KYMIJÄRVEN HIEKKALÄMPÖVARASTO

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Niko Hepolampi

Tarkastaja: Dosentti Aki Grönman

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Mikko Väisänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Niko Hepolampi

Kymijärven hiekkalämpövarasto

Energiatekniikan diplomityö

2023

75 sivua, 42 kuvaa, 2 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastaja: Dosentti Aki Grönman

Avainsanat: energiavarastot, hiekkalämpövarasto, hiilikattila

Uusiutuvan tuuli- ja aurinkovoiman yleistyminen lisää energiajärjestelmän epävakautta ja hintojen vaihtelua. Tähän voidaan vastata muun muassa monipuolisella energian varastoinnilla ja kysyntäjouston lisäämisellä. Diplomityössä keskitytään hiekkalämpövaraston tekniseen ja taloudelliseen potentiaaliin osana kaukolämpöverkkoa.

Vanhan hiilivoimalan tulipesän muuntaminen lämpövarastoksi osoittautui käytännössä mahdottomaksi kattilan kannatinpalkkien ja seinien kestävyyden, sekä lämmönsiirtopinnan riittämättömyyden vuoksi. Kokonaan uuden lämpövaraston rakennuttaminen vaikuttaa kuitenkin potentiaaliselta investoinnilta lähitulevaisuuden energiamarkkinoilla. Teknologia perustuisi Polar Night Energyn patentoimaan hiekka-akkuun, jossa stationäärisen hiekkamassan läpi puhalletaan putkissa virtaavaa ja sähkövastuksilla kuumennettavaa ilmaa. Purkuvaiheessa ilma ohjataan kaukolämmönvaihtimeen, joka siirtää varastoidun lämmön veteen.

Hiekkalämpövaraston energiakapasiteetin kasvattaminen on purkutehon lisäämistä edullisempaa. Tämän vuoksi hiekka-akku kannattaa mitoittaa tuulivoimatuotannon kannalta optimaaliselle noin kahden viikon varastointiajalle. Lämpövarasto korvaisi osan polttamalla tuotetusta kaukolämmöstä nykyisillä energianhinnoilla ja maksaisi itsensä takaisin muutamassa vuodessa. Teknologia kilpailee suuressa kokoluokassa vesilämpövarastoja sekä kaukolämpöverkon hännissä lämpöpumppuja ja sähkökattiloita vastaan. Kaikilla mainituilla teknologioilla on omat vahvuutensa. Hiekkalämpövaraston etuja ovat yli 90 % hyötysuhde, korkea tehotiheys ja yksinkertaisuus, jotka tekevät siitä kilpailukykyisen vaihtoehdon.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Niko Hepolampi

Kymijärvi sand battery

Master’s thesis

2023

75 pages, 42 figures, 2 tables and 0 appendices

Examiners: Docent Aki Grönman

Keywords: energy storage, sand battery, coal power plant

The spread of renewable wind and solar power increases instability of the energy system and its price fluctuations. This can be countered, among other things, with a versatile use of energy storage technologies and increasing demand flexibility. This thesis focuses on the technical and economic potential of a sand battery as part of district heating network.

Converting a furnace of an old coal-fired power plant into a heat storage proved to be practically impossible due to the lack of durability of boiler's support beams and walls, as well as the insufficiency of the heat transfer surface. However, construction of a new heat storage seems like a potential investment in the energy markets of the near future. The technology would be based on Polar Night Energy's patented sand battery, where air flowing in pipes and heated by electric resistors is blown through a stationary mass of sand. In the discharge phase, the air is directed to a district heat exchanger, which transfers stored heat to water.

Increasing the energy capacity of a sand battery is more affordable than increasing its unloading power. For this reason, the battery should be sized for the optimal storage period of about two weeks to benefit from varying wind power production. Thermal storage would replace part of the combustion-based district heat with current energy prices and pay for itself in a few years. The technology competes with water heat storage in the large size class and heat pumps & electric boilers at tail ends of district heating networks. All the mentioned technologies have their strengths. The advantages of sand thermal storage are above 90% efficiency, high power density and simplicity, which make it a competitive alternative.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin selvitystyönä Lahti Energialle suljetun Kymijärvi I hiilivoimalaitoksen mahdollisesta hyödyntämisestä energian varastoinnissa. Samalla kartoitettiin energian varastoinnin nykytilaa ja roolia tulevaisuuden hiilineutraalissa energiamarkkinassa. Haluaisin kiittää Lahti Energiaa sekä erityisesti projektijohtaja Sandor Luukkasta mahdollisuudesta ja mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitos kuuluu myös Mikko Väisäselle innostavasta työn ohjaamisesta ja rakentavan palautteen antamisesta sekä Jarno Rosenlundille arvokkaan kokemuksen ja asiantuntemuksen avoimesta jakamisesta.

Haluan kiittää myös dosentti Aki Grönmania työn ohjauksesta ja kannustuksesta luottaa omaan visiooni sekä Polar Night Energyn toimitusjohtaja Tommi Erosta hiekkalämpövaraston toiminnan esittelystä ja haastattelukysymyksiin vastaamisesta.

Suuri kiitos perheelleni opintojeni tukemisesta kaikkina näinä vuosina sekä tiiviille opiskeluporukalle yhteisestä matkasta sekä avusta ja kannustuksesta läpi vaikeidenkin hetkien.

Lahdessa, 26.5.2023

Niko Hepolampi

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m^2]
$a_{n,i}$	annuiteettitekijä	[-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kg K)]
D	halkaisija	[m]
E	säteilyteho	[W/m^2]
F	voima	[N]
h	konvektiolämmönsiirtokerroin, syvyys	[W/m^2K, m]
I	Investointikustannus	[€]
i	korkoprosentti	[-]
k	lämmönjohtavuus	[W/(m K)]
m	massa	[kg]
n	lukumäärä, käyttöikä	[-, a]
NA	nykyarvo	[€]
p	paine	[bar, Pa]
Q	lämpömäärä	[J]
q	lämpöteho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
r	korrelaatiokerroin	[-]
s	volumetrinen lämpökapasiteetti, tuotto	[J/m^3K, €]
T	lämpötila	[ºC, K]
U	kokonaislämmönsiirtokerroin	[W/m^2K]
u_m	keskinopeus	[m/s]

V	tilavuus	[m^3]
v	kineettinen viskositeetti	[m^2/s]
x	etäisyys	[m]

Kreikkalaiset

α	diffuusiokyky	[m^2/s]
β	volumetrinen lämpölaajenemiskerroin	[1/K]
Δ	muutos	[-]
ε	säteilykyky	[-]
η	hyötysuhde	[-]
μ	dynaaminen viskositeetti	[Ns/m^2]
ρ	tiheys	[kg/m^3]

Vakiot

g	painovoimakiihtyvyys	9,81 m/s
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^2K^4

Dimensiottomat luvut

Re	Reynoldsin luku	[-]
Nu	Nusseltin luku	[-]
Ra	Rayleighin luku	[-]
Pr	Prandtlin luku	[-]

Alaindeksit

i	sisäpinta
L	karakteristinen pituus
lm	logaritminen
o	ulkopinta
s	pinta

∞	ympäristö

Lyhenteet

AEM	Anion Exchange Membrane (anioninvaihtokalvo)
BBC	British Broadcasting Corporation
CAES	Compressed Air Energy Storage (paineilma energiavarasto)
COP	Coefficient of Performance (hyötysuhdekerroin)
CSP	Concentrated Solar Power (keskitetty aurinkolämpö)
DOE	Department of Energy
EU	Euroopan unioni
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
LAES	Liquid Air Energy Storage (nesteytetyn ilman energiavarasto)
LFP	Lithium Iron Phosphate
LNG	Liquefied Natural Gas (nesteytetty maakaasu)
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ORC	Organic Rankine Cycle
PEM	Polymer Exchange Membrane
SNG	Synthetic Natural Gas (synteettinen maakaasu)
SOEL	Solid Oxide Electrolyzer
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 10
2 Energian varastointi 12
2.1 Energiavarastot maailmalla 13
2.2 Tuntuvan lämmön varastointi 15
2.2.1 Käyttökohteet 16
2.2.2 Lämmönsiirto 17
2.3 Lämpövaraston materiaaliominaisuudet 18
2.3.1 Ominaislämpökapasiteetti 19
2.3.2 Lämmönjohtavuus 19
2.3.3 Tiheys 19
3 Varastointiratkaisut 20
3.1 Keskitetty aurinkolämpö 20
3.2 Lämmön varastointi veteen 22
3.3 Lämmön varastointi hiekkaan 23
3.3.1 Hiekka-akku 23
3.3.2 ORCTES 25
3.3.3 ENDURING 26
3.4 Muut varastointiratkaisut 27
3.4.1 Akkuvarasto 27
3.4.2 Power-to-X 29
3.4.3 Sulametalliakku 34
3.4.4 Virtausakku 35
4 Hiekkalämpövaraston toteutus Kymijärvi I hiilikattilaan 38
4.1 Kymijärvi I kattilan rakenne ja toimintaperiaate 38
4.2 Varastointi kapasiteetti 40

4.2.1 Tilavuus ja massa 41
4.2.2 Lämpötila 41
4.3 Lämpöakun lataaminen 42
4.4 Varastointihäviöt 43
4.5 Lämpöakun purkaminen 46
5 Taloudellinen potentiaali 49
5.1 Sähkömarkkinoiden kehitys Suomessa 49
5.2 Kaukolämmön kysyntä 54
5.3 Skenaario 2030 ennustetulla tuotantorakenteella 56
6 Johtopäätökset 61
6.1 Hiekkalämpövaraston toteutettavuus 61
6.2 Muut käyttökohteet 64
7 Yhteenveto 67
Lähteet 72

1 Johdanto

Energian vihreä siirtymä on käynnissä Suomessa ja maailmalla. Sitä edesauttaa aurinko- ja tuulivoiman saavuttama taloudellinen kilpailukyky moniin konventionaalisiin energiamuotoihin nähden. Suurin osa valtioista on sitoutunut vähentämään päästöjään Pariisin ilmastosopimuksen nojalla rajoittaakseen ilmaston lämpenemisen 1,5 celsiusasteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Lisäksi viimeaikaiset muutokset globaalissa energiamarkkinassa kannustavat toimijoita lisäämään kansallista tuotantoa ja vähentämään tuontienergian määrää, mikä suuntaa investointeja uusiutuviin energianlähteisiin. Viimeisimpinä esimerkkeinä tästä ovat Yhdysvaltojen ja Euroopan Unionin tukipaketit vihreän siirtymän vauhdittamiseen. Asteittainen ja nopea energiasektorin siirtymä kohti sääolojen mukaan vaihtelevaa tuotantoa lisää kuitenkin järjestelmän epävakautta, joka tulee kompensoida tehotasapainon säilyttämiseksi. Ratkaisuiksi on tarjottu älykkäitä sähköverkkoja, säätövoimaa, kysyntäjoustoja sekä energian laajamittaista varastointia. Tässä työssä keskitytään erityisesti tuntuvan lämmön varastointiin ja tutkitaan suuren hiekkalämpövaraston teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä Lahti Energian käytöstä poistuneessa Kymijärvi I hiilivoimalan kattilassa.

Energian varastointi on keskittynyt maailmalla suurilta osin pumppuvoimalaitoksiin sekä enenevissä määrin akkuvarastoihin ja vetytalouteen tuotantokustannuksien laskiessa. Näihin varastoitu energia hyödynnetään usein sähkönä. Uusiutuvalle vedylle on käyttöä myös teollisuuden raaka-aineena. Lämmön varastointia on toistaiseksi sovellettu maailmalla lähinnä suurissa aurinkolämpölaitoksissa. Suomen pohjoisissa olosuhteissa kaukolämmön kysyntä on suurinta talvikuukausina, jolloin erityisesti lämmön kausivarastointi on usein kannattavaa. Lämpövarastoilla voidaan muun muassa vähentää huipputuotannon tarvetta ja turvata lämpöenergian riittävyyttä verkon asiakkaille myös poikkeusolosuhteissa. Moni suomalainen energiayhtiö onkin kiinnostunut lämpöakuista, joissa kauko- ja hukkalämpöä varastoidaan joko vanhoihin polttoainesäiliöihin tai louhittuun peruskallioon sijoitettuihin lämmitettyihin vesimassoihin. Lämmön varastointi veteen ei kuitenkaan ole ainut vaihtoehto.

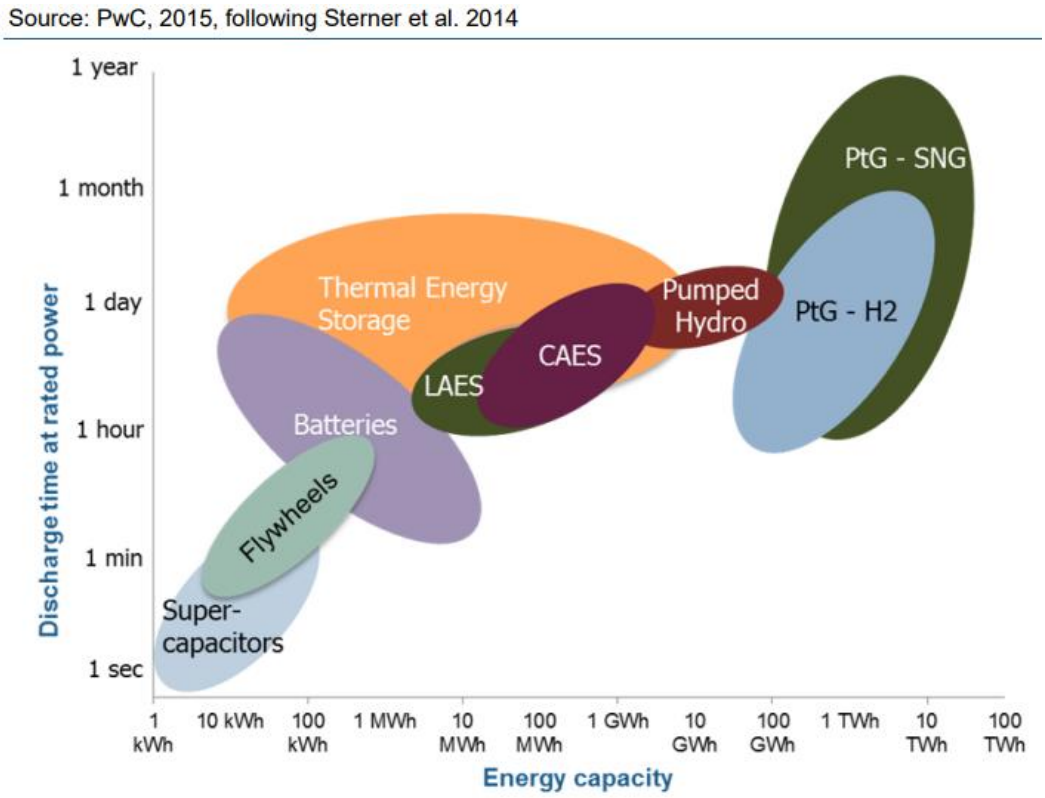
Suomalaisen Polar Night Energy Oy:n suunnittelema 200kW/8MWh hiekka-akku saavutti myös kansainvälistä huomiota valmistuessaan Kankaanpäähän kesällä 2022. Kyseessä on tällä hetkellä maailman suurin hiekkalämpövarasto. Suurten kaupunkien kaukolämpöverkoissa tämä ei vielä riitä, minkä vuoksi huomattavasti suuremman lämpövaraston toteutus

vanhaan hiilikattilaan voisi tarjota uudenlaisia mahdollisuuksia energian varastointiin. Esimerkiksi Keski-Euroopassa energian tuottaminen fossiilisella kivihiilellä ja maakaasulla on edelleen yleistä. Kyseisiä voimaloita ollaan kuitenkin sulkemassa valtioiden ilmastotavoitteiden mukaisesti tulevina vuosina. Niiden muuntaminen lämpövarastoiksi voisikin osaltaan tarjota ratkaisuja sekä sähkön tuotannon tasaamiseen, että päästöttömän ja edullisen kaukolämmön tuottamiseen tulevaisuuden hiilineutraalissa toimintaympäristössä.

Tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa, olisiko vanhan hiilivoimalan tulipesän muuntaminen energiavarastoksi teknisesti mahdollista sekä taloudellisesti kannattavaa. Työssä hyödynnetään kirjallisia julkaisuja, haastatteluja, lämmönsiirtolaskentaa sekä skenaarioita tulevaisuuden energiamarkkinoista. Myös erillisten hiekkalämpövarastojen toimintaedellytyksiä Lahden kaukolämpöverkossa selvitetään. Työ sisältää kirjallisuusosan, jossa käsitellään energian varastoinnin nykytilaa, lämmönsiirron perusteita sekä muita energiavarastointiratkaisuja, jotka voivat saavuttaa kaupallisen kannattavuuden lähivuosina. Toiminnassa olevia projekteja ja teknologioita esitellään ja niiden kilpailukykyä vertaillaan. Tutkimusosassa keskitytään hiekkalämpövarastojen toimintaedellytyksiin. Hiilivoimalan tulipesän mahdollistama energia-, lämpötila- ja tehopotentiaali selvitetään. Lopuksi tehdään johtopäätökset lämpövaraston toteutettavuudesta, teknologian potentiaalista ja summataan käsitellyt aiheet.

2 Energian varastointi

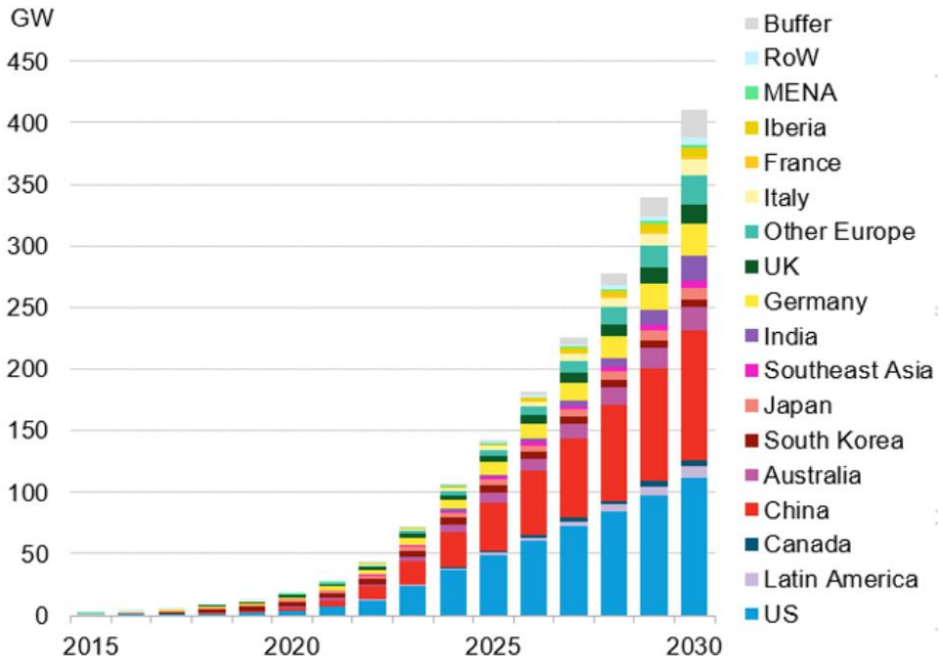
Energian varastointiprosessi sisältää teknologiasta riippumatta kolme perusvaihetta: lataamisen, varastoinnin ja purkamisen. Energian varastoiminen ja sen muodon muuttaminen eivät kuitenkaan ole häviöttömiä prosesseja, minkä vuoksi osa varastoitavasta energiasta menetetään entropiana. Energiaa voidaan varastoida mekaanisesti potentiaali- tai liike-energiana, lämpönä, sähkökemiallisesti akuissa tai kemiallisesti esimerkiksi vetynä ja sen johdannaistuotteina. Myös suora sähkön varastointi on mahdollista kondensaattoreissa. Kaikille varastointiratkaisuille on omat tyypilliset energiakapasiteettinsa ja purkuaikansa, jotka esitetään yleisimpien varastointitapojen osalta kuvassa 1. Eroavaisuudet varastojen ominaisuuksissa johtavat erilaisiin käyttötarkoituksiin, jotka vaihtelevat lyhytaikaisesta sähköverkon taajuuden tasapainotuksesta pitkäkestoiseen säätötehoon ja suuriin kausivarastoihin. (World Energy Council 2016, 9-12) Tässä kappaleessa käsitellään energian varastoinnin nykytilaa ja tulevaisuutta sekä tutustutaan lämmön varastointiin teorian ja materiaalien osalta.



Kuva 1. Yleisimpien energian varastointiratkaisujen nimellispurkuteho energiakapasiteetin funktiona (World Energy Council 2016, 11)

2.1 Energiavarastot maailmalla

Energiavarastojen avulla uusiutuvan aurinko- ja tuulivoiman tuottamaa energiaa voidaan siirtää suuren kysynnän tunneille. Globaalin energian varastointikapasiteetin odotetaan kasvavan 15-kertaiseksi vuoden 2021 lopun 27GW/56GWh tasosta vuosikymmenen loppuun mennessä. Ennuste energiavarastojen kapasiteetin noususta alueittain on esitetty kuvassa 2. Kasvua kiihdyttävät Yhdysvaltojen 369 miljardin dollarin Inflation Reduction Act -lainsäädäntöpaketti ja Euroopan Unionin REPowerEU -suunnitelma, jotka ohjaavat varoja vihreään siirtymään. Litiumioni akkujen odotetaan toimivan kasvun veturina niiden kilpailukykyisen hinnan, vakiintuneen toimitusketjun ja laajan käyttökokemuksen vuoksi. Kasvua odotetaan myös muista teknologioista kuten paineilma- ja lämpövarastoista. (BNEF 2022)

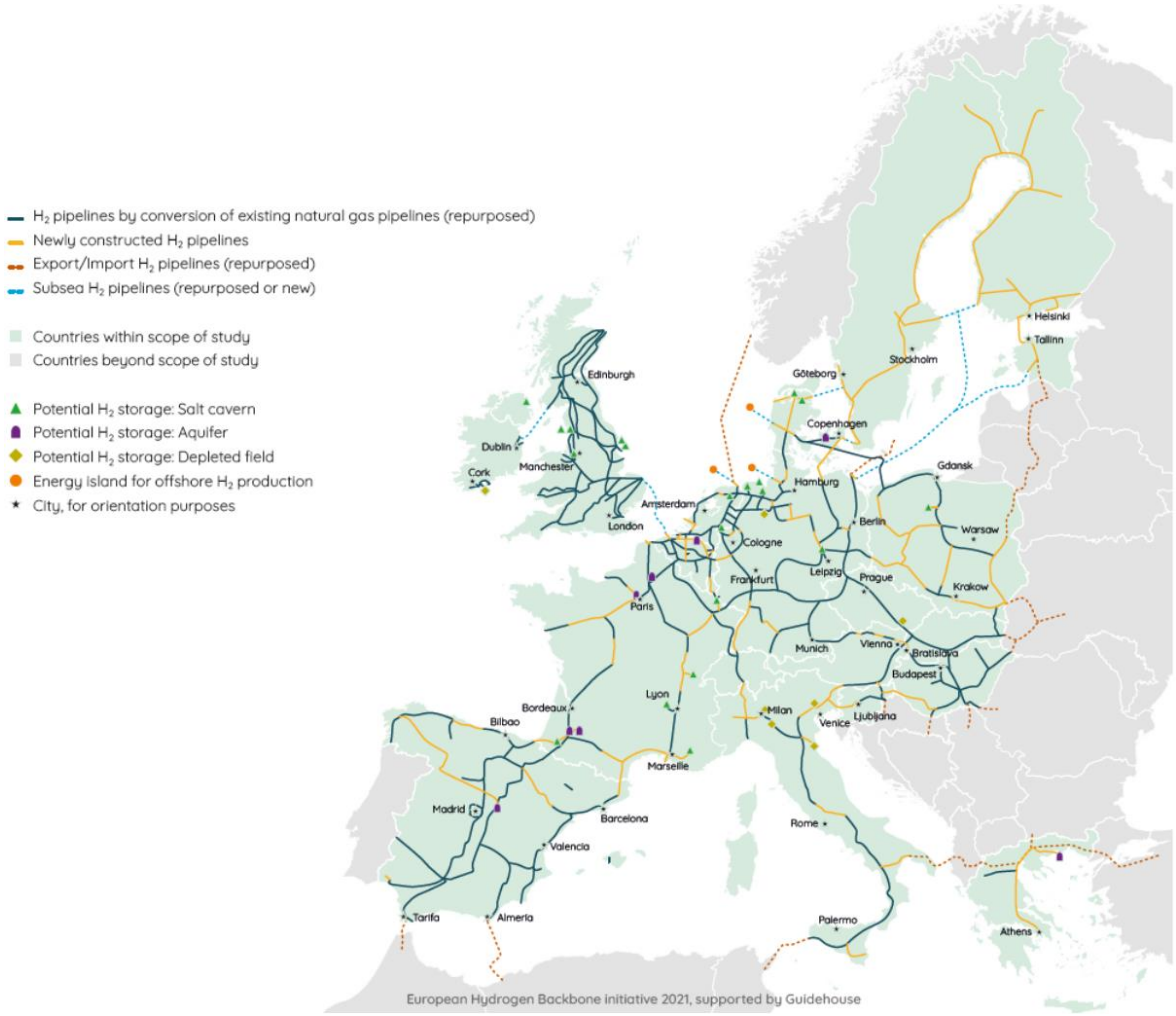


Kuva 2. Energian varastointikapasiteetin odotettu kasvu alueittain. ”MENA” viittaa Lähi-Itään ja Pohjois-Afrikkaan, ”RoW” muihin maihin ja ”Buffer” vaikeasti ennustettaviin markkinoihin ja sovelluksiin (BNEF 2022)

Edellä esitetty ennuste ei huomioi pumppuvoimalaitoksia, joiden yhteenlaskettu varastointikapasiteetti vuonna 2021 oli Yhdysvaltojen energiaviraston ylläpitämän tietokannan perusteella 181GW/602GWh (DOE 2021). Bloombergin ennuste ei myöskään mainitse vetytaloutta, jonka perustana on veden elektrolyyttinen hajottaminen vedyksi ja hapeksi päästöttömästi tuotetulla sähköllä. Tuotetusta vedystä voidaan jatkojalostaa uusiutuvia polttoaineita liikenteeseen tai se voidaan palauttaa varastoinnin jälkeen takaisin sähköksi erityisillä kaasuturbiineilla tai polttokennoilla. (Fortum 2020)

Pumppuvoimalaitos on vakiintunut ja teknisesti kypsin energian varastointiratkaisu. Varastoitua energiaa voidaan purkaa yhtäjaksoisesti useista tunneista vuosiin patoaltaiden tilavuudesta ja purkutehosta riippuen. Akkuvarastot ja muut uudet teknologiat ovat valtaamassa markkinaa lyhyellä, yleensä alle vuorokauden kestävässä tehon säädössä niiden korkean hyötysuhteen, lyhyen vasteajan ja edullisen hinnan vuoksi. Pumppuvoimalaitokset pysyvät kuitenkin kilpailukykyisinä erityisesti energian ja veden kausivarastoinnissa. Teknologian globaalin teknillistaloudellisen potentiaalin on arvioitu olevan merkittävä. Se kuitenkin rajoittuu lähinnä vuoristoalueille, joissa on hyvä veden saatavuus ja riittävät luonnolliset korkeuserot patoaltaiden välillä. Pumppuvoimalaitokset vaativat toimiakseen suuren sähkön siirtokapasiteetin, jonka rakentaminen syrjäisille alueille on kallista. Myös luonnonsuojelu rajoittaa energian varastointiin soveltuvia alueita. (Hunt et al. 2020)

Vetytaloudella tarkoitetaan vedyn laajamittaista hyödyntämistä energiavarastona ja teollisuuden raaka-aineena muun muassa päästöttömän teräksen valmistuksessa. Vedyn nykyinen käyttö EU:ssa vastaa alle kahta prosenttia alueen energian kulutuksesta. Sitä käytetään erityisesti kemianteollisuudessa muovin ja lannoitteiden raaka-aineena. Vedystä 96 % valmistetaan edelleen fossiilisesta maakaasusta, jonka tuotantokustannukset riippuvat maakaasun markkinahinnoista. Uusiutuvan vedyn vuotuisen tuotannon toivotaan kasvavan EU-alueella kymmeneen miljoonaan tonniin vuosikymmenen loppuun mennessä. Vastaava määrä suunnitellaan tuotavan esimerkiksi Pohjois-Afrikasta, jossa on merkittävä aurinkovoimapotentiaali. (Euroopan komissio 2023) EU:n kannalta suunnitelman toteutus vaatisi 500 TWh uusiutuvaa sähköntuotantoa sekä laajan jakeluverkoston, joka on esitetty kuvassa 3 (Euroopan komissio 2022, 9, 198). Suomi tavoittelee 10 % eli 50 TWh tuotanto-osuutta EU tavoitteesta periaatepäätöksen mukaan. Tavoitteen saavuttaminen vaatii miljardien investointeja vedyn tuotantoon, jatkojalostukseen, jakeluverkkoon ja uusiutuvan sähkön tuotantoon. (TEM 2023, 4) Vuonna 2022 Suomen sähköntuotanto oli 69 TWh, josta 54 % luokiteltiin uusiutuvaksi (Energiateollisuus ry 2023a).



Kuva 3. Eurooppaan suunniteltu vedyn jakeluverkosto vuonna 2040 (Euroopan komissio 2022)

2.2 Tuntuvan lämmön varastointi

Tuntuva lämpö on yleisin lämmön varastoinnin muoto. Siinä lämpöenergia varastoituu materiaalin sisäiseksi energiaksi ilman faasin- eli olomuodon muutosta. Tämä näkyy varastointimateriaalin lämpötilan lineaarisena kasvuna yhtälössä 1. Muita lämmön varastoinnin muotoja ovat latenttilämpö ja lämpökemialliset varastot. Latenttilämpövarastoissa materiaalin lämpötila ei juuri muutu, sillä energia varastoituu faasimuutokseen yleensä ainekohtaisessa sulamislämpötilassa. Lämpökemiallisissa varastoissa energia sitoutuu palautuviin korkean entalpian reaktioihin, joiden lopputuotteet ja vapautuva lämpö varastoidaan erikseen. Myös kaasua tai nestettä sitovat kiinteät- sekä nestemäiset absorptiomateriaalit kuuluvat tähän kategoriaan. (Cabeza 2021, 3–10) Monet tuntuvan lämmön varastot ovat kaupallisessa

mittakaavassa. Latenttilämpölaitoksia on toiminnassa demonstraatioasteella, mutta lämpökemialliset varastot ovat vielä konseptivaiheessa. (IEA 2022)

$$Q = mc_p\Delta T \tag{1}$$

Jossa Q on varastoitu lämpömäärä [J], m varastointimateriaalin massa [kg], c_p ominaislämpökapasiteetti [J/kgK] ja ΔT materiaalin lämpötilanmuutos [K]. (Cabeza 2021, 4)

Tuntuvaa lämpöä voidaan varastoida esimerkiksi veteen, peruskallioon tai ilmaan. Myös tarkoitukseen erikseen valmistettujen sulasuolojen käyttö on yleistä. (Cabeza 2021, 3–7) Tuntuvan lämmön varastoinnissa aineiden sulamis- ja kiehumispisteet rajoittavat materiaalin lämpötilanmuutosta ja toiminta-aluetta. Kyseiset pisteet riippuvat vallitsevasta paineesta ja lämpötilasta, mutta taulukoissa lämpötilat ilmaistaan usein ilmakehän paineessa. Kiinteiden varastojen lämpötilan tulee pysyä alle sulamispisteen, nestemäisillä varastoilla sulamis- ja kiehumispisteiden välissä ja kaasuilla kiehumispisteen yläpuolella, sillä materiaalin olomuodon muutos muuttaa merkittävästi myös sen aineominaisuuksia.

