOITUS JA HIEKKA LÄMMÖNVARASTOINTI AINEENA

### 3.1 Lämpövarastojen yleinen tarkoitus

Kaikessa yksinkertaisuudessa kaikkien lämpövarastojen tarkoitus on mahdollistaa energian tuotannon ja kulutuksen ajankohtien erottaminen toisistaan. Eli mahdollistaa energian tuottaminen aikaisempaan ajankohtana energia kulutukseen nähden. Tyypillisesti varsinkin sähköenergia on hyödynnettävä samalla ajanhetkellä kuin se on tuotettu. Suomessa sähköenergiaa varastoidaan joissakin sähkönjakeluverkoissa olevilla akustoilla, tästä hyvänä esimerkkinä toimii Carunan ja Fortumin kokeilu sähkönvarastoinnista Inkoossa (Palonen, 2021). Tällä hetkellä käytössä on myös kiinteistökohtaisia ratkaisuja erillisinä järjestelminä tai esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien yhteyteen kytkettynä. (Motiva, 2021)

Kun hiekkalämpövarastoa tarkastellaan sähköenergian varastoinnin näkökulmasta, ei voida puhua varsinaisesta sähköenergian varastoinnista. Enemmän kyseessä on sähköenergian muuttaminen varastoitavaan muotoon. Hiekkalämpövaraston sähkövastuksia käyttämällä, voidaan Suomen sähköverkossa olevaa ylimääräistä sähkötehoa käyttää hyödyksi, muuttamalla se lämpötehoksi, joka voidaan varastoida. Tällöin voidaan tuottaa lämpöenergiaa, joka päätyy hyötykäyttöön, vaikka lämmön tarve ei ole

ajankohtaista. Ylimääräisellä sähköteholla tässä yhteydessä tarkoitetaan sähköenergian tuotantotilanteita uusituvillaenergianlähteillä, joita on hankala ennakoida ja hallita. Hetkellisesti voi sähköverkossa esiintyä tilanteita, jolloin uusituvanenergian tuotanto on hyvin suurta verrattuna kulutukseen. Tällaisesta tilanteesta löytyy esimerkki myöhemmin tästä opinnäytetyöstä kappaleessa 5.3, jossa käsitellään varaston käyttämistä sähköverkon säätämiseksi. Sähköenergialla lämmitetään kiertoilmaa lämpövaraston sisällä, jolloin lämpöenergiaksi muutettu sähkö varastoituu hiekkaan. Sähköverkon tilanteen muuttuessa ja sähköenergian kysynnän kasvaessa, voidaan sähkövastusten tehoa laskea tai lämpövaraston lataaminen voidaan lopettaa kokonaan. (Polar Night Energy, n.d b)

### 3.2 Hiekkalämpövaraston käyttötarkoitus Vatajankoski Oy:llä

Kankaanpäähän rakennetun hiekkalämpövaraston vaikutus, säätötehona Suomen sähköverkon mittakaavassa on suhteellisen pieni, koska varaston sähkövastusten yhteenlaskettu teho on maksimissaan 240 kW (Naskali, 2021). Hiekkalämpövaraston käyttötarkoitus on toimia lisälämmönlähteenä datakeskukselta saatavalle kaukolämpövedelle. Varaston lähetyville on sijoitettu Vatajankoski Oy:n omistamia suuren laskentatehon omaavia laskentayksiköitä. Laskentayksiköiden käytöllä tuotettu hukkalämpö otetaan hyötykäyttöön, ohjaamalla se Vatajankoski Oy:n kaukolämpöverkkoon. Laskentayksiköiltä lähtevän veden lämpötila on noin 60 °C, joka ei ole riittävän korkea kaukolämpöverkkoon, johon lähtevän veden lämpötila täytyy vuodenajasta riippuen olla 75–100 °C (Vatajankoski, 2021a). Tätä vettä lisälämmitetään hiekkalämpövaraston lämmönvaihtimella, josta poistuvan veden lämpötilan on noin 80–105 °C astetta. Esilämmitetyn kaukolämpöveden lämpötilan nostamista tavoiteltuun lämpötilaan kutsutaan priimaukseksi (Naskali, 2021). Hiekkalämpövaraston käytöllä tullaan korvaamaan KPA-laitoksen käyttöä. Tulevaisuudessa lämpövarastokapasiteettia on tarkoitus kasvattaa Vatajankoskella, jolloin lämpövarastot muodostavat suuremman osuuden kaukolämpöenergian tuotannosta (Hölttä, 2022a).

### 3.3 Varaston kapasiteetti ero veden ja hiekan välillä.

Tyypillisesti lämmönvarastointi, esimerkiksi kotitalouksissa, on tehty käyttäen vettä lämmönvarastointiaineena. Vettä käytettäessä lämmönvarastointiaineena korkein lämpötila, johon varaston vedenlämpötila voidaan nostaa, ilman vesisäiliön paineistamista, on 100 °C astetta. Kun tätä verrataan hiekkaan, on hiekan ehdottamana etuna se, että sen lämpötila on mahdollista nostaa huomattavasti yli 100 °C asteen lämpötilaan, ilman varaston paineistamista. Hiekkalämpövaraston lämpötila voi olla maksimissaan Polar Night Energy Oy:n patentin mukaan 1200 °C astetta, mutta hiekan suositeltu maksimi lämpötila on 700 °C astetta (Ylönen, M. & Eronen, T. 2019 s. 4–5). Taulukkoa luettaessa on huomioitava, että laskennassa käytettäväksi varaston minimilämpötilaksi on asetettu 20 °C astetta. Tämä ei todellisuudessa olisi mahdollista, koska varaston kaukolämmön vaihtimelta poistuvan veden lämpötila, on kesätilanteessakin oltava vähintään noin 80 °C astetta. Kun varaston lämpötila on matalampi kuin lähtevän kaukolämpöveden lämpötila, vettä voidaan lämmittää vain suoraan sähkövastusten lämmittämän kiertoilman avulla. Hiekasta ei ole tällöin mahdollista siirtää lämpöenergiaa veteen.

Taulukko 1 Varastoitunut lämpöenergia, kun veden maksimi lämpötila on 100°C ja hiekan on 100°C, 286°C ja 500°C

| Lämmön varastointi aine:  | Vesi       | Hiekka T=100 | Hiekka T=286 | Hiekka T=500 |
|---|------------|--------------|--------------|--------------|
| Maksimi lämpötila [°C]:   | 100        | 100          | 286          | 500          |
| Varastoitunut lämpöenergia [kJ] ( $E=c \cdot m \cdot \Delta T$ ): | 16730334,8 | 5040000      | 16758000     | 30240000     |
| Varastoitunut lämpöenergia [kWh]:                                 | 4647,32    | 1400,00      | 4655,00      | 8400,00      |
| Varastoitunut lämpöenergia [MWh]:                                 | 4,65       | 1,40         | 4,66         | 8,40         |
| Aine ominaisuudet:  |            |              |              |              |
| Ominailämpökapasiteetti [c] (kJ/(kg·K):                           | 4,19       | 0,84         | 0,84         | 0,84         |
| Tilavuus [m <sup>3</sup> ):                                       | 50         | 50           | 50           | 50           |
| Massa [kg]:   | 49911,5    | 75000        | 75000        | 75000        |
| Lämpötilan muutos [ΔT]:   | 80         | 80           | 266          | 480          |
| Laskennallinen minimilämpötila [°C]:                              | 20         | 20           | 20           | 20           |
| Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ):                                      | 998,23     | 1500         | 1500         | 1500         |

Taulukossa 1 on laskettu hiekan- ja vedenvarastoima lämpöenergia määrä, kun varaston lämpötila nostetaan maksimissaan 100 °C asteeseen. Valitsin ensimmäiseksi maksimi lämpötilaksi 100 °C astetta, koska tässä lämpötilassa ei vielä vaadita säiliön paineistamista, jotta vesi ei höyrystyisi. Todellisuudessa vettä höyrystyisi jo tässä lämpötilassa, mutta käytän kyseistä lämpötilaa vain hiekan ja veden vertailuun samalla

lämpötilaerolla. Kun veden ja hiekan korkein sallittu lämpötila on sama, niin vesi on ominaislämpökapasiteetiltaan parempi vaihtoehto.

Tilanne muuttuu, kun hiekan lämpötilaa ei rajoiteta 100 °C asteeseen, vaan 500 °C asteeseen, joka on Vatajankoski Oy:lle rakennetun hiekkalämpövaraston maksimilämpötila-alueen matalampi arvo. Hiekkaan varastoidun lämpöenergian määrä 500 °C asteen lämpötilassa on noin 1,8-kertainen, verrattuna veden varastoimaan lämpöenergian määrään 100 °C asteen lämpötilassa. Hiekan lämpötilan on oltava näillä oletuksilla noin 186 °C astetta korkeampi kuin veden lämpötilan, jotta varastojen lämpöenergiakapasiteetit olisivat lähes yhtä suuret. Tämä on mahdollista nähdä taulukosta 1, kun hiekan lämpötila nostetaan 286 °C asteeseen. Tällöin hiekan ja 100 °C asteisen veden varastoimat lämpöenergia määrät ovat lähes yhtä suuret.

### 3.3.1 Varaston teoreettinen kapasiteetti

Taulukko 2 Varastoitunut lämpöenergia todellisella ja teoreettisella hiekan lämpötilalla

| Lämmön varastointi aine:  | Hiekka (todellinen) | Hiekka (teoreettinen) |
|---|---------------------|-----------------------|
| Maksimi lämpötila [°C]:   | 500                 | 1200                  |
| Varastoitunut lämpöenergia [kJ] ( $E=c \cdot m \cdot \Delta T$ ): | 24570000            | 68670000              |
| Varastoitunut lämpöenergia [kWh]:                                 | 6825,00             | 19075,00              |
| Varastoitunut lämpöenergia [MWh]:                                 | 6,83                | 19,08                 |
| Aine ominaisuudet:  |                     |                       |
| Ominaislämpökapasiteetti [c] (kJ/(kg·K):                          | 0,84                | 0,84                  |
| Tilavuus [m <sup>3</sup> ):                                       | 50                  | 50                    |
| Massa [kg]:   | 75000               | 75000                 |
| Lämpötilan muutos [ΔT]:   | 390                 | 1090                  |
| Laskennallinen minimilämpötila [°C]:                              | 110                 | 110                   |
| Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ):                                      | 1500                | 1500                  |

Polar Night Energy Oy:n patentissa mainitaan hiekkalämpövaraston enimmäislämpötilaksi 1200 °C astetta (Ylönen, M. & Eronen, T. 2019 s. 4), joka on kaksinkertainen verrattuna Vatajankoski Oy:lle rakennetun hiekkalämpövaraston 600 °C asteen maksimikäyttölämpötilaan (Vatajankoski, 2021a). Taulukossa 2 on nähtävissä kahden eri maksimilämpötilan vaikutus varastoituun lämpöenergian määrään. Taulukkoa luukiessa on tärkeä huomioida, että taulukossa 2 on varaston minimilämpötilana käytetty

realistisempaa 110 °C asteen lämpötilaa. Taulukon avulla nähdään, että lämpövaraston varastoidun lämpöenergian määrää on mahdollista nostaa huomattavasti, korottamalla lämpövaraston hiekan maksimilämpötilaa. Toinen tapa kasvattaa varastoidun lämpöenergian määrää on nostaa varaston tilavuutta. On myös hyvä huomioida varaston kokoa kasvatettaessa, että hiekkasiilon tilavuus kasvaa nopeammin kuin hiekkasiilon ulkokuoren pinta-ala. Eli kun varaston kokoluokkaa kasvatetaan, niin varaston lämpöhäviöt kasvavat hitaammin kuin varaston lämpöenergiakapasiteetti. Tämä johtuu siitä, että hiekkalämpövaraston lämpöhäviöt ovat pääosin verrannollisia varaston ulkopinta-alaan (Kivioja, 2022).

Taulukossa 2 on tutkittu, kuinka suuri kapasiteettiero on mahdollista saavuttaa, jos varaston kokoa ei kasvateta, mutta käyttölämpötila nostetaan 500 °C asteesta 1200 °C asteeseen. Varaston lämpöenergian määrä nousee noin 2,8-kertaiseksi, joka on yhtä suuri ero kuin jos lasketaan varastojen mahdollisten lämpötilojen muutosten välinen ero  $[(1200\text{ °C}-110\text{ °C}) / (500\text{ °C}-110\text{ °C}) = 2,8]$ . Täten varaston lämpöenergia kapasiteetti kasvaa suoraviivaisesti maksimilämpötilan korotuksen mukaan.

### 3.4 Hiekka lämmönvarastointiaineena

Hiekka on valittu lämmönvarastointiaineeksi sen matalan hinnan, hyvän saatavuuden ja matalan reaktiivisuuden vuoksi. Useilla aineilla on huomattavasti parempi ominaislämpökapasiteetti kuin hiekalla 0,84 kJ/(kg×K), kuten esimerkiksi, 3,582 kJ/(kg×K) litiumilla tai 1,050 kJ/(kg×K) magnesiumilla. Kyseiset aineet ovat huomattavasti kalliimpia ja reaktiivisempia kuin hiekka, joka vaikeuttaa niiden hyödyntämistä tämän tyyppisessä lämmön varastoinnissa (Engineering ToolBox, 2003). Yllä mainittujen materiaalien hintaerot ovat hyvin suuret: seulotun hiekan hinta oli 5,0 €/t alv 0 % (Multalansora, 2022), kun taas litiumin keskimääräinen hinta vuonna 2021 oli 17 000 USD/t (Statista, 2022) ja magnesiumin, hinta raaka-aineen laadusta riippuen, yli 5 000 USD/t. (Shanghai Metals Market, n.d). On tärkeätä myös muistaa, että nämä hinnat vaihtelevat huomattavasti markkinatilanteen mukaisesti, joten nämä ovat vain suuntaa antavia arvoja.

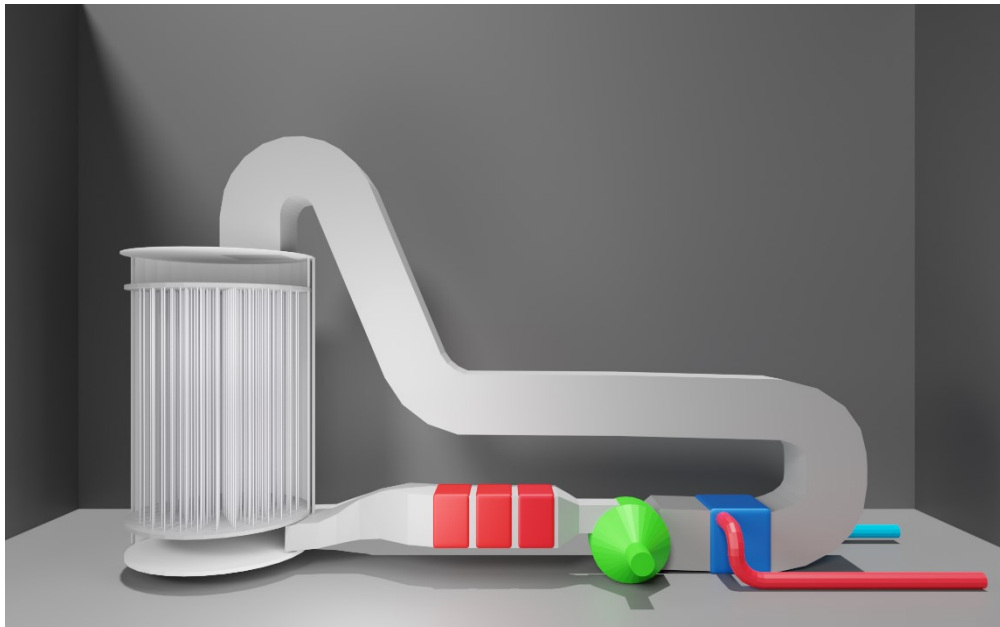
Yksi aiemmin mainittu vaihtoehto lämmönvarastointiaineelle on myös vesi, mutta kun varastoinnissa käytettävä aine höyrystyy alle 600 °C asteessa, muodostuu varastoon painetta. Jotta varastossa voitaisiin käyttää vettä lämmönvarastointiaineena, pitäisi olla paineastia, jotta vesi ei karkaisi varastosta höyrynä. Hiekkaa käytettäessä lämmönvarastointiaineena hiekkasiilon ulkokuoren ei tarvitse olla yhtä vahva kuin paineastian jos, lämmönvarastointiaineena käytettäisiin vettä. Tilanteessa, jossa hiekkasiilo vaurioitui ja ulkokuoreen syntyisi reikä, vain osa varaston sisältämästä hiekasta valuisi ulos. (Eronen, 2021). Näiden tekijöiden takia hiekka on valittu varastossa käytettäväksi lämmönvarastointiaineeksi.

Varastoon talletettua lämpöenergiaa hyötykäytettäessä täytyy lämpöenergia ensin siirtää hiekasta ilmaan, jonka jälkeen lämpöenergia siirretään ilmasta kaukolämpöveden. Jotta näin olisi mahdollista tehdä, täytyy varaston sisälämpötilan olla korkeampi kuin kaukolämpöveden. Käytännössä lämpövaraston sisälämpötila täytyy olla korkeampi kuin 100 °C astetta, koska lähtevän kaukolämpöveden lämpötila lämmönvaihtimelta on talvella 105 °C astetta. Tällöin varaston lämpötila on oltava omalta arvioltani vähintään noin 110 °C, jotta varaston ja lämmönvaihtimen kaukolämpöveden välinen lämpötila ero on riittävän suuri mahdollistaakseen lämmön siirtämisen. Todellisuudessa varaston sisältämän hiekan lämpötilan täytyisi olla todennäköisesti noin 200 °C astetta, jotta lämpöenergiaa voidaan siirtää tehokkaasti. Lämpövarastotekniikan suositteluksi toiminta lämpötila-alueiksi Polar Night Energy Oy:n patentissa on merkattu 200–700 °C astetta ja varaston optimaaliseksi lämpötila alueeksi 300–500 °C astetta. (Ylönen, M. & Eronen, T. 2019 s.5)

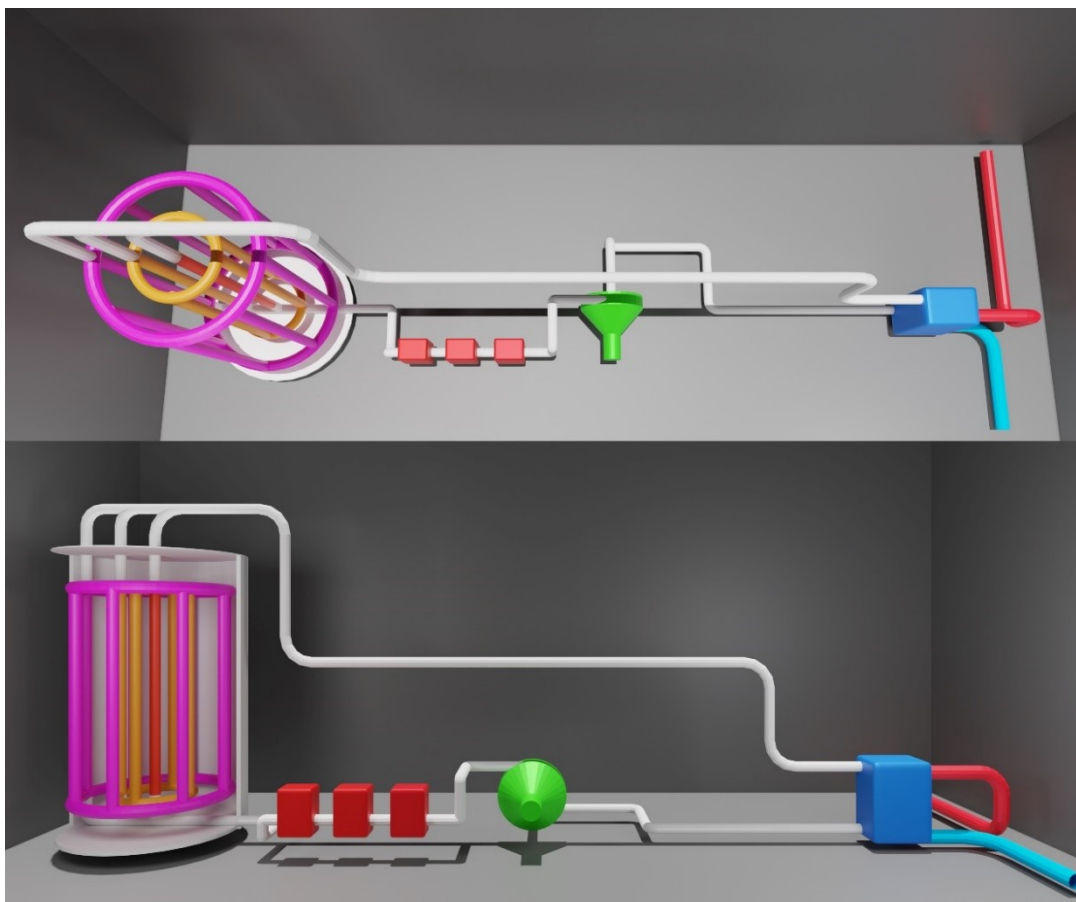
## 4 HIEKKALÄMPÖVARASTON TEKNIikka

Tässä opinnäytetyössä käytetyt kolmiulotteiset mallit, eivät ole lämpövaraston rakentamisessa käytettyjä malleja. Mallien komponentit eivät ole oikeissa mitoissa. Kuvien tarkoituksena on vain selventää varaston toimintaa, mallit on toteutettu käyttäen Polar Night Energy Oy:n antamia tietoja. Kuvassa 3 on kolmiulotteinen malli, jossa

lämpövaraston hiekkasäiliön sisällä olevat putket ovat todellisemmassa mittakaavassa. Varaston osien tarkastelussa on käytetty kuvaa 4, jossa komponentit on selkeämmin eroteltu ja ilmakanava korvattu putkella. Kuvissa ei ole lämpövaraston automaatio- tai ohjauslaitteita.



Kuva 3 Hiekkalämpövaraston malli, jossa hiekkasiilon ulkokuori poikkileikattu.