2.2.1 Käyttökohteet

Lämmön varastoinnille on käyttöä sekä rakennuksissa, että teollisuudessa. Lämpövarastoilla voidaan lämmittää tai viilentää kohteita haluttuna ajankohtana. Tämä säästää energiaa, sillä kysynnän aikana lämpöä tuottavia tai sitä poistavia laitteistoja voidaan käyttää pienemmällä teholla. Parhaimmillaan energian varastointi vähentää samalla kasvihuonepäästöjä. Vuonna 2005 tehdyn potentiaaliarvion mukaan vuotuiset säästöt EU:ssa voisivat olla noin 953 TWh lämpöenergiaa ja 2580 Mt hiilidioksidia. (Cabeza 2021, 3–7) Teollisessa kokoluokassa lämpöä käytetään pääasiassa prosessihöyryn, sähkön ja kaukolämmön tuotannossa, mutta myös kaukokylmän tuottaminen on hiljalleen yleistymässä. Vuonna 2021 Suomessa tuotettiin 40,8 TWh kaukolämpöä ja tilastoitiin 52,2 TWh teollisuuslämpöä, josta suurin osa käytettiin metsä- metalli- ja kemianteollisuudessa (Tilastokeskus 2022). Lämpövarastoja voidaan soveltaa kaikissa edellä mainituissa käyttökohteissa. Lisäksi varastot tarjoavat paremmat edellytykset hukka- ja kausilämmön hyödyntämiselle.

2.2.2 Lämmönsiirto

Sisäenergia koostuu aineen tuntuvasta energiasta eli atomien ja molekyylien liike-, pyörimis- ja värähtelyenergiasta, olomuodonmuutoksiin sitoutuneesta latenttilämmöstä sekä koossa pitävästä kemiallisesta- ja ydinenergiasta. Lämpötila on puolestaan suure, joka kuvaa aineen tuntuvan energian suhteellista määrää tarkastelupisteessä. Lämpötilaerot aineiden välillä pyrkivät tasoittumaan termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämmön siirtyessä luontaisesti matalamman sisäenergian suuntaan. Lämmönsiirron voimakkuutta kuvataan absoluuttisesti lämpötehona q [W] tai pinta-alakohtaisena lämpövuona q'' [W/m^2]. Systeemin lämmönsiirtoa ratkaistaessa määritetään tasetilavuus, joka voi olla avoin, suljettu tai eristetty. Lämmönsiirron ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemin energia ei lisäänny tai katoa, mutta sen muoto voi vaihtua. Tasetilavuuden energiamäärä muuttuu siis vain, jos energia ylittää taserajan työnä, lämmönsiirtona tai aineen mukana. Avoimessa systeemissä sekä energia että aine voivat ylittää taserajan, suljetussa systeemissä aineen siirto on estetty ja eristetty systeemi ei vuorovaikuta ympäristönsä kanssa. (Incropera et al. 2017, 2–13)

Lämmön siirtymiseen on kolme erillistä mekanismia: johtuminen, konvektio ja säteily. Johtumisessa lämpötilaerot tasaantuvat kiinteissä aineissa tai stationäärisissä fluideissa hiukkasten aktiivisuuserojen myötä. Korkeammassa lämpötilassa olevat hiukkaset luovuttavat osan sisäenergiastaan törmäillessään ympäröiviin molekyyleihin. Johtumislämmönsiirron laskennassa käytetään yhtälössä 2 esitettyä Fourierin lakia. Konvektiossa lämpö siirtyy liikkuvassa fluidissa tai pinnan ja fluidin välillä lämpötilaerojen vaikutuksesta. Lämmönsiirto syntyy diffuusion ja virtauksen yhteisvaikutuksesta ja sen suuruus voidaan laskea Newtonin jäähtymislaista yhtälöllä 3. Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaassa konvektiossa lämpimän pinnan läheisyydessä fluidin tiheys laskee molekyylien sisäenergian kasvaessa. Tämä aiheuttaa nostevoiman, joka saa aikaan pinnan suuntaisen virtauksen. Pakotetussa konvektiossa virtaus luodaan koneellisesti pumpulla tai puhaltimella. Säteily puolestaan on aineesta poispäin suuntautuvaa sähkömagneettista aaltoliikettä, joka ei tarvitse väliainetta. Yhtälöstä 4 laskettava lämpösäteilyn määrä riippuu säteilylähteen lämpötilasta ja säteilykyvystä. (Incropera et al. 2017, 2–10)

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2}$$

$$q = hA(T_s - T_\infty) \tag{3}$$

$$E = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Joissa q on lämpöteho [W], k lämmönjohtavuus [W/mK], A pinta-ala [m^2], h konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K], T_s pinnan- ja T_∞ fluidin lämpötila [K], E säteilyteho [W/m^2], ε säteilykyky [-] ja σ Stefan-Boltzmannin vakio [W/m^{2}K^4].

2.3 Lämpövaraston materiaaliominaisuudet

Tuntuvan lämmön varastoinnissa materiaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja tiheys. Tämän vuoksi varastomateriaalit ovat yleensä kiinteitä tai nestemäisiä. Materiaalia täytyy olla myös helposti saatavilla ja edullista. Varastointimateriaalin diffuusiokyky, höyrypaine, kemiallinen stabiilius ja yhteensopivuus varastointisäiliön materiaalien kanssa on tarvittaessa otettava huomioon. Jokaisella varastointimateriaalilla on sille tyypilliset aineominaisuudet, jotka johtavat vahvuuksiin ja heikkouksiin. Käytetty materiaali tuleekin valita aina tapauskohtaisesti. Joidenkin mahdollisten lämpövarastomateriaalien ominaislämpökapasiteetti c_p, tiheys ρ, näiden tulosta saatava volumetrinen lämpökapasiteetti s sekä lämmönjohtavuus k esitetään taulukossa 1. (Cabeza 2021, 3–6) Yleisen sulasuolan ($NaNO_3$-KNO_3) vastaavat lämpöominaisuudet 565 K lämpötilassa ovat 1596 J/kgK; 1712 kg/m^3, 2,73 MJ/m^{3}K ja 0,55 W/mK. (Bonk & Bauer 2021, 16)

Taulukko 1. Materiaalien aineominaisuuksia 300 K lämpötilassa (Incropera et al. 2017, 915–933)

	c_p [J/kgK]	ρ [kg/m^3]	s [MJ/m^{3}K]	k [W/mK]
Vesi	4179	997	4,17	0,61
Hiekka	800	1515	1,21	0,27
Betoni	880	2300	2,02	1,4
Tiili	835	1920	1,60	0,72
Graniitti	775	2630	2,04	2,79
Teräs AISI 304	477	7900	3,77	14,9
Ilma	1007	1,2	0,001	0,03
Savi	880	1460	1,28	1,3

2.3.1 Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa massaan sitoutuvan lämpöenergian määrää, kun sen lämpötilaa nostetaan yhdellä asteella. Arvo määritellään yleensä vakiopaineessa ja sen suuruus on riippuvainen lämpötilasta. (Incropera et al. 2017, 70–71) Korkean ominaislämpökapasiteetin omaavat aineet kuten vesi ja ilma kykenevät varastoimaan suuria määriä lämpöä maltillisellakin lämpötilan nostolla. Tämä on tärkeää, sillä varastosäiliöiden materiaalikestävyys heikkenee lämpötilan kasvaessa. Lämpötilan noustessa myös varastointihäviöt kasvavat voimakkaamman lämpösäteilyn myötä yhtälön 4 mukaisesti.

2.3.2 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus ilmaisee yleensä kiinteiden materiaalien kykyä siirtää lämpöä sisällään. Tähän vaikuttaa materiaalin hilarakenne ja sen vapaat elektronit. Suuren lämmönjohtavuuden materiaaleissa kuten teräksessä ja graniitissa lämpö siirtyy pienellä vastuksella johtaen mataliin lämpötilaeroihin materiaalin sisällä. Vastaavasti materiaalin lämpötilagradientti kasvaa pienillä lämmönjohtavuuksilla suuren vastuksen takia. Tästä syystä eristemateriaaleilla lämmönjohtavuus on mahdollisimman pientä, yleensä noin 0,02–0,08 W/mK. Lämpövarastomateriaalien osalta kerroin vaikuttaa lämpöakun lataus- ja purkuaikoihin, sekä sisäisiin lämpötilaeroihin. Lämmön johtumista lämpövarastopiirin ulkopuolelle voidaan vähentää lisäämällä seinämiin eristeitä. (Incropera et al. 2017, 68–70, 919–922)

2.3.3 Tiheys

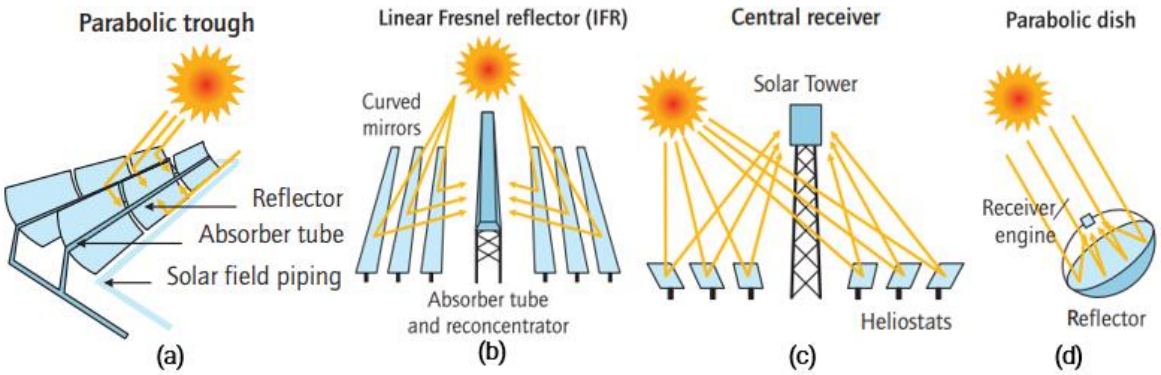
Tiheys ilmaisee tilavuuteen mahtuvan aineen massan ja volumetrinen lämpökapasiteetti kuvaa materiaalin kykyä varastoida lämpöenergiaa ilman lämpötilan vaikutusta. Materiaalin tiheys yleensä pienenee lämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu hiukkasten sisäenergian muutoksesta, joka pakottaa molekyylit kauemmas toisistaan. Samalla aineen tilavuus kasvaa, mikä havaitaan lämpölaajenemisena. (Incropera et al. 2017, 70–72) Molekyylien väliset sidosenergiat pienenevät etäisyyksien kasvaessa, mikä johtaa materiaalin rakenteelliseen heikentymiseen ja lopulta olomuodonmuutoksiin. Lämpövarastoihin soveltuvat parhaiten materiaalit, joilla on suuri tiheys ja maltillinen lämpölaajenemiskerroin.

3 Varastointiratkaisut

Tässä kappaleessa tutustutaan tarkemmin jo kaupallisessa toiminnassa oleviin energiavarastoihin sekä uusiin potentiaalisiin ratkaisuihin, joita voitaisiin soveltaa Suomen olosuhteissa. Teknologioiden perustyypit, toimintaperiaate sekä suorituskyky esitellään esimerkkilaitosten avulla. Samalla pyritään etsimään mahdollisia osaratkaisuja työn varsinaiseen tutkimusongelmaan, suuren kokoluokan hiekkalämpövaraston toteuttamiseen. Käsitellyt energiavarastot voidaan jaotella tuntuvan lämmön varastoihin ja muihin energiavarastoihin. Tuntuvan lämmön varastot ovat tyypiltään passiivisia tai aktiivisia. Aktiivisissa lämpövarastoissa lämmön varastointiaine tai erillinen lämmönsiirtofluidi virtaa lämmönsiirtimen, aurinkokeräimen tai höyrystimen läpi. Passiivisissa lämpövarastoissa lämmönsiirtofluidi virtaa kiinteän varastointimateriaalin läpi vain lataus- ja purkuvaiheissa. Molemmissa tapauksissa korkea lämpökapasiteetti, tehokas lämmönsiirto ja pienet häviöt ovat ensiarvoisen tärkeitä. (Cabeza 2021, 2) Muut lämpövarastot käsittävät kemiallisia ja sähkökemiallisia ratkaisuja, joita käytetään ensisijaisesti sähköenergian varastointiin.

3.1 Keskitetty aurinkolämpö

Keskitetty aurinkolämpö (CSP) on erityisesti vuosituhannen alun lupaava sähköntuotantomenetelmä, jossa auringon lämpösäteilyä kerätään peilipintojen avulla polttopisteen lämpövastaanottimiin. Teknologialla on neljä perustyyppiä, jotka on esitetty kuvassa 4. Niistä kolme ensimmäistä toimii samalla periaatteella. Keskitetyllä auringon säteilyllä kuumennetaan polttopisteessä virtaavaa lämmönsiirtoainetta, joka höyrystää vettä lämmönvaihtimessa. Tulistettu vesihöyry pyörittää turbiinia ja siihen liitetty generaattori tuottaa sähköä. Neljännessä, lautasantenni tyyppisessä ratkaisussa polttopisteessä kerätty lämpö käynnistää Stirling-moottorin, joka on yhdistetty sähköä tuottavaan generaattoriin. Energian varastoinnin kannalta järjestelmästä tekee mielenkiintoisen lämmönsiirto- ja varastointiaineena käytetty sulasuola, jonka avulla aurinkolämpövoimala kykenee tuottamaan sähköä vielä auringon laskun jälkeen. Päivän aikana kerättyä energiaa varastoidaan sulasuolatankeissa, joista sitä voidaan hyödyntää tuntien ajan varaston koosta ja purkutehosta riippuen. (IEA 2010, 11–15)



Kuva 4. Keskitetyn aurinkolämmön perustyypit (IEA 2010, 11–12)

Sulasuolat ovat joukko korkean ominaislämpökapasiteetin suolayhdisteitä, jotka pysyvät nestemäisessä olomuodossa laajalla lämpötila-alueella. Niillä on myös pieni höyrynpaine, alhainen viskositeetti, hyvä liuotuskyky ja suhteellisen matala korroosionopeus. Lisäksi ne ovat edullisia moniin muihin nestemäisiin lämmönsiirtoaineisiin verrattuna. Sulasuolat ovat yleistyneet teollisessa mittakaavassa erityisesti korkeiden lämpötilojen sovelluksiin. Esimerkiksi lämpö-öljyjen toiminta-alueen yläraja on noin 400 °C. Aurinkosuolaksi kutsutun $NaNO_3$-KNO_3 yhdisteen 60–40 sekoitus puolestaan sulaa noin 220 °C lämpötilassa ja pysyy nestemäisenä 290 °C eristetyssä säiliössä. Sen käyttölämpötilan yläraja on noin 565 °C ja korroosiovaikutus teräksille alle 10 µm vuodessa 550 °C lämpötilassa 3000 tunnin upotusajalla tehtyjen testien perusteella massan muutoksesta laskettuna. (Cabeza 2021, 55–59)

Nykyisissä CHP laitoksissa käytetyn nitraattisuolan maksimikäyttölämpötilaa rajoittavat lämpöhajoamisreaktiot ja kuumakorroosioriski. Uusia korkeamman lämpötilan ja parempien lämmönsiirto-ominaisuuksien omaavia sulasuoloja kehitellään kuitenkin aktiivisesti. Kloridisuolojen kuten natrium- ja kaliumkloridien luontaiset sulamislämpötilat ovat yli 750 °C ja kiehumispisteet yli 1400 °C. Lisäämällä joukkoon metallihalogeneja kuten $MgCl_2$ tai $ZnCl_2$ toimintalämpötilaa voidaan laskea. Esimerkiksi moolisuhteessa 60–20–20 sekoitettu $MgCl_2$-KCl-NCl-yhdisteen sulamislämpötila on alle 400 °C ja kiehumispiste yli 800 °C. Kyseisen yhdisteen markkinahinta alle 0,5 $/kg, mutta haasteena on kasvava korroosioriski. Riskiä pyritään vähentämään korroosionestoaineilla ja putkipinnoille suojaavan alumiinioksidikerroksen muodostavilla Fe-Cr-Al-metalliseoksilla. (Ding et al. 2019, 298–299)