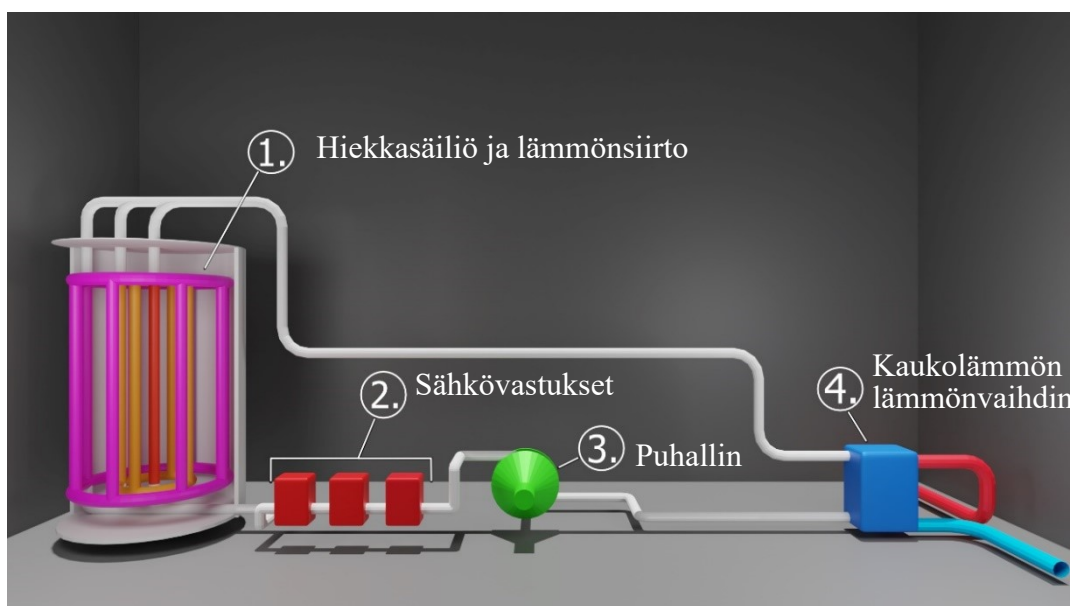


Kuva 4 Yksinkertaistetun mallin sivusta- ja yläviistosta otettu kuva



#### 4.1 Hiekkasiilo ja lämmönsiirtoputket

Lämpövaraston kuvainnollisena sydämenä toimii terässylinteri, jonka sisälle varaston hiekka sijoitetaan. Hiekan lisäksi säiliön sisäpuolelle, hiekan sisälle on sijoitettu lämmönsiirtoputket, jotka kuvan 5 mallissa on jaettu kolmeen erilliseen osaan. Lämpövaraston kapasiteetti määräytyy varaston tilavuuden, varaston lämpötilan, lämpöä varastoivan aineen ominaislämpökapasiteetti ja lämpöä varastoivan aineen tiiveydestä varaston sisällä. Vatajankoski Oy:lle rakennettu lämpövaraston lämpöenergiakapasiteetti on 8 MWh, kun hiekan lämpötila on 500-600°C (Vatajankoski, 2021a). Varsinaisen hiekkasiilon laskennallinen tilavuus on noin 100 m<sup>3</sup>, kun hiekka siilon pohjan halkaisija on 4,2 m ja korkeus 7,2 m. Hiekkasiilon pohja on tasainen ja hiekan alapuolella on ilmatilaa, jossa ilmavirta jakautuu varaston sisällä oleviin lämmönvaihto putkiin. Siilon kansi on kartion mallinen ja hiekan yläpuolelle jää hieman tyhjää ilmatilaa. Näistä johtuen koko siilon sisätilavuus ei ole hiekka täynnä, jolloin todellinen hyötykäytössä oleva tilavuus on lähempänä 90 m<sup>3</sup>. (Hölttä, 2022a)



Kuva 5 kolmiulotteisen mallin sivukuva, jossa komponentit on numeroitu

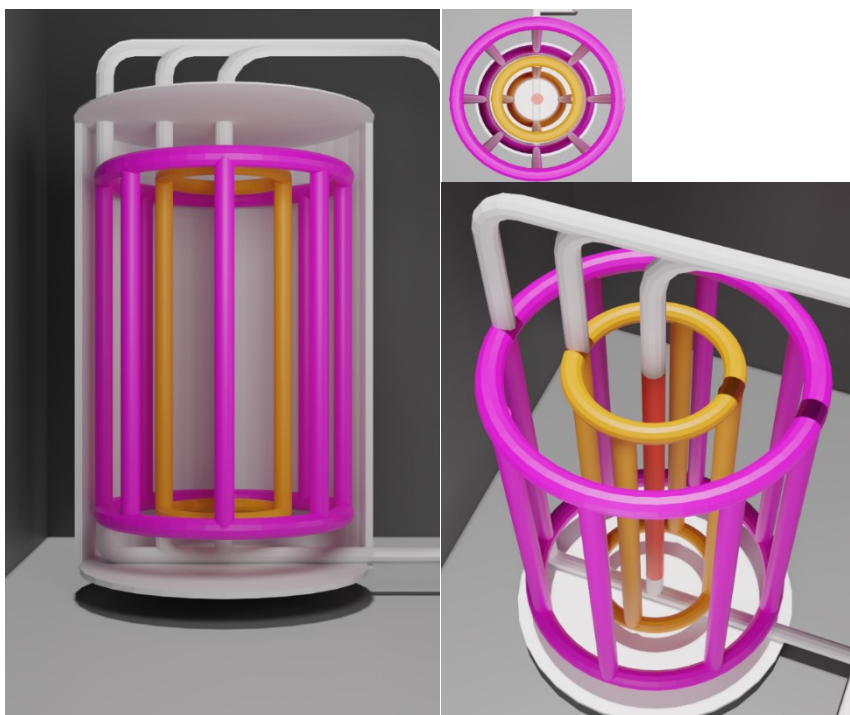
##### 4.1.1 Varastossa käytettävä hiekka

Varastossa käytetyllä hiekalla ei ole mitään erityisiä laatuvaatimuksia, paitsi että hiekka ei saa sisältää huomattavaa määrää palavaa materiaalia ja hiekan on oltava kuivaa. Hiekan kosteus täytyy olla matalalla tasolla, jotta voidaan minimoida vesihöyryn muodostuminen varaston sisälle. Jos hiekka sisältää huomattavan määrän palavaa

ainetta, kuten puiden juuria, tulipaloriski nousee. Kun hiekan lämpötila varaston sisällä nostetaan 500–600 °C asteeseen, niin hiekan sisältämä biomassa palaa. Tällöin on mahdollista, että varaston sisälle muodostuisi herkästi syttyviä pyrolyysi kaasuja (Agricultural Research Service, 2021).

#### 4.1.2 Lämmönsiirtoputkisto

Kokonaiskuvassa 5 numerolla yksi, osoitettu komponentti on varaston hiekkasäiliö, jossa sijaitsee hiekan sisällä asennettu lämmönvaihtoputkisto. Kuvassa 6 mallissa on nähtävissä kolme rinnakkaista lämmönsiirtoputkisto osaa. Kuvissa lämmönvaihtoputkiston, putkien määrä on huomattavasti pienempi ja putkien halkaisija suurempi, kuin todellisuudessa pitäisi olla, kuvien selkeyden vuoksi. Todellisuudessa hiekan sisällä on huomattavasti suurempi lukumäärää pienempiä lämmönvaihtoputkia kuten kuvasta 3 on nähtävissä.

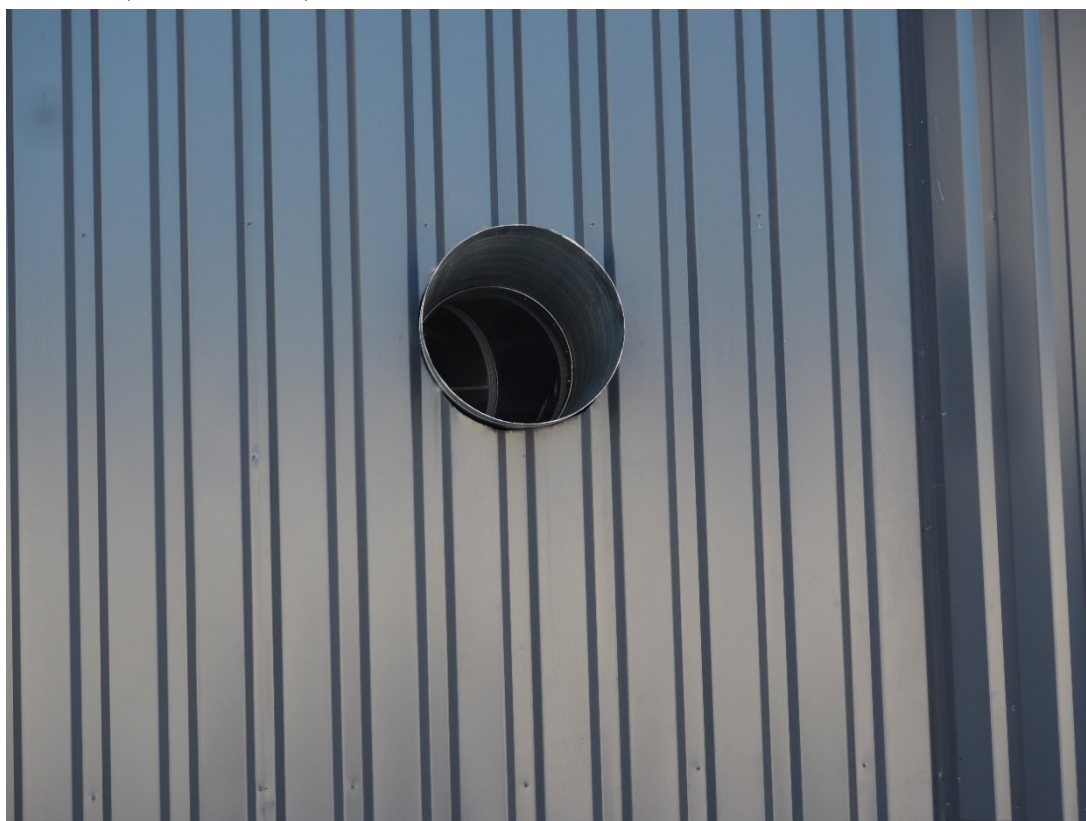


*Kuva 6 Hiekkasäiliön lämmönsiirtoputkisto, kuva sivulta, yläpuolelta ja yläviistosta*

Putkiston sisällä virtaa paineistamatonta ilmaa, joka toimii varastossa lämmönsiirtoväliaineena. Hiekkalämpövarastossa lämmön siirtämiseen olisi mahdollista myös käyttää vettä, mutta varastoon on valittu lämmönsiirtoaineeksi ilma järjestelmän turvallisuus syistä. Tällöin mahdolliset vuodot putkistossa, eivät aiheuta yhtä suurta turvallisuusriskiä, kuin jos putkistossa kiertäisi vettä. Jos putkistossa käytettäisiin vettä lämmönsiirtoaineena, täytyisi putkisto olla jatkuvasti korkeassa paineessa. Veden

paineistaminen olisi ainoa tapa estää veden höyrystyminen. Vaikka putkistoa ei paineistettaisi tarkoituksella, niin veden saavuttaessa hiekkasäiliön sisällä olevat lämmön siirtoputket, höyrystyvä vesi paineistaisi putkiston. Turvallisuusriskin aiheuttaa mahdollinen vuoto putkistossa, mikä voisi aiheuttaa höyryräjähdysten. Tilanteessa, jossa vesi vuotaisi esimerkiksi lämmönsiirtoputkistosta lämpövaraston hiekan sekaan, höyrystyisi vesi räjähdysmäisesti. Vastaavassa tilanteessa, kun käytetään ilmaa lämmönsiirtoväliaineena, suurin riski on tehon menetys vuotavasta ilmasta ja mahdolliset palovammat, jos kuuma ilma vuotaisi varaston ulkopuolelle hallitsemattomasti.

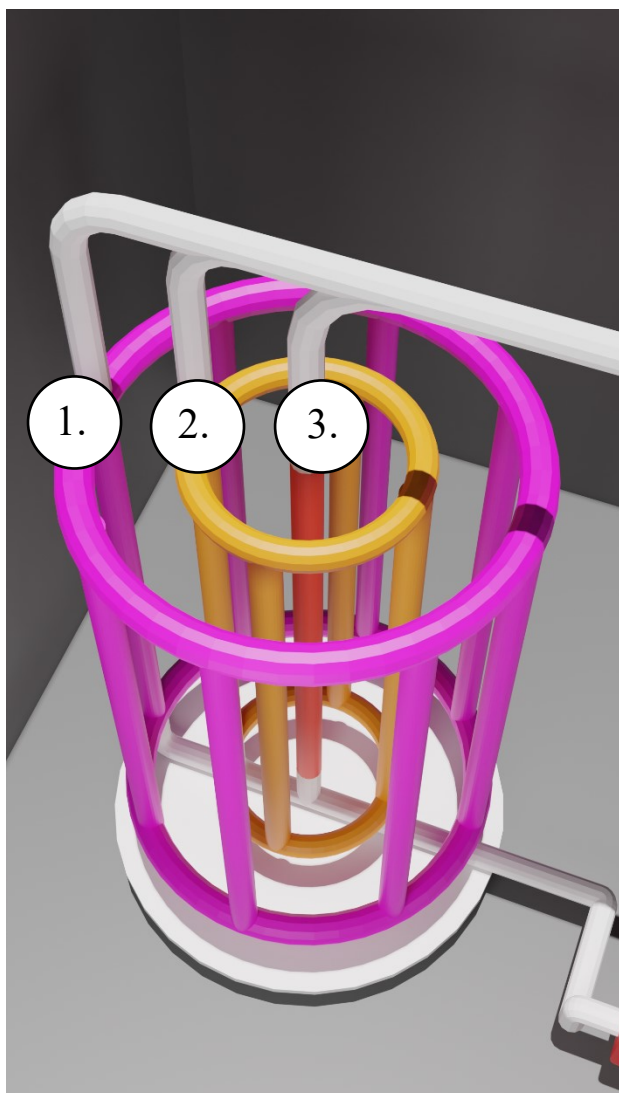
Lämmönsiirtoputkistossa oleva ilma on paineistamatonta ja kun varastoa lämmitetään, ilman lämpölaajenemisesta muodostuva paine vapautetaan ilmakehään. Vastaavassa tilanteessa, kun varastoa jäähdytetään, otetaan tarvittava korvausilma ulkoa, jotta varastoon ei muodostu alipainetta. Kierrossa käytettävä ilma otetaan suoraan ulkoilmasta ja ilmasta suodetaan pois vain suurimmat irtohiukkaset, muuten ilmaa ei käsitellä mitenkään. (Hölttä, 2022a)



*Kuva 7 Lämpövaraston kiertoilman otto- ja poistoputki. Kuva: Eino Hurttila*

Kuva 7 on otettu 17.3.2022 varaston rakentamisvaiheessa. Kuvan putken päähän on tarkoitus asentaa ritilä, jolla estetään esimerkiksi puiden lehtien pääsy putkeen. Kun lämpövaraston kiertoilman lämpötila laskee ja tilavuus pienenee, niin käytetään kuvassa olevaa putkea korvausilman ottamiseen ulkoilmasta.

Lämmönsiirtoputkiston sisällä ilmaa ohjataan saranoitujen peltien avulla, joilla ilmavirtauksen jakaantumista putkistojen sisälle voidaan ohjata. Alla olevassa mallissa on jaettu lämmönsiirtoputkistot kolmeen erilliseen kerrokseen, joihin ilmavirran jakaantumista ohjataan edellä mainituilla pelleillä. Jaetaan tässä lämmönsiirtoputkiston osat kuvassa 8 uloinpaan [1.] (violetti putkisto), keskimmäiseen [2.] (oranssi putkisto) ja sisimpään [3.] (punainen putkiosuus).



Kuva 8 Lämmönsiirtoputkisto

Nämä kolme lämmönsiirtoputkistoa mahdollistavat varastosta otettavan lämpötehon määrän säätämisen lämpötilakerrostumia hyödyntäen. Hiekkalämpövarastoa ladataan lämmittämällä kiertoilmaa sähkövastuksilla. Kuuma kiertoilma puhalletaan lämmönsiirtoputkistoon, johon se ohjataan varaston tilan mukaan. Automaatio ohjaa miten kuuman ilman virtaus jaetaan lämmönsiirtoputkiston eri osiin. Varaston sisimmäisin osa, joka kuvassa 8 on merkattu numerolla kolme, on korkeimmassa lämpötilassa. Tämä johtuu matalimmasta lämpöhäviöstä hiekkalämpövaraston ulkopuolelle ja lämmönsiirtoputkiston lämmittämän hiekan massa on pienin. Lämmitettävän hiekan massan ollessa pienempi, on hiekan lämpötilaa mahdollista nostaa nopeammin, koska tarvittavan energian määrä on matalampi. Vastaavalla tavalla, kuvan 8 kerroksien yksi ja kaksi, hiekka massan kuumentamiseen vaaditaan suurempi määrä lämpöenergiaa, koska lämmitettävän hiekan tilavuus on suurempi sisimpään osaan verrattuna. Lämpötilan kerrostumista voidaan hyödyntää varastosta otettavan lämpötehon säätelyssä esimerkiksi tilanteessa, jossa hetkellinen energian tarve on suuri. Tällöin on mahdollista ottaa suurempi lämpöteho varaston sisimmästä osasta, verrattuna varaston reunaan, sisimmän osan hiekan korkeammasta lämpötilasta johtuen.

On tärkeää huomata, että varaston sisimmäisen kuvan 8 lämmönsiirtoputkiston osan kolme ympärillä olevaa, korkeammassa lämpötilassa olevaa hiekkaa on tilavuudellisesti huomattavasti vähemmän kuin varaston reunalla matalammassa lämpötilassa olevaa hiekkaa. Tämä takia, on vain hetkellisesti mahdollista ottaa varaston sisimmästä osasta korkeampaa lämpötehoa, suhteessa siihen, mikä on mahdollista ottaa varaston reunalta. Varaston hiekan lämpötila laskee varaston ulkopintaa kohden, johtuen suuremmasta lämpöhäviöstä hiekkalämpövaraston ulkopuolelle. Hiekkalämpövaraston uloimmassa kerroksessa hiekan lämpötila on tyypillisesti matalin, mutta osan hiekan määrä on myös suurin, jolloin varastoidun lämpöenergian määrä on myös suurin. Kuvassa 8 numerolla kaksi merkitty keskimäinen lämmönsiirtoputkiston osa, on väli vaihe sisimmän- ja uloimman kerroksen välillä. Lämpötehon kerrostumista on mahdollista myös hyödyntää varaston lataamisessa, jolloin on mahdollista priorisoida varaston keskiosan lämmittämistä. Tällöin varaston keskiosan lämpötila kohoaa nopeammin kuin varaston reuna-alueen. (Eronen, 2021)

## 4.2 Varaston sähkövastukset

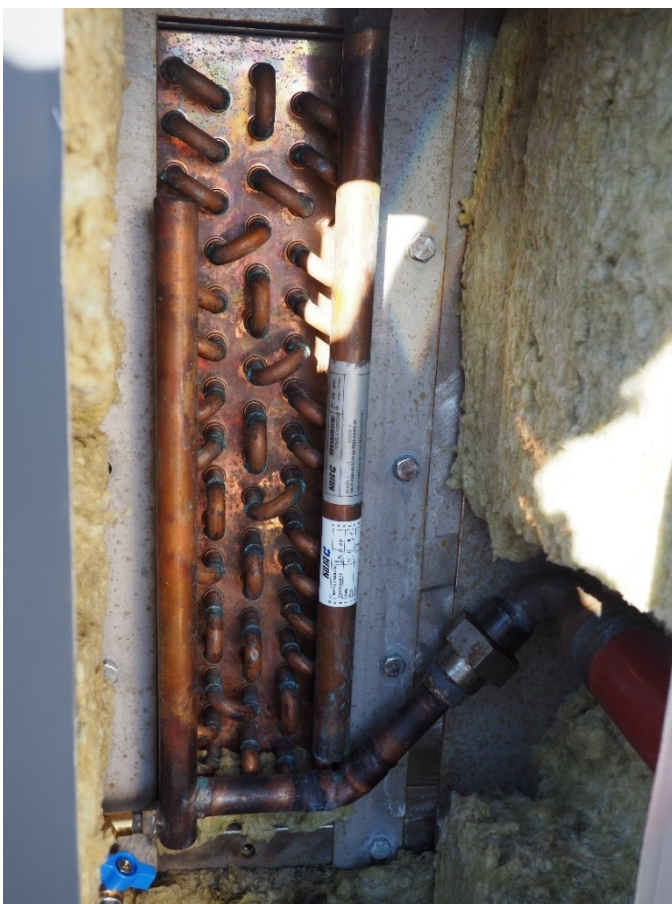
Tässä kyseisessä lämpövarastossa, varaston lämpöteho tuotetaan käyttämällä kolmea identtistä resistiivistä lämmityselementtiä, eli sähkövastusta. Sähkövastukset ovat jokainen teholtaan 80 kW, jolloin varaston yhteen laskettu latausteho on 240 kW. Sähkövastusten tehoa on mahdollista säätää portaattomasti 0–240 kW alueella. Varaston lataustehoa on mahdollista säätää hyvin nopeasti ja joustavasti, jolloin on mahdollista mukauttaa varaston lataustehoa sähköverkon sen hetkisen tilanteen mukaan. (Naskali, 2021)

## 4.3 Puhallin

Varaston lämpöenergianlataamisessa ja -purkamisessa, tärkeässä asemassa on varaston keskipakoispuhallin. Suurin osa lämpövaraston tarvitsemasta käyttötehosta kuluu varaston keskipakoispuhaltimen käyttämiseen. Vatajankoski Oy:lle asennetussa varastossa kiertoilman liikuttaminen on jätetty 15kW puhaltimelle. Keskipaikoispuhallin on yksi hiekkalämpövaraston harvoista liikkuvista osista. Puhallin on sijoitettu ilmansiirtokanavaan, hiekkasiilon ulkopuolelle. Tämä tarkoittaa sitä, että puhallin on mahdollista tarpeen vaatiessa vaihtaa, ilman hiekkasiilon tyhjentämistä. (Naskali, 2021)

#### 4.4 Kaukolämmön ilma-vesilämmönvaihdin

Kun lämpövarastoon talletettua lämpöenergiaa aiotaan hyödyntää kaukolämpöverkon tarpeisiin, siirretään lämpöenergiaa käyttämällä kuvan 9 kaukolämmön ilma-vesilämmönvaihdinta. Lämmönvaihtimella kuumasta kiertoilmasta lämpöenergia siirretään kaukolämpöveteen.