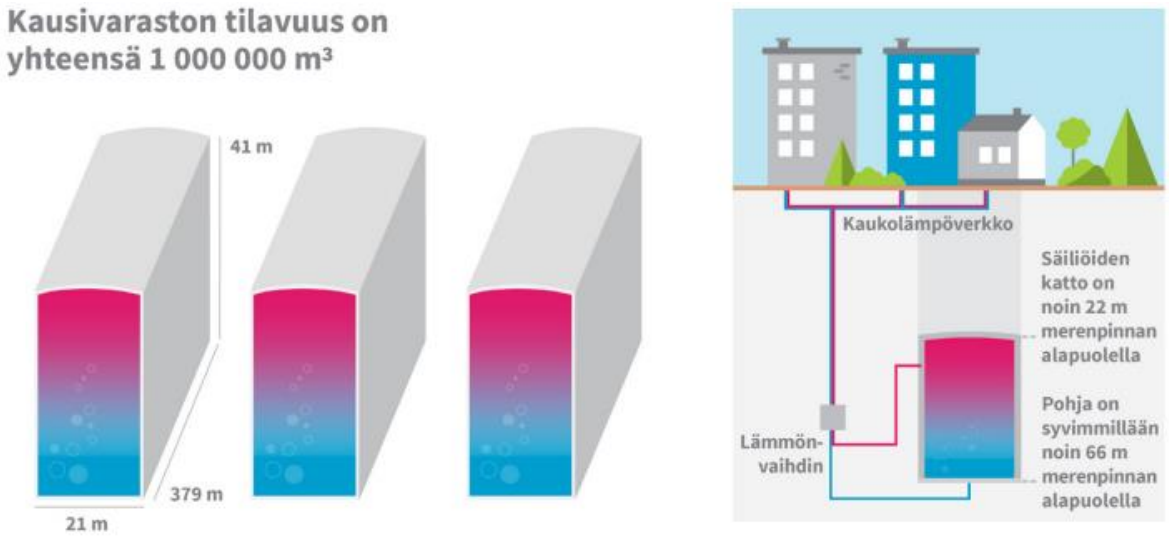
3.2 Lämmön varastointi veteen

Vesi on yleisin lämmönsiirto- ja varastointimateriaali sen helpon saatavuuden, edullisuuden, korkean lämpökapasiteetin ja hyvän konvektiolämmönsiirron myötä. Toisaalta käyttö rajoittuu yleensä 0–100 °C lämpötilaan, diffuusio aiheuttaa varaston sisäisiä häviöitä ja korroosio kuluttaa metalleja ilman veden kemiallista käsittelyä. Vedenkäsittely on kuitenkin normaali toimenpide voimalaitoksissa. Lämmön varastointi veteen on erityisen yleistä kotitalouksien lämminvesivaraajissa, mutta pohjavettä käytetään maailmalla myös kausittaisena lämpönieluna ja varastona rakennusten lämpötilan säätelyssä. Pohjavesivarastojen lämpötila on yleensä alle 25 °C ja niiden lämpöä hyödynnetään lämpöpumppujen avulla. Korkeamman lämpötilan systeemejä kehitetään erityisesti Pohjoismaissa. (Cabeza 2021, 10–14)

Suomessa monet energiayhtiöt ovat kiinnostuneet kaukolämmön varastoinnista suuriin vesitilavuuksiin. Tuoreita esimerkkejä luolalämpövarastoista on ainakin Vaasasta, Helsingistä ja Vantaalta. Lahti Energia hyödyntää lämpöakkua kulutuksen vuorokausivaihtelun tasaamiseen. Kaukolämpöverkon syöttöveden lämpötila on vuodenajasta riippuen 65–115 °C ja paluuvesi 40–60 °C (Energiateollisuus 2023b). Veteen perustuvan kaukolämpövaraston käytössä oleva lämpötilaero on keskimäärin vain noin 40 °C, sillä veden varastointilämpötila on alle 100 °C normaalissa ilmanpaineessa ja lämmönvaihtimet tarvitsevat toimiakseen lämpötilaeron. Tämä johtaa suuriin varastotilavuuksiin, jotka vaihtelevat noin sadantuhannen ja miljoonan kuution välillä. Käytössä on vanhoja polttoainesäiliöitä, lämpöeristettyjä siiloja ja kallioon louhittuja lämpöluolia. Varastojen nimellispurkuteho kaupunkiverkossa on noin 100–200 MW ja energiaa riittää varaston koon mukaan muutamasta päivästä kuukausiin.

Teknologia itsessään on yksinkertainen, vettä kierrätetään pumppaamalla varastosäiliön ja lämmönsiirtimen välillä lataus- ja purkutilanteissa. Lämpö kerrostuu säiliöön tiheyden mukaan siten, että viilein vesi on pohjimmaisena. Lämmönvaihtimen toisella puolella on kaukolämpöverkko, jonka kanssa lämmönsiirto tapahtuu tarpeen mukaan. Lämpöä varastoidaan, kun tuotantoa on ylimäärin ja puretaan kulutuksen kasvaessa. Samalla vähennetään lämmön huipputehon tarvetta sekä sen aiheuttamia päästöjä ja kustannuksia. Kaukolämpövarasto mahdollistaa myös hukkalämmön laajamittaisen talteenoton esimerkiksi ilmastointilaitteista, datakeskuksista ja jätteenpoltosta. Havainnekuva luolalämpövaraston liittämisestä kaukolämpöverkkoon on esitetty kuvassa 5. Vantaan Energian kaavailema miljoonan kuution lämpövarasto hyödyntää suunnitelman mukaan paineistettua vesitilavuutta ja

lämpöpumppua. Veden varastointi 140 °C lämpötilassa mahdollistaa 200 MW purkutehon ja 90 GWh lämpökapasiteetin. Lämpövaraston pitkän aikavälin energiatehokkuuden arvioidaan olevan noin 85 %. (Vantaan Energia 2021)



Kuva 5. Luolalämpövaraston liittäminen kaukolämpöverkkoon (Vantaan Energia 2021)

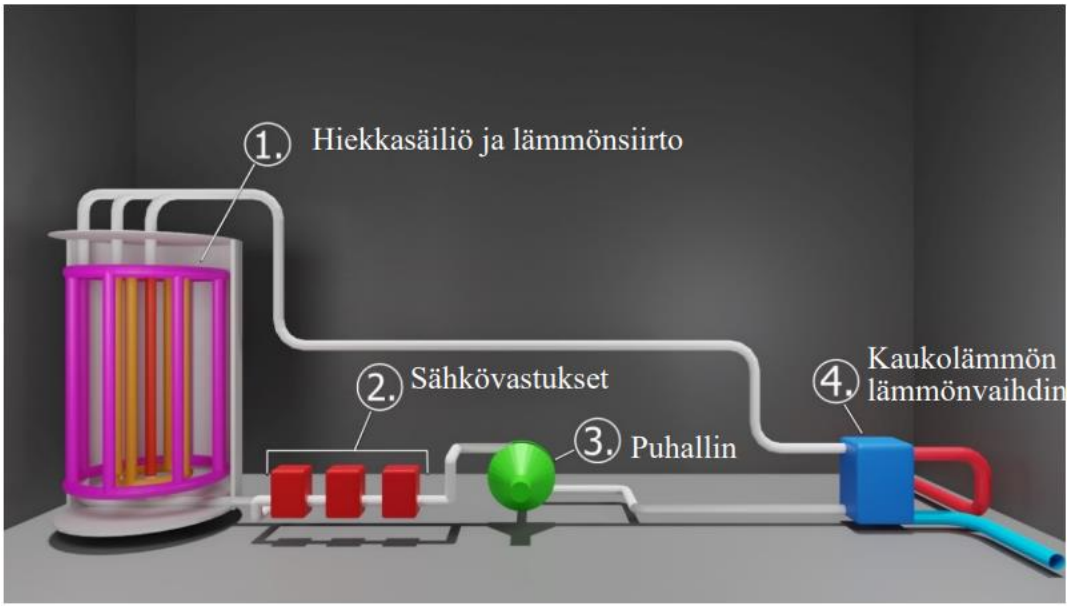
3.3 Lämmön varastointi hiekkaan

Kuiva hiekka poikkeaa vedestä lämmön varastointimateriaalina monessa suhteessa. Suurin haaste on lämmönsiirto tavallisen hiekan heikolla 0,27 W/mK lämmönjohtavuudella. Hiekkalämpövaraston lataamiseen ja purkamiseen tarvitaan lisäksi erillistä lämmönsiirtoainetta, mikä monimutkaistaa prosessia. Toisaalta hiekan 1515 kg/m^3 tiheys ja 800 J/kgK ominaislämpökapasiteetti mahdollistavat suuren varastointikapasiteetin. Suurin etu on hiekan lämpöstabiilius, joka on seurausta huomattavan korkeasta sulamispisteestä. Käytännössä hiekan lämpötilaa rajoittavat varaston muut materiaalit. Tämän takia hiekkalämpövarastolla voi olla vesilämpövarastoa merkittävästi suurempi tehotiheys. Hiekkalämpövaraston toteutukseen on kehitetty kolme kilpailevaa teknologiaa, jotka esitellään seuraavaksi.

3.3.1 Hiekka-akku

Hiekkalämpövarastot ovat maailmalla vielä harvinaisia. Ensimmäinen suuren kokoluokan hiekka-akku valmistui Kankaanpäähän kesällä 2022 Polar Night Energy Oy:n toimesta. Akku koostuu lämpöeristetystä teräsrakenteisesta siilosta, joka on täytetty hiekalla ja

lämmönsiirtoputkilla. Hiekan massa on noin 100 tonnia ja enimmäislämpötila 600 °C. Heikon lämmönjohtavuuden takia akun hiekka ei ole tasalämpöistä. Lämpötilaerot johtavat matalampaan keskilämpötilaan, mutta varaston reunojen viileämpi hiekka toimii osaltaan lämpöeristeenä. Näin ollen akku voi toimia GWh-kokoluokassa 95 % hyötysuhteella noin viikon varastointiajalla. Varastoa ladataan putkistoissa kiertävällä normaalipaineisella ilmalla, jota lämmitetään säädettävillä yli 200 kW sähkövastuksilla noin kahden viikon sykleissä. Latausvaiheessa virtaus ohjataan säätöpelleillä varaston keskiosaan ja purkuvaiheessa varaston reunoille, jolloin suurin osa lämmöstä saadaan talteen. Vastuksia ei valmistajan mukaan tarvitse vaihtaa, kunhan niiden lämpötila pysyy alle 700 °C. Lämpövaraston pääkomponentit on esitetty kuvassa 6. Kankaanpään hiekka-akun 8 MWh kapasiteetti huomio nollatasoksi määritellyn kaukolämpöveden lämpötilan mahdollistaen noin 40 tunnin yhtäjaksoisen kaukolämmöntuotannon lämmönvaihtimen kautta. (Polar Night Energy 2022 & Eronen 2023)



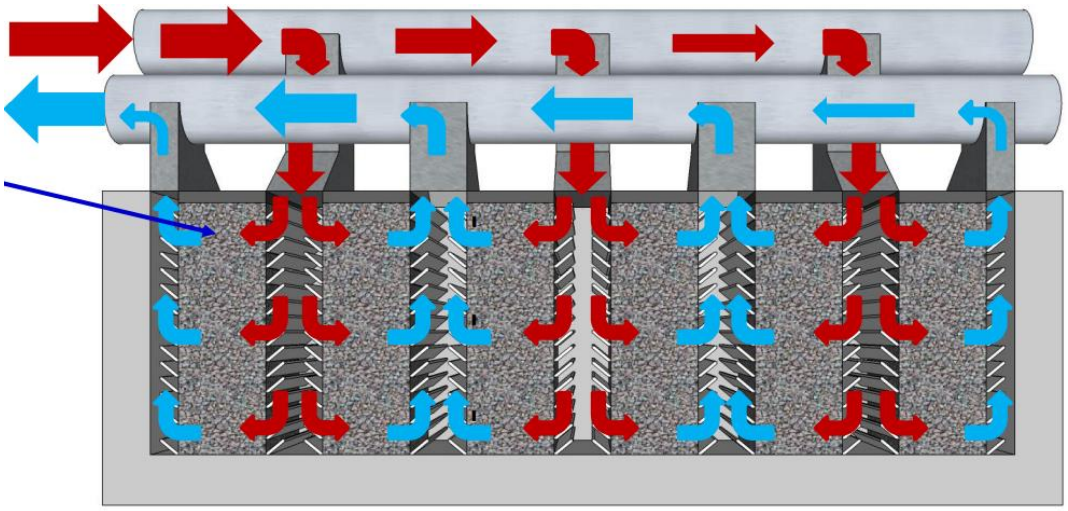
Kuva 6. Kankaanpään hiekkalämpöakun toimintaperiaate ja komponentit (Hurttila 2022)

Hiekka-akulla voidaan varastoida lämpöä kuukausien ajan, mutta se olisi järkevää vain suuressa kokoluokissa. Tavallisessa käytössä varaston on tarkoitus hyödyntää jaksollisesti vaihtelevan tuulivoimantuotannon aikaansaamat hinnanvaihtelut. Tämä johtaa varaston kapasiteetin ja käyttötarkoituksen mukaan 20–200 vuosittaiseen lataussykliin. Hiekka on edullinen varastointimateriaali, joka mahdollistaa teknologian 10 €/kWh investointikustannuksen jo 2MW/200MWh kokoluokassa sekä kymmenien vuosien käyttöiän. (Polar Night Energy 2022) Purkutehon lisääminen nostaa kustannuksia kasvavan lämmönsiirtopinta-alan tarpeen vuoksi. Polar Nightin toimitusjohtaja Tommi Erosen mukaan suuruusluokka olisi suurissa

lämpövarastoissa 0,3 M€/MW. Toisin kuin vesilämpövarastoissa hiekka-akussa ei tapahdu vuotoja tai sisäisiä häviöitä kuuman ja kylmän massan välillä, jolloin akusta voidaan tehdä matalampi. Tulevaisuudessa yritys aikoo monipuolistaa teknologiaansa mahdollistamalla teollisuushöyryn tuottamisen, kaukokylmän varastoinnin ja energian purkamisen sähkönä. Myös vesihöyryn käyttöä lämmönsiirron väliaineena pohditaan, jos varastointimateriaalin lämmönsiirtoa saadaan parannettua. (Polar Night Energy 2022 & Eronen 2023)

3.3.2 ORCTES

Saksalaisyhtiö STORASOL GmbH myy Enolcon GmbH:n kehittämää korkean lämpötilan varastointiratkaisua. Kyseessä on modulaarinen rinnakkain kytketty hiekkakennosto, jonka kerrosten läpi puhalletaan ilmaa tai muuta kaasua lataus- ja purkutilanteissa. Verrattain ohuiden hiekkakerrosten vuoksi puhaltimen omakäyttö on alle prosentin purkutehosta. Hienojakoinen hiekka vastaanottaa ja vapauttaa lämpöä tehokkaasti 2000 m^2/m^3 konvektiopintaalalla. Lämpövaraston nykyinen enimmäislämpötila on suomalaisen hiekka-akun tavoin 600 ^{o}C. Lämpövaraston toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 7. Hiekkakennoston napoihin kytketään kaksi kaasukanavaa, joissa virtaavan kaasun suuntaa muutetaan lataus- ja purkuvaiheiden välillä. Merikontin kokoinen ORCTES-prototyyppilaitos on ollut toiminnassa Bayreuthin yliopistossa vuodesta 2015 lähtien. Sen 10 tuhannen kilon hiekkamassan lämpökapasiteetti on 1,5 MWh, lataus- ja purkuteho 1,85 MW, hyötysuhde yli 90 % sekä täyden kapasiteetin vasteaika 15–30 sekuntia. (STORASOL 2022)