*Kuva 9 Kaukolämpö lämmönvaihtimen reuna, kuvattuna varaston ulkopuolelta. Kuva: Eino Hurttila*

Lämpövarastoa on myös mahdollista käyttää suoraan sähkökattilana. Tällöin sähkövastuksilla kuumennettua kiertoilmaa jäähdytetään lämmönvaihtimella, siirtämällä sen sisältämää lämpöenergiaa suoraan kaukolämpöverkkoon. Varastoa on myös mahdollista ladata ja purkaa saman aikaisesti, jos varastosta otettava lämpöteho on pienempi kuin varaston sähkövastusten tuottama lämpöteho (Eronen, 2021).

#### 4.5 Automaatio ja hiekkalämpövaraston ohjausjärjestelmä

Hiekkalämpövaraston toiminnasta vastaa automaatiojärjestelmä, joka on toteutettu käyttämällä komponentteja, joista suurin osa on hankittu suomalaisten alihankkijoiden toimesta. Alihankkijat vastaavat varaston automaatio- ja sähköasennuksien toteuttamisesta. Myös muut lämpövaraston oheislaitteet hankitaan valmiina komponentteina tai tilataan alihankkijoilta. (Naskali, 2021)

Automaatiojärjestelmä on suunniteltu toimimaan itsenäisesti, ilman jatkuvaa valvontaa käyttöhenkilökunnan puolesta. Järjestelmää ohjataan etäkäytön avulla, niin että lämpövaraston automaatiojärjestelmä hakee itse tiedon halutusta menoveden lämpötilasta tai lämpötehosta. Tämän jälkeen varaston automatiikka huolehtii varaston ohjauksesta. Automaation sisäinen logiikka ohjaa varaston toimintaa niin että varastoa ladataan optimaalisella tavalla, perustuen sähkön hintaennusteeseen ja lämpötehon kulutus ennusteeseen. (Naskali, 2021)

Järjestelmä on rakennettu itse diagnosoivaksi, eli järjestelmä tarkkailee itsenäisesti varaston tilaa ja komponenttien toimintaa. Kun jokin komponentti lakkaa toimimasta odotetulla tavalla, ilmoittaa automaatio järjestelmä tästä käyttöhenkilökunnalle. Lämpövaraston automaatiojärjestelmän laskennallinen käyttöikä on 15 vuotta, jonka jälkeen järjestelmä tulee huoltaa. (Naskali, 2021)

Automaatiojärjestelmän suunnittelussa on otettu huomioon myös varaston mahdollinen käyttö Fingrid Oyj:n valtakunnallisen sähköverkon taajuuden säätämisessä. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että järjestelmään on kytketty tarkka sähköenergiamittari. Tällä on mahdollista todentaa sähköverkon taajuus ja todellinen käytetty vastusteho. Järjestelmään rakennettiin myös lisäosa, joka mahdollistaa reaaliaikaisen kommunikoinnin Fingrid Oyj:n VAKSI- järjestelmän kanssa. (Naskali, 2021) VAKSI-sovellus on järjestelmä, joka mahdollistaa Fingrid Oyj ja reservitoimittajien välisen kaupankäyntitiedonvaihdon hallinnan (Fingrid, n.d a).



#### 4.6 Tekniikka kokonaisuutena

PNE:n lämpövarastotekniikka kokonaisuutena perustuu jo olemassa olevaan teknologiaan. Lämpövaraston toiminta ei pohjaudu tulevaisuuden teknologiaan, vaan markkinoilla olemassa oleviin komponentteihin ja laitteisiin. Jokainen lämpövarasto toteutus suunnitellaan projektikohtaisesti Polar Night Energy Oy:n toimesta. Hiekkälämpövarastot suunnitellaan vastamaan asiakkaan tarpeita parhaalla mahdollisella tavalla. (Polar Night Energy, n.d c)

Lämpövarastojen energiatehokkuuden kannalta on tärkeää, että lämpövaraston lämpöhäviöt pidetään alhaisina. Hiekkälämpövarasto voidaan eristää useilla eri lämmöneristysmateriaaleilla. Vatajankoski Oy:lle Kankaanpäähän rakennettu lämpövarasto on eristetty käyttämällä mineraalivillaa. Tämä on nähtävissä kuvassa 8, jossa mineraalivilla on sijoitettu ilmakehän ja varaston ulkokuoren väliin. Toinen vaihtoehto lämpövaraston eristämiseksi, jota PNE on harkinnut, olisi käyttää lämmöneristysmateriaalina savea (Ylönen, M. & Eronen, T. 2019 s.5). Saven käyttäminen eristeenä on ajankohtaista, kun rakennetaan suuren mittakaavan kausilämpövarastoa, joka sijoitetaan maan alle tai tarkoitukseen soveltuvaan kuoppaan. Tällöin varaston ympärille sijoitettaisiin geomembraani, eli muovikalvo, jolla estettäisiin veden siirtyminen lämpövarastoon, mutta varsinaisena eristeenä toimisi savi ja muu maa-aines (Eronen, 2021).

#### 4.7 Hiekkalämpövaraston rakentaminen

Hiekkalämpövaraston rakentamisprojekti aloitettiin syksyllä 2021 perustusten rakentamisella, valamalla varaston alle tuleva betonilaatta. Varsinainen hiekkasiilo nostettiin paikalleen 10.1.2022, jonka jälkeen aloitettiin ilmakehän rakennustyöt. Järjestelmän sähkötekniiset työt aloitettiin muutaman viikon sisällä tästä. (Hölttä, 2022b) Sähkötekniiset työt jatkuivat edelleen 17.3.2022, kun kuva 10 otettiin. Hiekkalämpövaraston rakentamisen tilanne oli 9.5.2022, että varaston lämpölinjat kytkettiin kuun alussa ja hiekkalämpövaraston sähkötekniiset työt todennäköisesti valmistuvat toukokuun 2022 loppuun mennessä (Hölttä, 2022c).

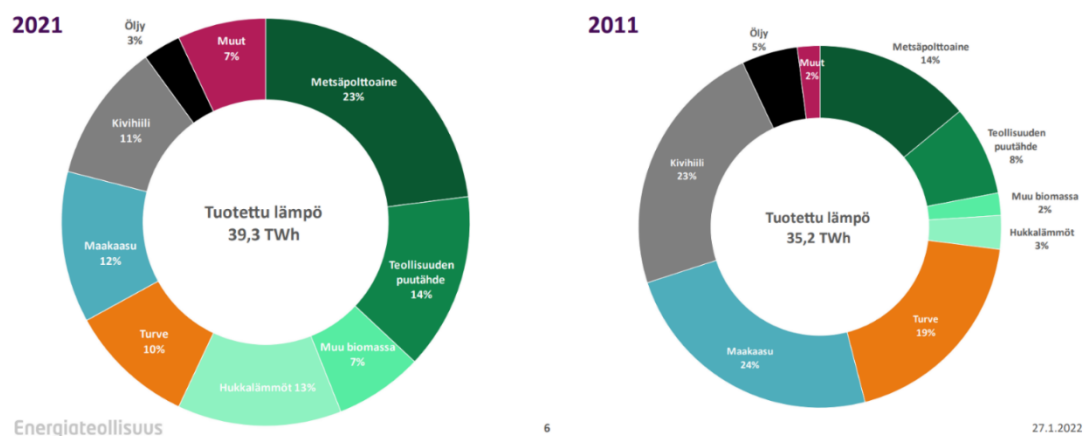


Kuva 10 Hiekkalämpövarasto rakennusvaiheessa 17.3. 2022 Kuva: Eino Hurttila

Projektin rakentaminen viivästy i alkuperäisestä suunnitelmasta, johtuen varaston komponenttien hankintavaiheen sekaannuksista ja saatavuus haasteista sekä varastoon hankitun hiekan liian korkeasta kosteudesta. Odotuksista poiketen hiekka lapiotiin sisälle varastoon manuaalisesti, sen sijaan että hiekka olisi suoraan puhallettu puhallusautolla varaston sisälle. Lämpövarastolle jouduttiin myös rakentamaan oma erillinen muuntamo, jota alkuperäisessä projektisuunnitelmassa ei ollut huomioitu. Tämä osaltaan aiheutti viivettä projektin toteutumisessa. (Hölttä, 2022a)

#### 4.8 Tekniikan kehityksen suunta ja hiekkälämpövaraston tulevaisuus

Kaukolämpöenergiasta suurin osa tuotetaan nykyään polttamalla. Vuonna 2021 vain 13 prosenttia kaukolämmöstä tuotettiin hukkalämmön hyödyntämisellä, mikä nähdään kuvasta 11. Tämä on huomattavasti parempi tilanne kuin kymmenen vuotta sitten, jolloin vain kolme prosenttia tuotetusta kaukolämmöstä oli hyödynnettyä hukkalämpöä. On myös hyvä huomata, että esimerkiksi kivihiilen käyttö on laskenut 23 prosentista, 11 prosenttiin samalla kymmenenvuoden tarkastelujaksolla. (Energiateollisuus ry, 2022) Yrityksenä Polar Night Energy Oy haluaa mahdollistaa myös puun polton lopettamisen kaukolämpöenergia tuotannossa (Eronen, 2021)



Kuva 11 Kaukolämmön tuotantotavat Suomessa. Kuva: Energiateollisuus Kaukolämpövuosi 2021, Dia 6

Haastattellessani Tommi Erosta, Polar Night Energy Oy:n toimitusjohtajaa, tiedustelin yrityksen tulevaisuuden suuntaa ja yrityksen tekniikan etuja. Haastattelun hetkellä tavoitteeksi Tommi Eronen mainitsi yrityksen laajentumisen ja ehkä lisärahoituksen hankkimisen. Yrityksen tekniikan eduksi ja parhaiksi puoliksi mainittiin sen yksinkertaisuus. ”Yksinkertaisuus kiehtoo meidän asiakkaita”, totesi Tommi Eronen

haastattelussa. Samalla kysyin hiekkalämpövaraston mahdollisesta modulaarisesta toteutuksesta, joka mahdollistaisi hiekkalämpövaraston kapasiteetin laajentamisen, moduuleja liittämällä ohjausjärjestelmään. Polar Night Energy Oy on harkinnut ratkaisua, jossa lämpövarasto toteutettaisiin käytettyihin kontteihin, jolloin järjestelmä oli suunniteltu omakotitalo asiakkaille. Konttiin kasattua lämpövarastoa ei koskaan toteutettu, matalan kysynnän takia. Tällä hetkellä PNE keskittyy suurien järjestelmien toimituksiin. (Eronen, 2021.)

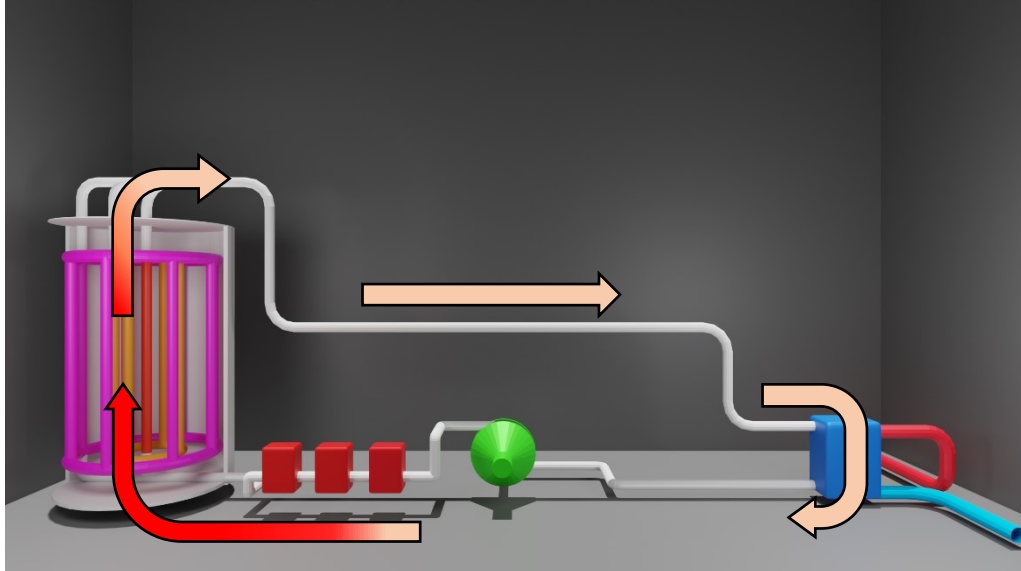
Hiekkalämpövaraston rakentamisessa suurin kustannuserä muodostuu hiekan sisälle sijoitettavista lämmönsiirtoputkista (Eronen, 2021). Kun tarkoituksena on toteuttaa huomattavasti suurempi, kausiluonteiseen lämpötehonvarastointiin suunniteltu ratkaisu, säilyy lämmönsiirtoputkisto todennäköisesti suurimpana kustannuseränä. Kausilämpövarasto, ei välttämättä vaadi suuren varastorakennuksen rakentamista, vaan lämpövarasto ratkaisu on myös mahdollista toteuttaa maan alle. Tulevaisuudessa kun rakennettua lämpövarastoa käytetään aktiivisesti ja lämpövarasto kokee useista lämmitys ja jäähtymiskertoja, on todennäköistä, että varaston sisältämä hiekka rapautuu. Tällöin hiekan tiiveys varaston sisällä nousee samalla, kun varaston hiekka pakkautuu tiukempaan. Varastoon todennäköisesti joudutaan lisäämään hiekkaa myöhemmin, kun hiekan pinta varaston sisällä vajoaa. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että varaston kapasiteetti kasvaa ajan kuluessa hieman. Jatkossa hiekkalämpövaraston kehityksen suuntana on laskea järjestelmän komponenttien hintaa, erityisesti hiekan sisälle asennettavien lämmönsiirtoputkien osalta. (Eronen, 2021)

## 5 HIEKKALÄMPÖVARASTON TOIMINTA ERI TILANTEISSA

### 5.1 Hiekkalämpövaraston lataus

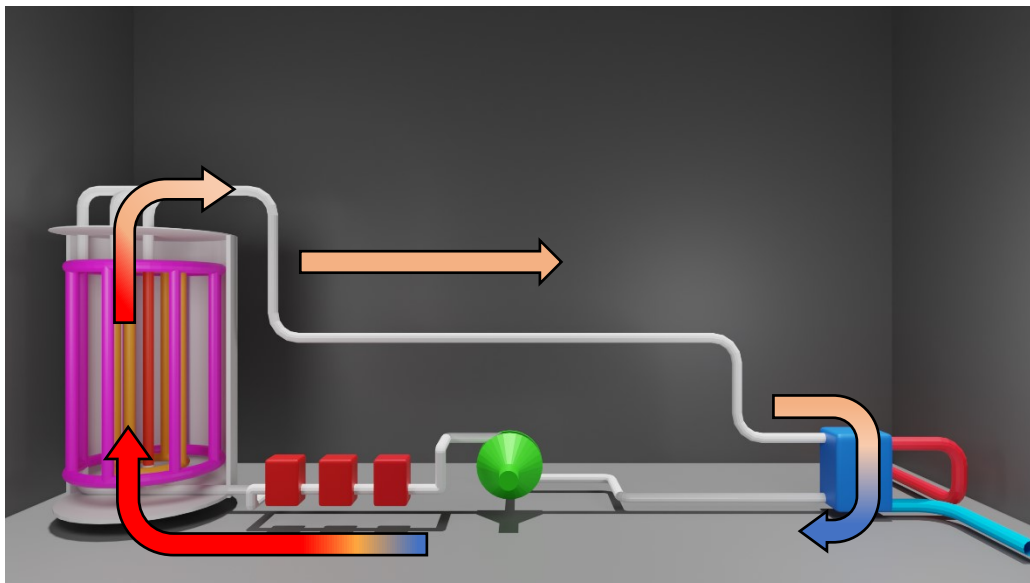
Hiekkalämpövaraston lataamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä lämpöenergian varastointia hiekan massan. Vihreällä värillä kuvassa 12, näkyvän keskipakoispuhaltimen kierrättämää ilmaa kuumennetaan käyttämällä varaston kolmea punaisella värillä kuvassa esitettyä sähkövastusta. Varastoa ladattaessa, sinisellä näkyvällä kaukolämmön

ilma-vesilämmönvaihtimella, ei oteta varastosta lämpöenergiaa, vaan lämmönvaihdin ohitetaan käyttämällä ohivirtauskanavaa. Tällöin kaikki sähkövastusten tuottamasta lämpötehosta siirtyy varastossa kiertävään ilmaan ja sen kautta siilon sisältämään hiekkään.



*Kuva 12 Hiekkalämpövaraston lataaminen*

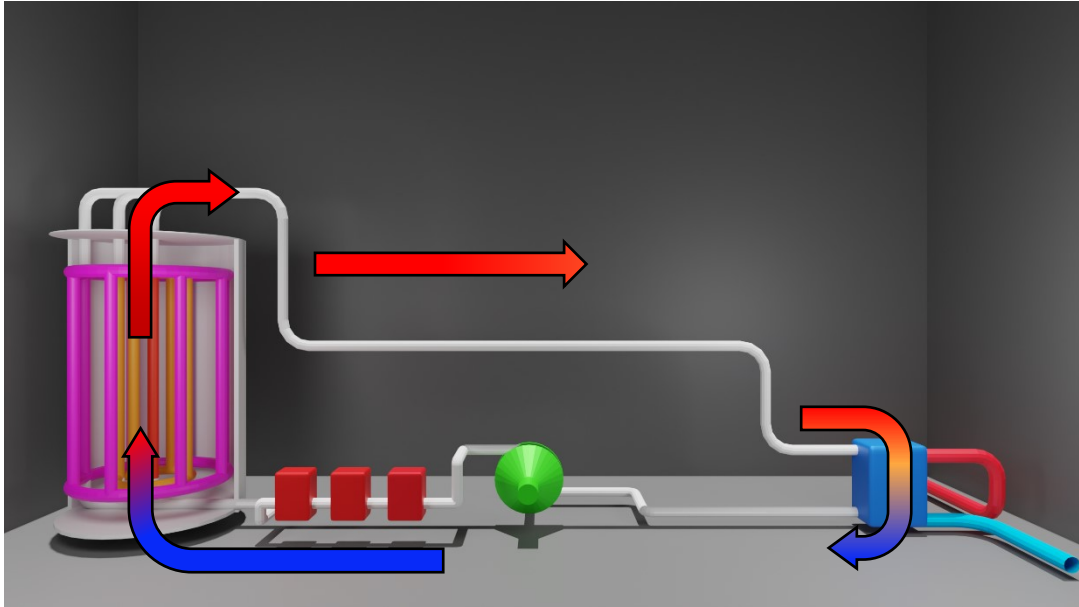
Kuvassa 13 on esitetty vaihtoehtoinen lataus tilanne, jossa kaukolämmön ilma-vesilämmönvaihdin on käytössä, jolloin osa varaston lataustehosta kuluu myös kaukolämpöveden lämmittämiseen. Tässä tilanteessa hiekkalämpövaraston purku- ja lataustehoa säädellään sähkövastusten sekä puhaltimen avulla. Jos kaukolämpötehon tarve lämmönvaihtimella, mukaan lukien varaston lämpöhäviöt, on pienempi kuin vastusten yhteenlaskettu teho 240 kW, on tällöin varastoa mahdollista ladata saman aikaisesti kaukolämpöveden kuumentamisen kanssa.



Kuva 13 Hiekkalämpövaraston lataus, toinen tilanne

## 5.2 Hiekkalämpövaraston purkaminen

Kun hiekkalämpövaraston sisällä on lämmitetty noin 500–600 °C asteeseen, ei varastoa lämmitetä enempää. Jos kiertoilmapuhallin pysäytetään, ei lämpöenergiaa poisteta varastosta, paitsi lämpöhäviöiden muodossa. Lämpöenergian purkaminen varastosta kaukolämpöverkoston käyttöön, tapahtuu käynnistämällä kiertoilmapuhallin ja ohjaamalla kuumaa kiertoilmaa ilma-vesilämmönvaihtimeen. Puhaltimen kierrättämä ilma kuumenee hiekkasäiliön sisällä olevissa lämmönsiirtoputkissa ja jäähtyy ilma-vesilämmönvaihtimella. Täten luovuttaen lämpöenergiaa kaukolämpöveteen, kuten kuvassa 14 on esitetty. Lämpöenergian purkamista hiekkalämpövarastosta on mahdollista säädellä muuttamalla ilmankiirtoreittiä hiekkasäiliön sisällä, käyttämällä ilmakanavassa olevia peltejä venttiileinä. Näillä on mahdollista valita mistä lämmönsiirtoputkiston osista lämpöenergiaa otetaan.



*Kuva 14 Lämpöenergian purkaminen hiekkalämpövarastosta*

### 5.3 Hiekkalämpövaraston käyttö sähköverkon säätämisessä.

Sähkövastustentehon nopea ja helppo säädettävyys mahdollistaa hiekkalämpövaraston hyödyntämisen sähköverkossa säätötehonä. Tämä on mahdollista säätämällä varaston sähkötehon kulutusta sähköverkon tilanteen mukaan. Suomessa säätövoiman tarve kasvaa tulevaisuudessa, kun uusiutuvan energian kuten tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotanto kasvaa (Energiateollisuus, n.d b ). Samalla osaa sähköntuotantotavoista ei ole kannattavaa säätää. Ydinvoimaloita ajetaan Suomessa käytännössä aina täydellä teholla, jos laitokset eivät ole huollossa. Perusvoimana toimivaa ydinvoimaa on taloudellisesti kannattavampaa ajaa jatkuvasti täydellä teholla. (Hanhikivi1, 2018) Hiekkalämpövarastojen on tarkoitus olla tulevaisuudessa osa ratkaisua kasvavaan säätövoiman tarpeeseen.