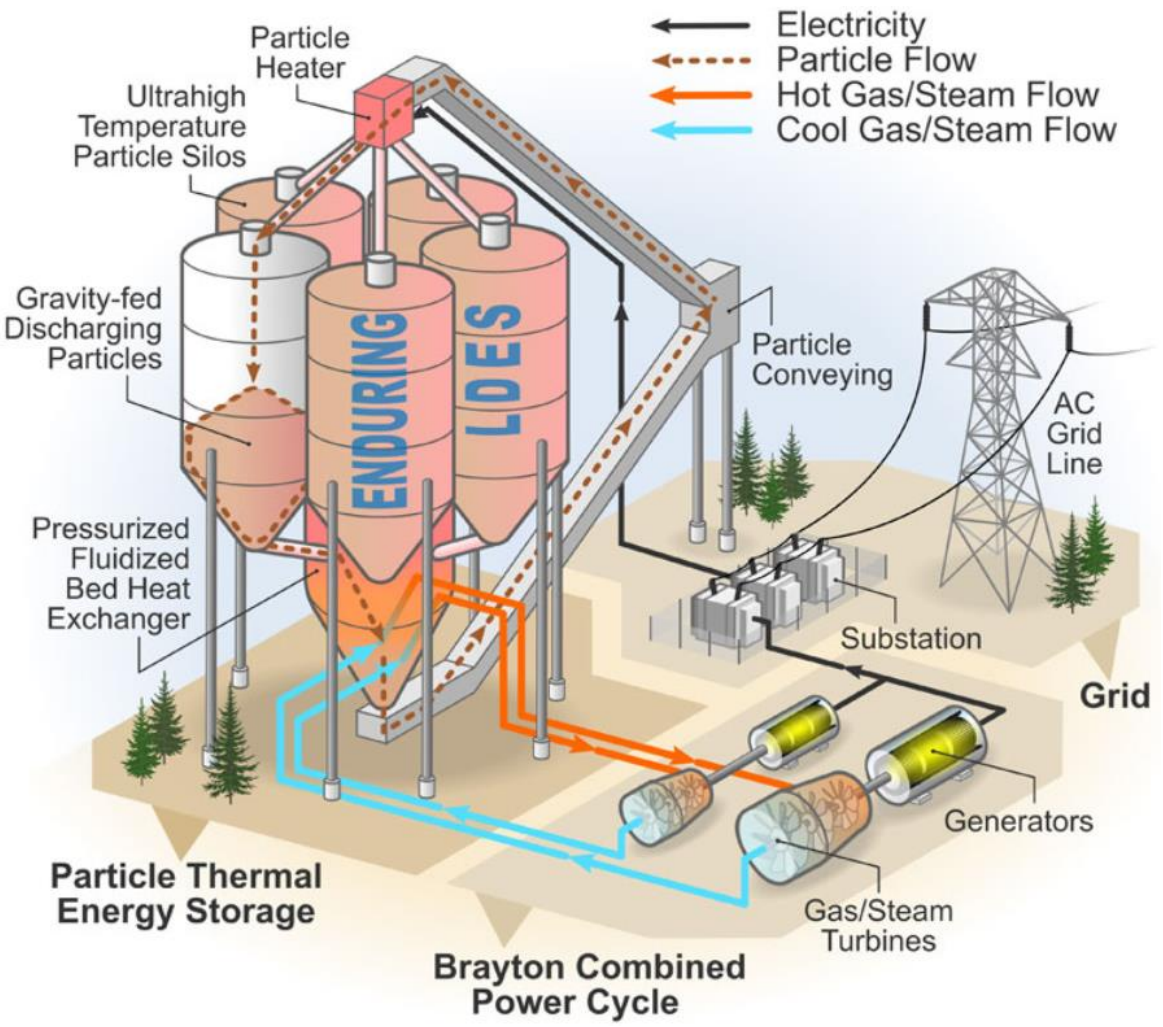


Kuva 7. ORCTES-lämpövaraston toimintaperiaate (STORASOL 2022)

Nimi ORCTES viittaa orgaanista Rankine-kiertoa hyödyntävään lämpövarastoon. Varastoon liitetyt kaasuputket yhdistyvät lämmönvaihtimessa, joka siirtää lämmön ORC-prosessiin. Sen toimintaperiaate on sama kuin perinteisellä höyryvoimalaitoksella, mutta vesihöyry on korvattu alemman höyrystymislämpötilan kiertoaineella. Näin sähköä voidaan tuottaa pienemmällä lämpötilaerolla, mutta myös hyötysuhde laskee. Varastoitava lämpö tuotetaan prototyyppilaitokselle kaasupolttimella, joka simuloi keskitetyn aurinkolämpölaitoksen toimintaa. (Schlipf et al. 2017) Yrityksen pidemmän aikavälin tavoite on yhdistää lämpövarasto kaasuturbiineista tuttuun Brayton-prosessiin, jolla voidaan saavuttaa teoriassa 87 % ja realistisen arvion mukaan yli 66 % sähkön varastoinnin hyötysuhde. Haasteena on löytää korkeita lämpötiloja ja paineita kestävä kompressori ja turbiini. (Schneider et al. 2020, 28–30)

3.3.3 ENDURING

Myös yhdysvaltalainen uusiutuvan energian tutkimusorganisaatio NREL kehittää omaa versiotaan hiekkalämpövarastosta, joka kulkee nimellä ENDURING. Projektin tavoitteena on rakentaa 26 GWh lämpövarasto, joka kykenee syöttämään sähköä kantaverkkoon 130 MW teholla yhtäjaksoisesti neljän päivän ajan. Varastointikustannusten tulisi olla alle 2,5 c/kWh ja käyttöiän yli 30 vuotta. Kuvassa 8 esitetyn konseptin mukaan itse kuuma hiekka toimii lämmönsiirtoaineena painovoiman vaikutuksesta. Järjestelmässä noin 90 metriä korkeat betonisiilot täytetään hiekalla, joka on kuumennettu sähkövastuksilla 1200 ^{o}C lämpötilaan. Suuren sähkön kysynnän aikaan eristetyistä siiloista lasketaan hienojakoista hiekkaa paineistettuun kuplapetilämmönvaihtimeen, jossa se lämmittää lämmönsiirtoaineena käytettävää ilmaa. Kuumennettu ilma pyörittää kaasuturbiinia ja siihen kytketty generaattori tuottaa sähköä. Ilman mukaan tarttuvat hiekkapartikkelit poistetaan sentrifugisesti ennen turbiinia. Siilon pohjalla 300 ^{o}C lämpötilaan viilentynyt hiekka puolestaan kuljetetaan takaisin siilon yläosaan eristetyissä nostimissa, joiden omakäyttö vie noin 1–4 MW. Projekti on siirtymässä laboratoriosta pilottivaiheeseen rahoituksen varmistuttua. (SolarPACES 2022)



Kuva 8. ENDURING-hiekkalämpövaraston toimintaperiaate (NREL 2021)

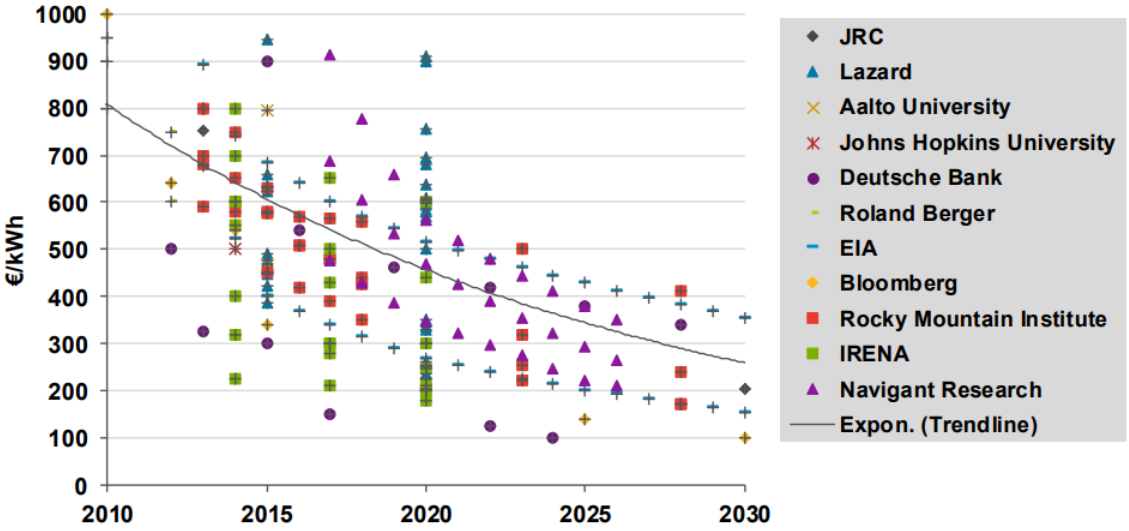
3.4 Muut varastointiratkaisut

Seuraavaksi käsitellään lämpövarastojen kanssa kilpailevia energian varastointiratkaisuja, joilla on merkittävä potentiaali tulevaisuuden hiilineutraalin energiajärjestelmän tasapainotuksessa. Näihin lukeutuvat muun muassa akkuvarastot, kemialliset Power-to-X varastot sekä sulametalli- ja virtausakut. Yleisesti ottaen lämpövarastot ovat muita varastointityyppejä edullisempia, mutta sähkö on lämpöä monikäyttöisempää.

3.4.1 Akkuvarasto

Akut ovat tällä hetkellä nopeimmin kasvava energian varastoinnin muoto. Kasvu perustuu lisääntyvän tuotantokapasiteetin ja kysynnän aikaansaamaan hintojen laskuun. Johtavien

tutkimusorganisaatioiden ennusteet hajautettujen ja teollisen kokoluokan litiumioniakkuvarastojen investointikustannusten kehityksestä on esitetty kuvassa 9. Litiumioniakut kehitettiin alkujaan kannettavaan kokoluokkaan, josta ne ovat kasvaneet modulaarisesti suuremmiksi. Suurin etu on muita akkutyyppejä korkeampi energiatiheys, joka tekee niistä otollisen vaihtoehdon sähköautoihin. Vaikka suurin osa markkinasta keskittyy edelleen liikenteeseen, ovat myös stationääristen akkuvarastojen kapasiteetit kasvussa vaihtelevan sähköntuotannon yleistyessä. Akkuvarastojen käyttö rajoittuu korkeintaan muutaman tunnin purkuajan vuoksi sähköverkon lyhytaikaiseen tehotasapainon ylläpitoon. (BATSTORM project 2018, 1–3)



Kuva 9. Johtavien tutkimusorganisaatioiden ennusteet kiinteästi asennettavien litiumioniakkujen hintakehityksestä (CAPEX) vuoteen 2030 (BATSTORM project 2018, 3)

Litiumioniakut ovat joukko akkukemioita, jotka johtavat erilaisiin ominaisuuksiin ja käyttötarkoituksiin. Suurin osa akuista käyttää anodimateriaalina grafiittia, mutta katodimateriaaliksi voidaan valita varausta elektrodien välillä kuljettavaan litiumiin perustuvia akkukemioita kuten litium-nikkeli-mangaani kobolttioksidia (NMC), litium-nikkeli-koboltti alumiinioksidia (NCA) tai litium-rautafosfaattia (LFP). Sähköautoissa käytetään erityisesti käytössä vähiten lämpeneviä NMC tai pidemmän kantavan NCA akkuja, kun taas LFP akut soveltuvat lähinnä kiinteisiin asennuksiin pienemmän energiatiheyden vuoksi. Seuraavaa läpimurtoa akkuteknologiassa odotetaan solid-state-akuilta, joissa nestemäinen elektrolyytti korvataan kiinteällä paremman energiatiheyden ja käyttöturvallisuuden saavuttamiseksi. Litiumakkujen haasteena on harvinaisten metallien kuten koboltin riittävyys. Ratkaisuksi toivotaan vanhojen akkujen entistä tehokkaampaa kierrätystä ja uusia innovaatioita. Koboltin käyttöä pyritään vähentämään korvaamalla sitä nikkelillä (BATSTORM Project 2018, 4–5)

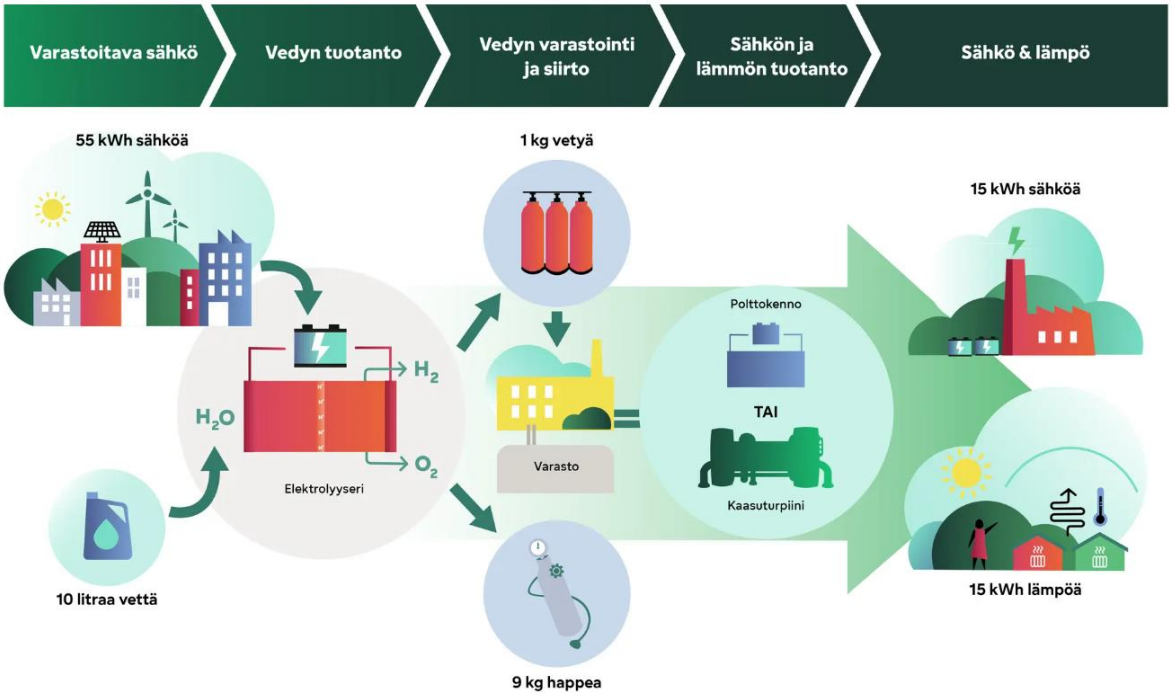
Litiumioniakkujen ohella toinen merkittävä teollisen kokoluokan kiinteä akkuratkaisu on natriumrikkiakku (NaS). Materiaaliensa puolesta NaS-akut ovat litiumioniakkuja edullisempia, eivätkä vaadi harvinaisia metalleja. Niiden mahdollistama purkuaika on litiumakkuja pidempi, eivätkä ne juuri menetä varaustaan varastoinnin aikana. NaS-akut eivät myöskään tarvitse jäähdytystä, mikä johtaa turvallisempaa käyttöön. Ne kestävät 5000–10 000 täyttä lataussykliä verrattuna nykyisten litiumakkujen noin tuhanteen sykliin. Toimiakseen NaS-akun materiaalien tulee olla nestemäisiä, mikä tarkoittaa yli 300 °C käyttölämpötilaa. Akut on lämpöeristetty, mutta ne tarvitsevat ulkoista lämmitystä käyttölämpötilan saavuttamiseen ja lämpöhäviöiden korvaamiseen pidemmän varastoinnin aikana. Litiumakkujen noin 95 % hyötysuhde ja korkeampi energiatiheys tekevät niistä yleensä houkuttelevamman vaihtoehdon NaS-akkujen hyötysuhteen ollessa noin 80 %. (IRENA 2017, 67–97)

Molemmat akkuteknologiat toimivat nopealla, alle sekunnin vasteajalla ja palauttavat varastoimansa energian tasavirtana. Vaihtosuuntaajaa tarvitaan siis sekä varaston lataus- että purkuvaiheessa. NaS-akut ovat erityisen suosittuja Japanissa. Paikallinen energiayhtiö julkaisi vuoden 2022 lopussa uuden 11,4MW/69,6MWh akkuprojektin, joka rakentuu vanhaan LNG terminaaliin. Vuonna 2025 valmistuva modulaarinen energiavarasto kykenee purkamaan energiaa verkkoon nimellisteholla yli kuuden tunnin ajan. (Toho Gas 2022) Vastaavasti Britanniassa vanhan kaasuvoimalaitoksen tiloihin on rakenteilla 50MW/100MWh litiumioniakku, jonka nimellispurkuaika on kaksi tuntia. Loppuvuodesta 2023 valmistuva projekti optimoi läheisen 242 MW tuulivoimalan tuotantoa 25 vuoden ajan. (Centrica 2022)

3.4.2 Power-to-X

Power-to-X tarkoittaa nimensä mukaisesti sähkö muuntamista johonkin toiseen muotoon, kuten polttoaineiden kemialliseksi energiaksi, materiaaleiksi tai lämmöksi. Varastoitu energia voidaan myös palauttaa takaisin sähköksi. Yksinkertainen vetyyn perustuva energian varastointiprosessi on esitetty kuvassa 10. Uusiutuvalla sähköllä pilkotaan vettä vedyksi ja hapeksi elektrolyyserissä. Tuotettu vety varastoidaan paineistettuna tai nestemäisenä ja muunnetaan takaisin sähköksi polttokennolla tai kaasuturbiinilla. Kyseisen syklin hyötysuhde olisi kuitenkin vain 24–38 %, sillä elektrolyysit toimivat nykyisin 60–70 % hyötysuhteella. Vastaavasti polttokennojen ja kaasuturbiinien hyötysuhteet ovat 40–55 %. Vaikka vetyä voidaan varastoida pitkiäkin aikoja, hyötysuhde ei ole tällä hetkellä kilpailukykyinen muiden

energiavarastojen kanssa. Kokonaishyötysuhdetta voidaan parantaa 60–80 prosenttiin hyödyntämällä prosessissa syntyvää hukkalämpöä kaukolämpöverkossa. (Fortum 2020)

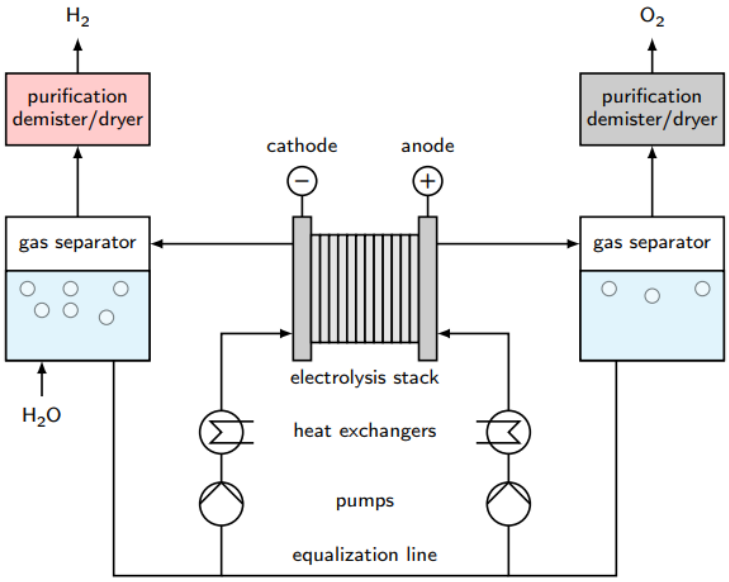


Kuva 10. Esimerkki vetyyn perustuvasta energiavarastojärjestelmästä (Fortum 2020)

Veden elektrolyysiin on nykyisin käytössä kaksi teollisessa mittakaavassa olevaa teknologiaa: alkalielektrolyysi ja protoninvaihtomembraani (PEM). Molemmat luokitellaan matalan lämpötilan menetelmiksi. Teknologisesti kypsempi alkalimenetelmä ei käytä harvinaisia metalleja. Siinä nikkelipäällysteiselle katodille syötetystä vedestä pelkistyvä vety ja anodilla muodostuva happi erotetaan membraanilla, jonka läpi negatiivinen OH-anioni kulkeutuu sähkövarauksen voimasta. Elektrolyyttinä toimii yleensä KOH-liuos, joka lisää veden sähkönjohtavuutta. PEM-menetelmässä kalvona on kiinteä ja kostutettu polymeeri, jonka läpi anodilla vedestä irtautuvat positiivisesti varautuneet protonit virtaavat. Prosessin katalyytteinä käytetään harvinaista platinaa ja iridiumoksidia. (Brauns & Turek 2020, 2–3)

Alkalielektrolyysereiden investointikustannukset ovat nykyisin 800–1500 €/kW tehden niistä edullisemman vaihtoehdon PEM-elektrolyysereiden maksaessa 1400–2100 €/kW. Lisäksi alkalimenetelmän käyttöikä on pidempi ja huoltokustannukset pienemmät. Toisaalta menetelmä on kehitetty tasaiseen vedyn valmistukseen, eikä se sellaisenaan sovellu uusiutuvan energian tuotannon tasaamiseen. PEM-menetelmän dynaamiset ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat lyhyen käynnistymisajan ja laajan tehoalueen vuoksi. Alkalimenetelmän kuormitusaluetta pyritään kuitenkin laajentamaan. Haasteena on erityisesti vedyn ja

hapen sekoittuminen anodilla, mikä on mahdollista kuvassa 11 näkyvän elektrolyytin tasauskierron kautta. Kaasujen epäpuhtaus lisääntyy, kun elektrolyyseriä käytetään pienellä teholla tai suurella paineella. Happi ja vety ovat räjähdysherkkiä yhdisteitä tilavuuskohtaisen konsentraation ylittäessä 4 %. Hätäpysäytyksen turvarajaksi onkin asetettu 2 %. Tämän vuoksi prosessin optimointi muuttuvilla kuormilla on tarpeen. (Brauns & Turek 2020, 2–8)



Kuva 11. Yksinkertaistettu prosessikaavio alkalielektrolyysistä (Brauns & Turek 2020, 4)

Kehitteillä on myös uusi anioninvaihtomembraani (AEM) elektrolyyseri, joka yhdistäisi alkali- ja PEM-menetelmien parhaat puolet. Siihen ei tarvita harvinaisia metalleja, dynaaminen vedyntuotanto on mahdollista korkean kaasupuhtauden ansiosta ja membraani kestää suuria paine-eroja johtaen korkeampaan tehotiheyteen sekä hyötysuhteeseen. AEM-elektrolyysi on kuitenkin vielä kehitysasteella. Haasteita on kemiallisessa ja mekaanisessa stabiiliudessa sekä membraanin johtokyvyssä. Markkinoille on tulossa myös 700–850 °C lämpötilassa toimiva kiinteiden oksidien menetelmä (SOEL). Korotettu prosessilämpötila laskee tarvittavan sähkön määrää mahdollistaen yli 100 % sähköhyötysuhteen. SOEL-menetelmällä prosessin reaktiosuuntaa voidaan vaihtaa, jolloin elektrolyyseri toimii polttokennona. Kennostoon on mahdollista syöttää veden lisäksi hiilidioksidia, jolloin reaktiotuotteena saataisiin teollisuudessa käytettyä synteesikaasua. Prosessin lämpökemiallisen kestävyyden kanssa on kuitenkin haasteita erityisesti tehotasoja muutettaessa, mikä johtaa lyhennettyyn käyttöikään. Ongelmia on myös tiivistemateriaalien kestävyydessä korkeilla paine-eroilla, mikä voi tuoda prosessiin epäpuhtauksia. Menetelmä on toistaiseksi rajoittunut kW-kokoluokkaan ja kehityksessä on mukana vain joitakin toimijoita. (IRENA 2020, 31–34)

Vety varastoidaan usein paineistettuna tai nesteytettynä, mutta myös vedyn sitominen orgaanisiin yhdisteisiin on mahdollista. Vedyn paineistaminen kaasuputkien 70 baariin tiivistää kaasun tilavuutta 65-kertaisesti ja varastointisäiliöiden 1000 baariin 625-kertaiseksi ilmakehän paineeseen verrattuna. Vedyn paineistus aiheuttaa häviöitä, jotka vaihtelevat mekaanisella kompressorilla vetyputkiston paineen kuudesta prosentista säiliöiden 16 prosenttiin alempaan lämpöarvoon suhteutettuna. Hyötysuhdetta voidaan parantaa esipaineistamalla vety 30 baariin elektrolyyserissä, jolloin vältytään noin kolmen prosenttiyksikön häviöiltä. Nesteytettynä vedyn kaasutilavuus pienenee kertoimella 870, mutta se vaatii lämpötilan pitämisen lähellä absoluuttista nollapistettä tyhjiöeristeellä. (IRENA 2020, 37)

Vedyn rooli päästöttömässä energiajärjestelmässä on nollata päästöjä sektoreilta, joihin suora sähköistyminen ei sovellu. Se mahdollistaa kansallisen polttoainetuotannon ja tasapainoisemman maailmanmarkkinan yhdessä uusiutuvien energialähteiden kanssa. Synteettisille polttoaineille on kysyntää paitsi lento- ja laivaliikenteessä myös teollisuudessa. (IRENA 2020, 16) Niiden valmistukseen tarvitaan vedyn lisäksi hiilidioksidia tai typpeä, joita voidaan suodattaa koneellisesti ilmasta tai savukaasuista. Näin jo olemassa olevan infrastruktuurin käyttö osana tulevaisuuden hiilineutraalia energiajärjestelmää olisi mahdollista.

Power-to-X kattaa myös sähkön muuntamisen lämmöksi. Uusiutuvan tuuli- ja aurinkovoiman osuus maiden energiantuotannossa on jatkuvassa kasvussa ja edulliselle ylijäämäsähkölle etsitään käyttökohteita. Sähkön käyttö lämmöntuotannossa on houkutteleva vaihtoehto, sillä se on usein edullista verrattuna muihin kulutuksen joustomahdollisuuksiin. Samalla voitaisiin lisätä uusiutuvan energian osuutta lämmöntuotannossa, joka pohjautuu monissa teollistuneissa maissa edelleen suurilta osin öljyyn ja maakaasuun. Tämä näkyy suurena primäärienergian kulutuksena esimerkiksi Saksassa hidastaen maan ilmastotavoitteiden toteutumista. Vaihtelevan sähköntuotannon liittäminen osaksi jatkuvaa teollista lämmöntuotantoa vaatii energiavarastoja, sillä kysyntä ja tuotanto osuvat vain osittain samoihin ajankohtiin. Sähkön muuntaminen lämmöksi on kannattavaa vain, jos uusiutuvaa sähköä on tarjolla riittävästi. Kaukolämmön tuotannossa sähköä voidaan hyödyntää esimerkiksi teollisilla lämpöpumpuilla tai sähkökattiloilla. (Bloess et al. 2018, 1611–1612)

Teolliset lämpöpumput ovat kehittyneet merkittävästi viime vuosina. Nykyisin myös matalan lämpötilan hukkalämpövirroista voidaan tuottaa jopa 130 ^{o}C kaukolämpövettä korkealla hyötysuhteella, jota kuvataan COP-kertoimella. Esimerkiksi 115 ^{o}C kaukolämpöä voidaan tuottaa sähköstä 2,1–3,9 kertaisella hyötysuhteella, kun jäähtyvän veden lämpötila on 5–55

°C. Lämpöpumput ovat myös modulaarisesti sarjaan kytkettäviä ja helposti säädettäviä, minkä vuoksi ne soveltuvat erinomaisesti kaukolämpöverkon tehotasapainon ylläpitoon sopivan lämmönlähteen löytyessä. Motivan selvityksen mukaan Suomen teollisuus voisi tuottaa lämpöpumpuilla vuosittain 16 TWh lämpöä kannattavasti hyödyntämällä omia hukkalämpöjään. Samalla voidaan vähentää polttamiseen perustuvan kaukolämmön tarvetta. Kuumalämpöpumpun takaisinmaksuaika on tyypillisesti 2–5 vuotta. Lämmityksen ohessa lämpöpumppu viilentää rakennusta vähentäen tarvetta erilliselle jäähdytykselle. (Calefa 2020)

Sähkökattilat ovat paineistettuja säiliöitä, jotka sisältävät vesitilavuuden ja kuvassa 12 näkyviä sähkövastuksia. Ne lämmittävät vettä kaukolämpökäyttöön tai tuottavat teollisuudessa tarvittavaa höyryä. Etuina perinteisiin apukattiloihin verrattuna ovat teknologian päästöttömyys, yksinkertaisuus, tasainen höyrylaatu sekä portaaton säädettävyys. (Power Mechanical 2022) Sähkökattiloiden investointikustannukset ovat lämpöpumppuja matalammat. Toisaalta myös hyötysuhde on heikompi. Tällöin sähkökattila on lämpöpumppua taloudellisesti parempi ratkaisu, jos vuotuiset käyttötunnit jäävät vähäisiksi. Sähkön pörssihinnan vaihdellessa kaukolämmön tuottaminen sähköllä voi ajoittain olla polttamiseen perustuvia laitoksia edullisempaa. (Schweiger et al. 2017) Sähkökattilat soveltuvat myös kaukolämpötehon nopeaan säätämiseen. Norjalaisen kattilavalmistajan mukaan tehoa voidaan säätää minimitehosta täyteen kuormaan alle 30 sekunnissa. Saman valmistajan sähkökattiloita on tulossa ainakin Seinäjoelle, Vaasaan, Espooseen ja Tampereelle. Niiden tehot vaihtelevat 13–60 MW välillä suunnittelulämpötilat ovat 183–212 °C, paine 10–19 baaria ja verkkoliitäntä 6,6–14,5 kV. (PARAT 2022) Investointikustannus 45 MW kattilalle on noin 3 miljoonaa euroa.