Hiekkalämpövarastoiden käyttäminen sähköverkon säätämisessä, on periaatteessa mahdollista jo Vatajankoski Oy:lle rakennetun hiekkalämpövaraston avulla. Rakennetun hiekkalämpövaraston suhteellisen pienen kokoluokan vuoksi todellinen säätövaikutus Suomen sähköverkkoon on pieni. Jos tulevaisuudessa rakennetaan hiekkalämpövarastoja huomattavasti lisää ja varastojen kokonaislatausteho nousee merkittävään kokoluokkaan, niin lämpövarastojen todellinen säätövaikutus muuttuu merkittävämmäksi. Vatajankoski Oy:lle rakennettavan hiekkalämpövaraston latausteho on,

suhteellisen matala 240 kW. Tämä voidaan huomata verrattaessa koko Suomen sähköverkon kuluttamaan tehoon, joka esimerkiksi 23.02.2022 klo 19.13 oli 12 239 MW (Fingrid, n.d b). Tässä tilanteessa hiekkalämpövaraston vastusten osuus koko tehosta olisi noin 0,00002 %.

On myös huomioitava, että lämpövaraston käyttö säätövoimana on käänteistä verrattuna esimerkiksi vesivoimaan. Käytettäessä hiekkalämpövarastoa säätövoimana, tehon tarpeen sähköverkossa noustessa, lasketaan hiekkalämpövaraston vastusten käyttämää lataustehoa. Vastaavassa tilanteessa vesivoiman tuotantoa nostettaisiin, jolloin saavutettaisiin sama vaikutus sähköverkossa. Hiekkalämpövarastolla voidaan hyödyntää sähköverkossa esiintyvää ylimääräistä sähkötehoa. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun tuulivoimalla saadaan erittäin hyvä tuotanto, sähköverkon tehontarpeen ollessa matalalla. Tällainen tilanne oli esimerkiksi 4.-5.4.2021 yöllä, jolloin sähkönpörssihinta oli negatiivinen (Harjumaa & Kokkonen, 5.4.2021). Aamuyöllä 5.5.2021 klo 02:00-03:00 sähkön hinta Suomessa oli -1,41 €/MWh (Nordpool, 2021).

Kankaanpään rakennettua hiekkalämpövarastoa on tarkoitus käyttää sähköverkon taajuuden säätämiseksi, jos varastoa on mahdollista ohjata riittävän nopeasti. Suomessa sähköverkon taajuus on 50 Hz, jossa sallittu vaihtelu väli on 49,9–50,1 Hz välillä (Fingrid, n.d c). Sähköverkon taajuuteen vaikuttaa sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapaino, kun tuotanto ja kulutus ovat täysin tasapainossa, on sähköverkoston taajuus tarkalleen 50 Hz.

Tilanteessa, jossa sähköverkon tehon kulutus on suurempi kuin sähkötehon tuotanto, alkaa sähköverkon taajuus laskemaan. Tällöin sähkön tuotantotehoa täytyy lisätä, tai kulutusta vähentää. Tyypillisesti ongelma ratkaistaan lisäämällä sähköntuotanto tehoa. Hiekkalämpövarastoa käytettäessä sähköverkostaajuuden hallinnassa, vähennetään varaston sähkövastusten tehon kulutusta tilanteessa, jossa sähköverkon taajuus laskee alle 50 Hz. Tilanteessa, jossa sähköverkon taajuus ylittää 50 Hz, lisätään sähkövastusten kuluttaman tehon määrää, jolloin sähköverkon taajuus laskee. (Hölttä, 2022a).

Fingrid Oyj:n on tarkoitus kokeilla hiekkalämpövaraston todellinen säätönopeus ja arvioida varaston hyödyntämistä sähköverkon taajuuden säätämiseksi. Jos koekäytössä havaitaan, että hiekkalämpövaraston sähkövastusten tehoa on todellisuudessa



mahdollista hallita riittävän matalalla viiveellä, on hiekkalämpövarastoa tarkoitus hyödyntää myös tässä käyttötarkoituksessa. (Höltkä, 2022a) Varastolla on tarkoitus osallistua Fingrid Oyj:n taajuudensäätömarkkinoille FCR-N- tuotteella (Naskali, 2021). FCR-N-tuotteella tarkoitetaan taajuusohjattua pätötehoreserviä [Frequency Containment Reserve for Normal operation], joka toimii automaattisesti sähköverkon taajuuden muutoksien perusteella (Fingrid, n.d d).

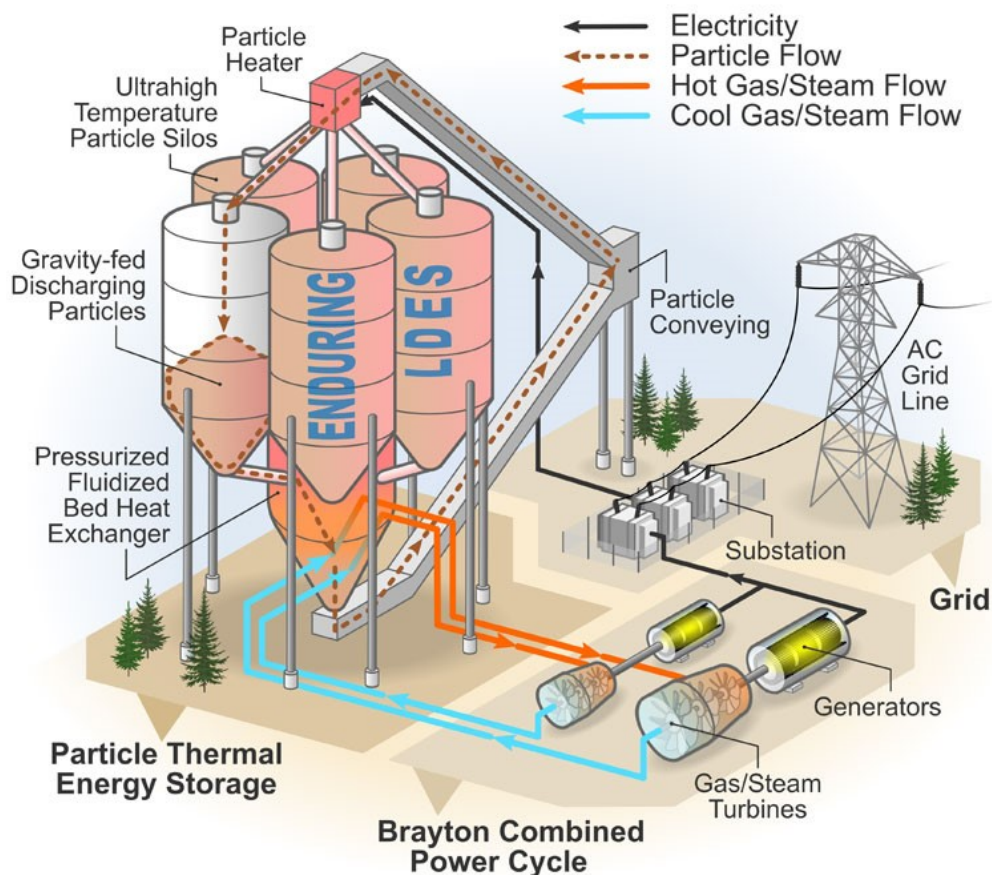
## 6 MUUT HIEKKALÄMPÖVARASTOT

### 6.1 Polar Night Energy Oy:n Tampereen hiekkalämpövarasto

Tampereella vuodesta 2020 asti toiminnassa ollut pilottilaitos, jolla on tuotettu kaukolämpö muutamaan rakennukseen Hiedanrannan alueella. Kyseinen toteutus on pienemmän mittakaavan hiekkalämpövarasto, jossa lämmitettävän hiekan massa on 40 tonnia. Tämä on huomattavasti pienempi kuin Vatajankoski Oy:lle toteutettu 90 tonnin järjestelmä. (Ketonen, 2021) Laitoksessa käytetään samaa teknologiaa kuin Kankaanpään rakennetussa hiekkalämpövarastossa. Pilottilaitoksen avulla Polar Night Energy Oy on kerännyt tietoa hiekkalämpövaraston toiminnasta ja kehittänyt varaston ohjaus ja hallinta järjestelmiä.

## 6.2 ENDURING sähkön varastointijärjestelmä

Yhdysvaltojen National Renewable Energy Laboratory:n [NREL] kehittämä ENDURING energian varastointi järjestelmä, on toinen esimerkki hiekan hyödyntämisestä energian varastoinnissa. Kyseisessä järjestelmässä sähköenergialla lämmitetään hiekkaa, jonka avulla voidaan myöhemmin höyrystää vettä, höyryturbiineja varten. Projektissa on tarkoitus varastoida sähköä lämpöenergiana, joka voidaan tarpeen vaatiessa muuttaa takaisin sähköenergiaksi. Kuva 15 on havainnekuva, jossa on esitettyä järjestelmän toiminta (NREL, 2021)



Kuva 15 ENDURING energiavarasto. Kuva: Patrick Davenport ja AI Hicks, NREL

Järjestelmässä kuumennetaan piihiekkää käyttämällä sähköverkkoon kytkettyjä vasuksia, 1200 °C asteen lämpötilaan. Kuumennuksen jälkeen se putoaa painovoiman vaikutuksesta eristettyihin siloihin. Siloista hiekka ohjataan ilmapetilämmön-vaihtimeen, jossa hiekan lämpöenergialla höyrystetään vettä. Höyryllä pyöritetään turbiineja, joihin on liitetty generaattorit. Järjestelmällä ei tuoteta kaukolämpöä, laitoksella tuotetaan vain sähköenergiaa takaisin sähköverkon käyttöön. Laitoksen hiekanlämmitys järjestelmä ja lämmönvaihdin ovat prototyyppi vaiheessa. (NREL, 2021)

## 7 YHTEENVETO

Tulevaisuuden suunta kaukolämmön tuotannossa on kohti vähäpäästöisempiä lämmöntuotantoratkaisuja (Energiateollisuus ry, n.d a). Tämä on mahdollista huomata Energiateollisuus ry:n tilastoista, joissa kivihiilen, turpeen ja maakaasun käyttö on vähentynyt kaukolämmön tuotannossa. Kun vertaa vuosia 2011 ja 2021 niin hukkalämmön osuus kaukolämmön tuotannosta on kasvanut kymmenen vuoden aikana kymmenen prosenttia (Energiateollisuus ry, 2022).

Tulevaisuuden kaukolämmöntuotantoa pohdittaessa on myös hyvä huomioida, että Valtioneuvoston selvityksen mukaan kaukolämmön kulutus laskee yli 30 % nykytasosta vuoteen 2050 mennessä. Kaukolämmöntehon kulutuksen aleneminen johtuisi energiatehokkuuden parantumisesta ja kilpailukykyisen hiilineutraalin kaukolämmön tuotannon rajallisuudesta (Koljonen ym., 2021. s.21). Verrattuna vuonna 2021 tuotettuun 39,3 TWh kaukolämpötehon, 30 % lasku tehontarpeessa tarkoittaisi noin 11,8 TWh vähennystä. Olettaessa, että hukkalämmön tuotanto säilyy entisellään noin 5,1 TWh tasolla, jäljelle jää noin 22,4 TWh osuus, joka on tuotettava mahdollisimman ympäristöystävällisesti ja kustannustehokkaasti.