Kuva 12. Sähkökattilan lämpövastukset (Power Mechanical 2022)

3.4.3 Sulametalliakku

Sulametalliakun elektrodit ja elektrolyytti ovat nestemäisiä. Näin vältytään useimpien kiinteiden anodinmateriaalin kuten sinkin ja litiumin taipumuksesta dendriittikasvuun eli pinnalle muodostuvaan kiderakenteeseen, joka aiheuttaa turvallisuusriskejä. Nestemäinen akkurakenne mahdollistaa paremman kinetiikan eli jännitehyötysuhteen suurilla reaktionopeuksilla. Ne ovat immuuneja elektrodien rakennevaurioille, akkukomponenttien muotoja ei ole rajoitettu ja akun valmistuskustannukset ovat huomattavasti edullisemmat materiaalien yleisyyden ansiosta. Haasteita on kuitenkin ilmennyt matalan tehotiheyden, korroosioherkkyyden ja elektrolyyttien vahvan reaktiivisuuden kanssa, joka vaikuttaa akun sähkökemialliseen palautuvuuteen. Teknologia kehittyy nopeasti ja moniin haasteisiin on löytynyt ratkaisuja. Sulametalliakku koostuu kolmesta tiheyden mukaan jakaantuneesta kerroksesta: anodista, elektrolyytistä ja katodista sekä akun napoihin kytketyistä johtimista, jotka muodostavat virtapiirin. Materiaalien sulamispisteet vaikuttavat akun toimintalämpötilaan, joka vaihtelee huoneen lämmöstä satoihin asteisiin. (Zhang et al. 2021)

Kalsium on viidenneksi yleisin alkuaine maaperässä ja sillä on matala elektronegatiivisuus, joka johtaa korkeaan jännite potentiaaliin. Se onkin yleinen valinta sulametalliakun anodimateriaaliksi korkeasta sulamispisteestä ja liukoisuudesta huolimatta. Kalsiumin ominaisuuksia voidaan parantaa valitsemalla elektrolyytiksi useammasta kationista koostuva binäärinen sulasuola, jolloin liukoisuus vähenee ja akun käyttölämpötila laskee. Akkua purettaessa hapettuva anodi vapauttaa ioneita, jotka kulkeutuvat elektrolyytin läpi ja pelkistyy katodimateriaalissa neutraaliksi metalliksi katodimateriaalissa. Latausvaiheessa reaktio toimii käänteisesti. Sulametalliakku ei juurikaan menetä latauskapasiteettiaan muiden akkukemioiden tavoin. Akussa kuitenkin tapahtuu itsepurkautumista, sillä kalsiumin liukoisuutta ei voida kokonaan poistaa. Tällöin elektrolyytti muuttuu hieman sähköä johtavaksi vähentäen akun käytännöllistä varastointiaikaa. (Ouchi et al. 2016, 1–3)

Ambri on Massachusettsin teknillisestä yliopistosta alkunsa saanut yritys, joka valmistaa sulametalliakkuja kalsiumantimoni kemialla. Akun toimintalämpötila on 500 ^{o}C ja se on kehitetty alusta alkaen sähköverkon tehotasapainon ylläpitoon. Akut myydään kuvassa 13 näkyvissä 19 m^3 konteissa yksikkötehon ollessa 250 kW ja kapasiteetin 1000 kW. Hyötysuhteeksi luvataan yli 80 % ja vasteajaksi alle puoli sekuntia. Lämpöeristetyt kontit saatetaan käyttölämpötilaan integroiduilla vastuksilla ja varausta suositellaan purettavaksi päivittäin, jolloin

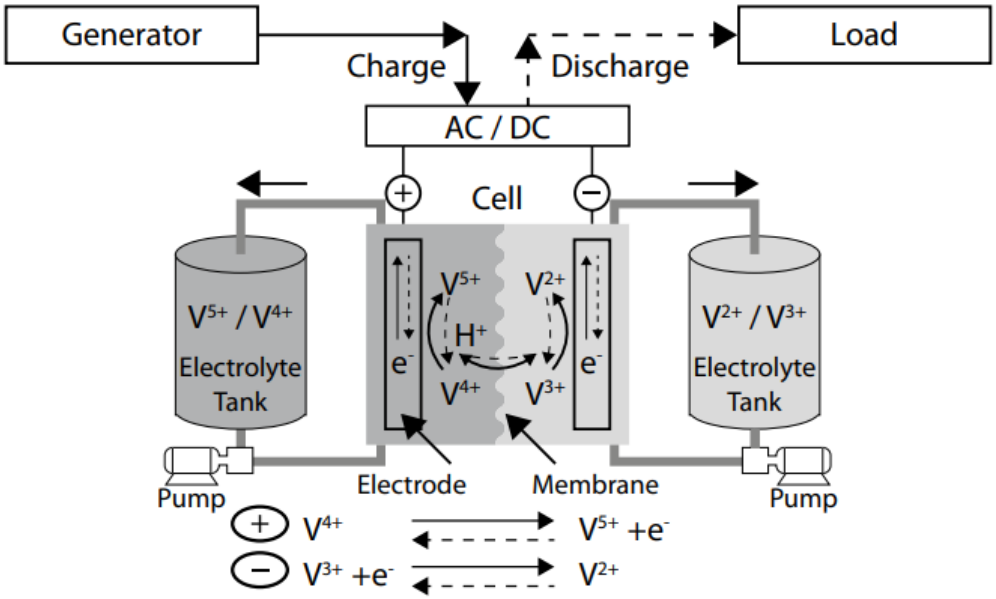
ulkopuolisen lämmitysenergian tarve on vähäistä. Kontteja ei tarvitse jäähdyttää tai huoltaa, mikä säästää kustannuksia ja mahdollistaa akkujen käytön ulkolämpötilasta riippumatta. Akku kestää hyvin ylilatausta ja sen käyttöikä on yli 20 vuotta vähäisellä kapasiteetin menetyksellä. Yhtiö on aloittamassa kaupalliset toimitukset tämän vuoden aikana, mutta yksikköhinta on toistaiseksi litiumakkuja korkeampi. Hintojen odotetaan laskevan tuotantokapasiteetin kasvaessa, jolloin sulametalliakuista tulisi 30–50 % edullisempia muihin akkukemioihin verrattuna vuoteen 2030 mennessä. Sulametalliakut ovat lisäksi turvallisia käyttää ja kuljettaa, sillä ne eivät sisällä palavia materiaaleja. (Ambri 2023)

Kuva 13. Sulametalliakkujen yksikkökoko ja rakenne (Ambri 2023)

3.4.4 Virtausakku

Virtausakuissa sähkökemiallisesti aktiiviset yhdisteet liuotetaan yleensä nestemäisiin anodi- ja katodielektrolyytteihin, jotka ovat erillisissä säiliöissä varastoinnin ajan. Akun lataus- ja purkuvaiheissa elektrolyytit pumpataan regeneraatio kennostoon, jossa palautuvat akkureaktiot tapahtuvat. Kennoston navat on kytketty vaihtosuuntaajan kautta sähköverkkoon, jossa elektrolyyttejä erottaa ioniselektiivinen kalvo. Esimerkki teknologisesti kypsintä vanadiini akkukemiaa käyttävästä virtausakusta on esitetty kuvassa 14. Virtausakkujen etuja ovat: tehon ja energiakapasiteetin erillinen skaalautuvuus, toiminta lähellä ympäristön lämpötilaa, yli 10 000 täyden lataussyklin käyttöikä, turvallisuus, säädettävyys ja mahdollisuus edullisiin materiaaleihin. Akuston tehoa voidaan kasvattaa lisäämällä reaktiopinta-alaa ja kapasiteettia suuremmilla elektrolyyttitankeilla. Turvallisuutta parantaa reaktiolämmön

poistuminen akkutilavuudesta virtauksen mukana. Toisaalta enintään 85 % yltävä hyötysuhde jää litiumakkua pienemmäksi ja virtausakut sisältävät muita akkutyyppejä enemmän huoltoa vaativia liikkuvia osia. Mahdollisesti happopitoisia elektrolyyttejä kierrätetään pumpuilla ja virtausta säädellään sensoreista saatavan datan avulla. Putkistovuotojen riskiin on varauduttava asianmukaisesti suunnitelluilla valvontatoimenpiteillä. (IRENA 2017, 86–88)



Kuva 14. Vanadiini virtausakun toimintaperiaate (IRENA 2017, 88)

Vanadiinin etuna on sen neljä erillistä hapetus tilaa, jotka mahdollistavat yksittäisen sähkökemiallisesti aktiivisen materiaalin käytön vähentäen riskiä tankkien ristikontaminaatioon. Ristikontaminaatio heikentää hyötysuhdetta ja voi johtaa prosessin palautumattomuuteen. Vanadiinielektrolyytti on lievästi hapan liuos, joka luovuttaa protoneita membraanin läpi 10–40 °C lämpötilassa. Lämpötila-aluetta rajaavat heikkenevä liukoisuus ja ei-toivottujen reaktioiden esiintyminen. Vanadiini virtausakkuja on asennettu teollisessa MW kokoluokassa ja niitä voidaan purkaa nimellisteholla yleensä 1–20 tuntia. Erillisissä tankeissa varastoidut elektrolyytit eivät menetä varaustaan ja ne voidaan kierrättää käyttöiän päätteeksi. Vanadiini on harvinainen metalli ja soveltuvat membraanikalvot arvokkaita. Akun energiatiheys on vain 25 Wh/l, kun litiumioniakuilla se on 200–700 Wh/l. (IRENA 2017, 88–89)

Sinkkibromi kemia mahdollistaisi noin 70 Wh/l energiatiheyden, korkeamman jännitepotentiaalin sekä edullisemman elektrolyyttimateriaalin. Vanadiumakun täysin nestemäisestä kemiasta poiketen sinkkibromi virtausakun bromi liukenee elektrolyyttiin kaasuna. Akku koostuu kahdesta elektrolyyttitilavuudesta, joiden välillä on huokoinen hiilimuovikomposiitti bromin aiheuttaman korroosion välttämiseksi. $ZnBr_2$-elektrolyytin sinkki ei ole täysin

liukoista ja se saostuu latausvaiheessa kiinteäksi kerrokseksi negatiivisen elektrodin pintaan. Akussa on yhden sijasta kaksi reaktiivista materiaalia: metallinen sinkki ja halogeeninen bromi, joiden hapetus- ja pelkistysreaktiot varastoivat energiaa. Muilta osin sinkkibromiakku toimii vanadiinikemian tavoin. Myrkyllinen ja korroosiota aiheuttava bromi edellyttää lisäaineiden käyttöä, joilla bromikaasun karkaaminen ympäristöön voidaan estää. Samalla akun itsepurkautuvuus vähenee. Verrattuna vanadium kemiaan sinkkibromi ei skaalaudu yhtä portaattomasti, sillä on lyhyempi käyttöikä, akku vaatii ulkoista jäähdytystä, hyötysuhde on pienempi ja itsepurkautuvuus on jopa 8–33 % päivässä. (IRENA 2017, 90–92)

Virtausakut kehittyvät jatkuvasti ja nykyisten kemioiden hyötysuhteiden odotetaan nousevan 60–85 prosentista 67–95 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä elektrodeja, virtausta ja kalvoa kehittämällä. Myös energiatiheys voi kasvaa kennorakennetta uusimalla. Virtausakkujen investointikustannukset ovat muita akkutyyppejä korkeammat, mutta niiden pitkä käyttöikä parantaa kilpailukykyä. Hintojen odotetaan laskevan lähes 70 % vuoteen 2030 mennessä, jolloin investointikustannukset olisivat 108–576 $/kWh. Vanadiumakkujen keskihinnan odotetaan olevan 120 $/kWh. Muita kehityssuuntia ovat vesipohjaisten elektrolyyttien ja epäorgaanisten materiaalien korvaaminen suolapohjaisilla ja orgaanisilla. Orgaanisilla elektrolyyteillä on parempi liukoisuus, stabiilius ja ne ovat epäorgaanisia elektrolyyttejä halvempia. Suolapohjaiset elektrolyytit puolestaan parantaisivat energiatiheyttä, koska niiden mahdollistama jännite ei rajoitu veden elektrolyysiin. (IRENA 2017, 92–95)

4 Hiekkalämpövaraston toteutus Kymijärvi I hiilikattilaan

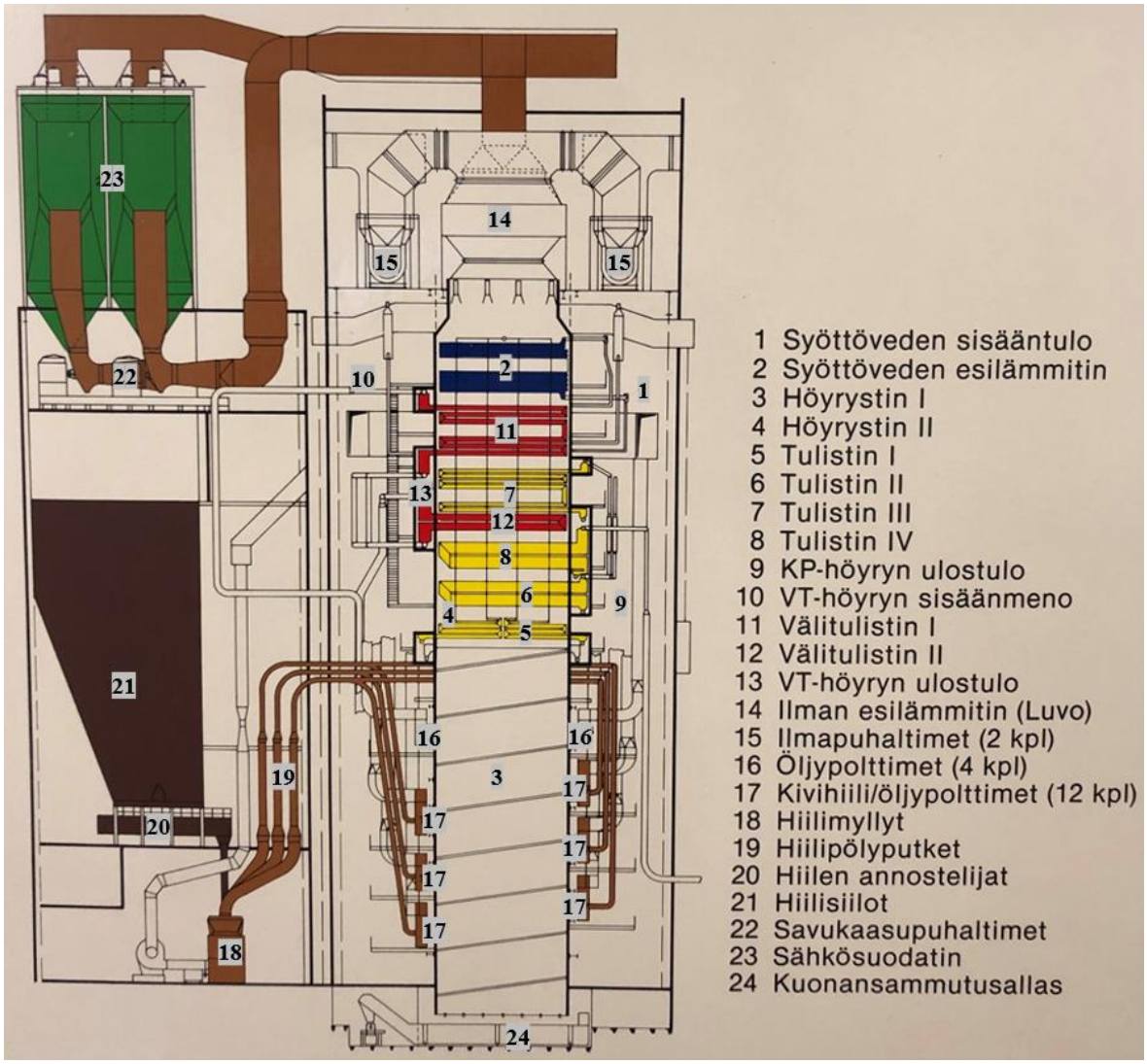
Kymijärvi I on vuonna 1975 valmistunut Benson-tyyppinen läpivirtauskattila. Alkujaan öljyä polttanut laitos muutettiin kivihiilikäyttöiseksi vuonna 1982. Osa polttoaineesta korvattiin myöhemmin kierrätyspolttoaineesta ja biomassasta valmistetulla tuotekaasulla. Voimalaitos suljettiin vuonna 2019 uuden biomassaa polttavan Kymijärvi III kiertopetikattilan aloittaessa kaupallisen toimintansa. Nykyisin vanha hiilivoimalaitos ei ole toimintakuntoinen ja se ollaan purkamassa. Tässä osiossa tarkastellaan kattilan soveltuvuutta hiekkalämpövarastoksi. Vanhan hiilikattilan toimintaperiaate ja rakenne esitellään lyhyesti. Tulipesän mahdollistama hiekan varastointikapasiteetti ja lämpötila selvitetään. Mahdollisen hiekkalämpövaraston lataus- ja purkuteho sekä lämpöhäviöt kartoitetaan laskennallisesti. Suuren kaukolämpöverkon takia varaston purkutehon tulisi olla vähintään 30 MW ja varastointiajan muutamia päiviä. Varaston ensisijainen käyttötarkoitus olisi kaukolämmön tuotannon säätely ja monipuolistaminen. Varaston tulisi olla myös pitkäikäinen ja huollettavissa.