Hukkalämmön hyödyntämisen lisäämisen rinnalle hiilineutraalin kaukolämmön tuottamiseen yksi vaihtoehto on esimerkiksi sähkökattilalaitokset. Sähkökattilalaitoksen tuottaman lämpötehon ympäristöystävällisyyteen vaikuttaa laitoksessa käytetyn sähköenergian tuotantotapa. Kun käytetty sähköteho on tuotettu esimerkiksi aurinkopaneeleilla, voidaan sähkökattilalaitoksella tuotettua kaukolämpöenergiaa kutsua uusituksi. Vatajankoski Oy:lle rakennettu hiekkalämpövarasto on toimintaperiaatteeltaan sähkökattilalaitos, jossa lämpötehonvarastointi mahdollistaa tuotannon kannattavuuden optimointia. Hiekkalämpövarastojärjestelmän suuri etu on mahdollisuus tuottaa lämpötehoa varastoon, kun sähkötehoa on saatavilla edullisemmalla hinnalla. Jos tulevaisuudessa hiekkalämpövarastoja rakennetaan kausiluonteiseen lämmönvarastointiin, on tällöin esimerkiksi mahdollista tuottaa kesäkauden aikana lämpötehoa varastoon, talvea varten, kun energian kulutus on vähäisempi.

Hiekkalämpövaraston toisena etuna on järjestelmän mahdollinen hyödyntäminen sähköverkon taajuuden hallinnassa. Vatajankoski Oy:lle rakennetun hiekkalämpövaraston on vielä suoriuduttava hyväksyttävästi Fingrid Oyj:n suorituskykykokeista. Vastatämän jälkeen hiekkalämpövarastoa on mahdollista hyödyntää myös taajuudensäätömarkkinoilla. Hiekkalämpövaraston käyttö sähköverkon taajuuden hallinnassa tapahtuisi lisäämällä tai vähentämällä järjestelmän sähkövastusten tehonkulutusta.

Tärkein tekijä hiekkalämpövarastoiden tulevaisuudelle on, kuinka kannattava hiekkalämpövarastojärjestelmä on todellisuudessa rakentaa. Järjestelmän ehdottomana etuna on sen yksinkertaisuus, joka vähentää sen rakentamiskustannuksia. Kaikki järjestelmän osat on mahdollista ostaa valmiina komponentteina, tai valmistaa paikallisella metallipajalla. Tästä syystä hiekkalämpövaraston toteuttaminen on mahdollista yleisesti saatavissa olevilla komponenteilla ja materiaaleilla, mikä osaltaan laskee järjestelmän hintaa.

Tulevaisuudessa hiekkalämpövarastojärjestelmän kannattavuus tulee todennäköisesti paranemaan ainakin kolmen tekijän takia. Ensimmäinen on Polar Night Energy Oy:n jatkuva järjestelmän kehitystyö, jolla on tavoitteena madaltaa ja optimoida järjestelmän investointikustannuksia. Jos Polar Night Energy Oy onnistuu laskemaan lämmönvaihtoputkiston hintaa, on tällä suuri merkitys varsinkin suuremman mittakaavan lämpövarastoiden toteuttamisessa. Toinen merkittävä tekijä on päästöoikeuksien ja polttoaineiden jatkuva hinnan kasvu, jolloin polttamalla tuotetun lämpöenergian hinta nousee entisestään. Kun polttamalla tuotetun kaukolämpöenergian hinta nousee tulevaisuudessa, nousee hiekkalämpövarastojärjestelmän verrannollinen kannattavuus ja kilpailukyky.

Kolmas huomion arvoinen tekijä järjestelmän tulevaisuuden kannattavuudelle on sähköhinnan suurempi vaihtelevuus tulevaisuudessa. Tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotannon lisääntyessä, myös sähköhinnan vaihtelu lisääntyy. Yhdistettynä edellä mainittuun polttoaineiden hintojen nousemiseen on todennäköistä, että sähköhinnan vaihteluväli kasvaa tulevaisuudessa. Tällöin halpaa sähkötehoa on saatavilla useammin ja tilanteissa, joissa tuulivoiman sekä aurinkovoiman tuotanto on vähäistä, nousee sähköhinta korkeammalle. Sähköhinnan vaihteluvälin lisääntyessä, on mahdollista

ladata varastoa halvemmallalla sähköteholla useammin ja samalla myydä lämpötehoa korkeammalla hinnalla, kun sähköteho on kalliimpaa.

Liikkuvia osia on järjestelmässä suhteellisin vähän ja merkittävimmät kuluvat osat, ovat keskipakoispuhallin ja ilmakehän ohjauspeltien hallintalaitteet. Automaatio järjestelmän käyttöikä on 15 vuotta, jonka jälkeen se täytyy huoltaa. Saman aikaisesti on myös todennäköisesti järkevää uusaa järjestelmän keskipakoispuhallin. Nämä huolto ja muut järjestelmän elinkaaren aikaiset toimenpiteet vaikuttavat myös järjestelmän kannattavuuteen merkittävästi, mutta niiden todellista vaikutusta on vielä hankala arvioida. Hiekkalämpövaraston lopullinen kannattavuus selviää, kun järjestelmän toiminnasta on ehditty keräämään riittävä määrä tietoa. Hiekkalämpövarastoratkaisuilla on nähdäkseni huomattavasti potentiaalia, olla osa Suomen kaukolämpö energiantuotantoa.

## LÄHTEET

Agricultural Research Service. (10.9.2021). What Is Pyrolysis?

<https://www.ars.usda.gov/northeast-area/wyndmoor-pa/eastern-regional-research-center/docs/biomass-pyrolysis-research-1/what-is-pyrolysis/>

Energiateollisuus ry. (27.1.2022). Energiavuosi 2021 – Kaukolämpö [PowerPoint-diat] [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi\\_2021\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2021_-_kaukolampo.html#material-view)

Energiateollisuus ry. (n.d a). Kaukolämmön tuotanto. Haettu 28.4.2022 osoitteesta [https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolammon\\_tuotanto](https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto)

Energiateollisuus ry. (n.d b). Säättövoima – säädettävää sähköntuotantoa Haettu 25.5.2022 osoitteesta <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima>

Engineering ToolBox. (2003). Specific Heat of common Substances. [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html)

Eronen, T. (30.11.2021). Polar Night Energy:n toimitusjohtajan Tommi Erosen Microsoft Teams haastattelu

Fingrid (n.d a) Vaksi. Haettu 3.5.2022 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto/vaksi/>

Fingrid (n.d b) Sähkön kulutus ja tuotanto. Haettu 23.02.2022 klo 19.13 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Fingrid (n.d c) Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Haettu 20.3.2022 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>

Fingrid (n.d d) Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Haettu 3.5.2022 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#hankinta>

Fonecta Finder. (2022). Vatajankoski Oy. Haettu 10.2.2022 osoitteesta <https://www.finder.fi/S%C3%A4hk%C3%B6sopimus/Vatajankoski+Oy/Kan-kaanp%C3%A4%C3%A4/yhteystiedot/183844>

Hanhikivi 1 (28.6.2018) Miksi tarvitsemme erilaisia sähkövoiman lähteitä? <https://www.hanhikivi1.fi/artikkelisivu/miksi-tarvitsemme-erilaisia-sahkovoiman-lahteita>

Harjumaa, M. ja Kokkonen, Y. (5.4.2021). Sähkön hinta oli yöllä miinuksella Suomessa ja Ruotsissa – säästö kuluttajalle lähinnä marginaalinen <https://yle.fi/uutiset/3-11870332>

Hölttä, L. (17.3.2022a). Henkilökohtainen keskustelu Vatajankoski Oy:n tuotantopäällikön Lauri Höltän kanssa vieraillessani Kankaanpään KPA-laitoksella tutustumassa hiekkalämpövarastoon.

Hölttä, L. (13.1.2022b). Sähköposti Vatajankoski Oy:n tuotantopäälliköltä Lauri Höltältä.

Hölttä, L. (9.5.2022c). Sähköposti Vatajankoski Oy:n tuotantopäälliköltä Lauri Höltältä.

Ketonen, P. (11.3.2021). Uusiutuvan energian varastointiin kehitetään uusia konsteja – tamperelaisyritys tähtää maailmalle menetelmällä, jossa ylijäämänsähkön energia säilötään hiekkaan. <https://yle.fi/uutiset/3-11818011>

Kivioja, V. (20.5.2022) Sähköposti Polar Night Energy Oy:n johtavalta tiedemieheltä Ville Kiviojalta.

Koljonen, T., Lehtilä, A. & Honkatukia, J. (3.9.2021). Ilmastolain päästövähennystavoittevaihtoehtojen laskennalliset vaikutusarviot. Valtioneuvosto kanslia. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021090345085>

Motiva. (2010). Energiatehokas konesali [https://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas\\_konesali.pdf](https://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf)

Motiva. (25.10.2021) Sähkön varastointi [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman\\_kaytto/sahkon\\_varastointi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/sahkon_varastointi)

Multalansora. (10.3.2022) Hinnasto <http://www.multalansora.fi/hinnasto/>

Naskali, L. (29.10.2021). Polar Night Energy Oy:n projektipäällikkö Liisa Naskalin sähköposti ja siihen sisältyvä liite tiedosto

Nordpool. (5.5.2021). Day-ahead prices <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table>

NREL (30.8.2021). NREL Options a Modular, Cost-Effective, Build-Anywhere Particle Thermal Energy Storage Technology. <https://www.nrel.gov/news/program/2021/nrel-options-a-modular-cost-effective-build-anywhere-particle-thermal-energy-storage-technology.html>

Palonen, A.(4.2.2021) Sähköverkkoja tukevien suurten akustojen käyttö lisääntyy – Ylöjärven kokeilussa sähköt on turvattu jo kolmessa myrskyssä. Yle. <https://yle.fi/uutiset/3-11763332>

Polar Night Energy. (n.d a). References. Haettu 20.4.2022 osoitteesta <https://polar-nightenergy.fi/references>

Polar Night Energy. (n.d b). Solutions. Haettu 20.4. 2022 osoitteesta <https://polarnightenergy.fi/solutions>



Polar Night Energy. (n.d c). Technology. Haettu 15.4.2022 osoitteesta <https://polar-nightenergy.fi/technology>

Promaint (21.10.2014) Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Promaintlehti <https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

Shanghai Metals Market (n.d) Haettu 20.4.2022 osoitteesta <https://www.metal.com/price/Minor%20Metals/Magnesium>

Statista. (7.3.2022) Average lithium carbonate price from 2010 to 2021 <https://www.statista.com/statistics/606350/battery-grade-lithium-carbonate-price/>

Vatajankoski. (6.4.2022). Vatajankoski tekee rakennuksista ekologisempia palvelinten avulla. <https://www.vatajankoski.fi/pilottihankkeen-tulos-vatajankoski-kehitti-keinon-lammittaa-uimahallia-tai-kauppakeskusta-ekologisesti/>

Vatajankoski. (20.5.2021a). Maailman ensimmäinen kaupallinen hiekkaan perustuva lämpövarasto rakennetaan Suomeen. <https://www.vatajankoski.fi/maailman-ensimmainen-kaupallinen-hiekkaan-perustuva-lampovarasto-rakennetaan-suomeen/>

Vatajankoski. (15.2.2021b) Vatajankosken ja Knaufin yhteishanke: Tehtaan hukkalämmöllä lämmitetään pian koteja Satakunnassa. <https://www.vatajankoski.fi/vatajankosken-ja-knaufin-yhteishanke-tehtaan-hukkalammolla-lammitetaan-pian-koteja-satakunnassa/>

Ylönen, M. & Eronen, T. (2019) Järjestelmä ja menetelmä lämmön varastoimiseksi ja siirtämiseksi (Patentti FI12816 B) <https://patents.google.com/patent/FI128161B/fi>