4.1 Kymijärvi I kattilan rakenne ja toimintaperiaate

Läpivirtauskattiloissa vesihöyrykierron paine lähestyy kriittistä 221 baarin rajaa, jolloin veden tiheyserot pienenevät ja kiertovesipumppujen tarve kasvaa. Kattilan paineen kasvattaminen mahdollistaa suuremman lämpötehon ja hyötysuhteen. Ylikriittisessä paineessa veden neste- ja höyryfaasien välillä ei ole tiheyseroa eikä faasimuutos vaadi energiaa. Läpivirtauskattiloissa ei myöskään ole lieriötä, jolloin epäpuhtauksien ulospuhallus ei ole mahdollista ja veden tulee olla erityisen puhdasta. (Vakkilainen 2017, 9–13) Toisin kuin perinteisissä kattiloissa höyrystinputkien lämpötila ei pysy vakiona, mikä aiheuttaa lisärasitusta putkistoon. Tästä syystä putkien halkaisija on luonnonkiertokattiloiden höyrystinputkia pienempi. Läpivirtauskattiloita suositaan suurimmissa voimalaitoksissa, sillä niihin kuluu vähemmän terästä nimellistehoon suhteutettuna. Samalla laitoksen omakäyttöteho ja painehäviöt kasvavat. (Vakkilainen 2017, 66–70)

Kymijärvi I kattilan rakenne ja pääkomponentit on esitetty kuvassa 15. Vettä kierrätetään kolmen MW syöttövesipumpulla yhtenäistä vesilinjaa pitkin kattilan höyrystinputkista tulistimien kautta höyryturbiinille. Ensimmäisen turbiinivaiheen jälkeen höyry palaa kattilan

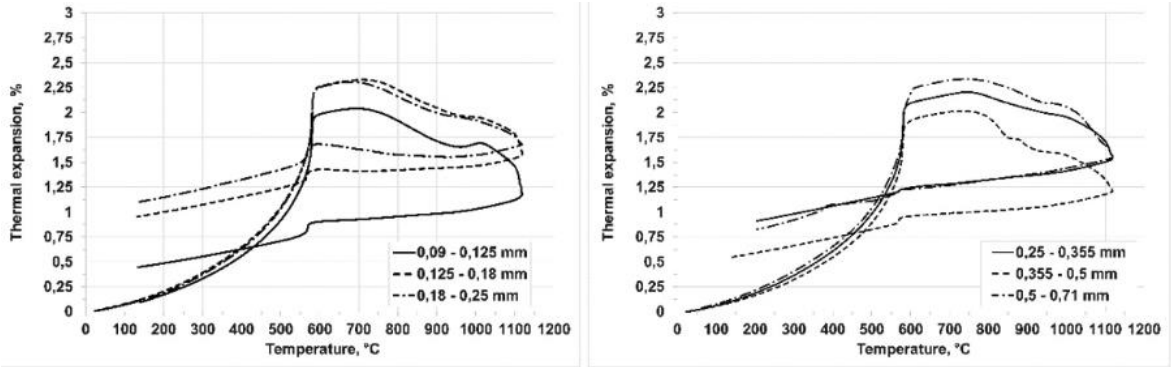
välitulistimeen ja paisuu edelleen muissa turbiinivaiheissa. Turbiinin jälkeen lauhtuva vesihöyry luovuttaa jäljellä olevaa energiaansa kaukolämpöverkkoon lämmönvaihtimessa. Uudelleen kiertoon tuleva syöttövesi esilämmitetään kattilassa ja ohjataan takaisin höyrystinputkiin. Kattilan suunnittelupaine on 192 baaria, lämpöteho 250 MW ja sähköteho höyryturbiinilta 130 MW. Pääpolttoaineena käytetty kivihiili johdetaan siilosta hiilimyllyyn, jossa se murskataan hienoksi pölyksi palamisen tehostamiseksi. Hiilipöly syötetään tulipesään pneumaattisesti hiilipölyputkien ja pölypolttimien kautta. Kattilassa ei ole takavetoa, vaan savukaasut virtaavat lämmönsiirtopintojen läpi sähkösuotimelle ja puhdistuksen jälkeen savupiippuun. Esilämmitettyä palamisilmaa syötetään kattilaan useammassa vaiheessa palamisen optimoimiseksi ja yli-ilma poistuu kattilasta savukaasujen mukana. Poltossa syntyvä kuona poistetaan kattilan pohjalta kuljettimia pitkin kontteihin ja hävitetään asianmukaisesti.



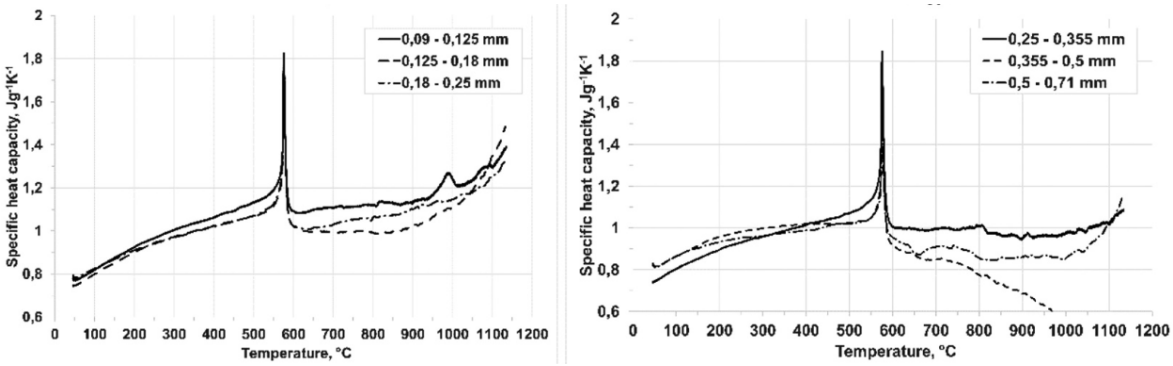
Kuva 15. Kymijärvi I hiilikattilan rakenne ja pääkomponentit

4.2 Varastointi kapasiteetti

Lämpövaraston kapasiteetti riippuu käytetyn varastointimateriaalin massasta, ominaislämpökapasiteetista sekä käytössä olevasta lämpötilaerosta, kuten kappaleessa 2.2 todettiin. Massa voidaan määrittää varaston tilavuuden ja materiaalitiheyden tulona. Varastointimateriaaliksi valikoituneen yleisen kvartsihiekan ominaislämpökapasiteetti ja tilavuus muuttuvat epälineaarisesti lämpötilan funktiona kuvien 16 ja 17 mukaan. Hiekan kvartsirakenne muuttuu ensimmäisen kerran 573 °C ja uudelleen noin 750 °C lämpötilassa. Kiteiden rakenteelliset muutokset ovat palautumattomia ja lämpölaajeneminen on vähäisempää muilla lämmityskerroilla. Kiderakenteen muutokset näkyvät piikkinä myös ominaislämpötilan kuvaajissa, sillä niihin kuluu runsaasti energiaa. (Svidró et al. 2020) Tilavuuden muutokset sekä hiekan aikaansaama hydrostaattinen paine aiheuttavat rasituksia kattilarakenteeseen. Lisäksi rakenteen kannatinpalkkien tulisi kestää hiekasta aiheutuva lisäpaino.



Kuva 16. Kvartsihiekan lämpölaajeneminen hiukkaskoon mukaan lämpötilan funktiona (Svidró et al. 2020)



Kuva 17. Kvartsihiekan ominaislämpökapasiteetin muutos lämpötilan funktiona (Svidró et al. 2020)

4.2.1 Tilavuus ja massa

Kymijärvi I kattilan 2100 m^3 tulipesä muodostuu 7 ja 10 metrin levyisistä sekä noin 30 metriä korkeista höyrystinputkiseinistä. Muut lämmönsiirtopinnat sijaitsevat tulipesän yläpuolella. Hiekan tiheyden ollessa 1515 kg/m^3 sen massaksi saadaan lähes 3200 tonnia. Käytön aikaisen lämpölaajenemisen takia kattila roikkuu teräsrakennelman tukipalkeista. Yhtälön 5 mukaan tulipesän täyttäminen hiekalla lisäisi palkkien kuormitusta 31 MN, johon ei ole suunnitteluvaiheessa varauduttu (Mäkelä et al. 2019, 91). Painoa voitaisiin kompensoida poistamalla muita lämmönsiirtopintoja. Tämä ei kuitenkaan riitä, sillä niiden yhteispaino olisi vain kymmeniä tonneja. Lisäksi hiekka aiheuttaa kattilan seiniin kohdistuvan lineaarisesti kasvavan hydrostaattisen paineen, jonka suuruus olisi enimmillään 446 kPa yhtälön 6 mukaan (Mäkelä et al. 2019, 99). Tämä ylittää kattilan kestämän 50 millibaarin paineen lähes 90-kertaisesti. Kuvan 16 jäähtymiskäyristä hiekan lämpölaajenemiskertoimeksi saadaan 4,85–6,8 µm/mK, kun vastaava kerroin teräkselle on noin 10,8–12,5 µm/mK. (Engineering ToolBox 2003) Metalli siis laajenee hiekkaa enemmän erityisesti myöhemmillä lämmityskerroilla, jolloin hiekan määrää olisi mahdollista lisätä. Kattilan muuttaminen lämpövarastoksi edellyttäisi kuitenkin merkittäviä rakenteellisia muutoksia.

$$F_g = mg \tag{5}$$

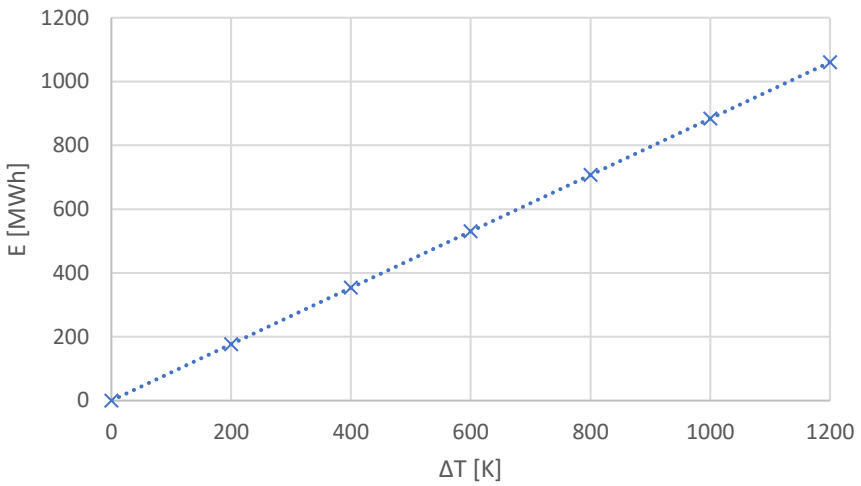
$$p = \rho g h \tag{6}$$

Missä F_g on painovoima [N], m massa [kg], g painovoimakiihtyvyys [m/s^2] p on hydrostaattinen paine [Pa], ρ tiheys [kg/m^3], h syvyys [m].

4.2.2 Lämpötila

Kymijärvi I kattilan tulipesä on kestänyt hiilipölyn polttamisen korkeita 1300–1400 °C palamislämpötiloja. Käytön aikana seinämien höyrystinputkistoissa virtaava vesihöyry viilentää putkipintoja, jolloin niiden materiaalikestävyyden kriittinen raja ei ylity. Vesihöyryn jatkuva virtaus kuitenkin purkaisi varaston latausta. Tulipesä ei itsessään aseta suoria rajoituksia hiekan lämpötilalle, mutta varastoitava lämpömäärä on tuotava hiekkamassaan. Mikäli tähän käytetään hiekan sisällä kulkevia metalliputkia Kankaanpään varaston tapaan, hiekan enimmäislämpötila on noin 600 °C. Suoraan hiekkaan sijoitettavat lämpövastukset

puolestaan kestäisivät noin 1200 °C lämpötiloja. Kaukolämpöveden ollessa sata asteista teoreettinen lämpötilaero olisi 500–1100 astetta. Käytännössä kapasiteetin suuruuteen vaikuttava lämpötilaero olisi tätä pienempi, sillä hiekkaan muodostuu lämpötilagradiantteja heikon lämmönsiirtokertoimen takia. Kuvasta 17 luetulla 1000 J/kgK keskimääräisellä ominaislämpökapasiteetilla varaston kapasiteetti olisi arviolta 350–900 MWh. Yhtälöstä 1 laskettu lämpökapasiteetin lineaarinen kasvu lämpötilaeron funktiona on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Varastointikapasiteetin kasvu lämpötilaeron funktiona ($m = 3181{,}5$ tonnia & $c_p = 1000\ J/kgK$)

4.3 Lämpöakun lataaminen

Lämpöakun lataamiseen tarvitaan suuri lämpömäärä korkeassa lämpötilassa. Voimalaitosympäristössä prosessihöyry ja savukaasut voisivat soveltua käyttötarkoitukseen. Niiden energiaa hyödynnettäisiin hiekan sisällä kulkevan putkiston avulla. Höyryn painetta tulisi kuitenkin laskea putkiston materiaalikustannusten takia ja nykyistä tuotantoa lisätä, sillä ylijäämähöyryä olisi saatavilla lähinnä kesäkaudella matalan kaukolämpökysynnän vuoksi. Voimalaitosten tuottamien savukaasujen lämpö hyödynnetään tehokkaasti, jolloin sitä ei riitä varastoitavaksi. Lisäksi savukaasut altistaisivat putkiston kuumakorroosiolle, johon tulisi varautua arvokkaammilla korkeaseosteisilla teräksillä (Vakkilainen 2017, 185–186). Vaihtoehdoksi lämmön tuottamiseen jää sähkön muuntaminen lämmöksi vastuksien avulla.

Sähkövastukset voidaan asentaa kiinteästi hiekan sisään tai lämmittämään putkistoissa kiertävää lämmönsiirtofluidia hiekkatilavuuden ulkopuolella. Kiinteästi hiekan joukkoon asetetut lämpövastukset muuntaisivat sähköä lämmöksi sähkökattiloiden tavoin käytännössä 100 % hyötysuhteella. Toisaalta korkean lämpötilan vastukset tulisi vaihtaa ajoittain, jolloin

hiekkaa joudutaan jäähdyttämään ja poistamaan huoltotöiden ajaksi. Hiekan luontainen resistiivisyys saattaa myös rajoittaa vastuksen tehoa ylikuumenemisriskin takia. Ulkoisessa asennuksessa vastukset voitaisiin aina vaihtaa tarpeen mukaan, mutta pieni osa latausvaiheen lämmöstä menetetään häviöinä. Hybridiratkaisu, jossa vain osa vastuksista on hiekan sisällä, on myös mahdollinen. Hiekan sisäiset lämpövastukset nostaisivat varaston lämpötilapotentiaalia erityisesti varaston keskiosassa, josta lämpö johtuisi hiljalleen kohti reunoja. Samalla varaston latauspotentiaalia voidaan kasvattaa suhteessa purkutehoon, mikä helpottaisi sähkön markkinahinnan muutosten hyödyntämistä. Varaston täysi lataaminen kolmessa päivässä vaatisi Kymijärvi I tulipesän kapasiteetin mukaan 5–12,8 MW sähkötehoa.

Lämpö tulisi jakaa hiekkamassaan symmetrisesti kattilan ylimääräisten rasitusten välttämiseksi. Stationäärisessä hiekassa tämä tarkoittaisi tiheää lämmönsiirtoputkistoa tai lämpövastusverkkoa. Hiekan lämmönsiirto-ominaisuuksia voitaisiin parantaa liikuttelemalla hiekkaa varaston sisällä tai puhaltamalla ilmaa hiekkakerrosten väliin aiemmin esiteltyjen hiekkalämpövarasto konseptien tapaan. Ilman puhaltaminen hiekkamassan sisälle esimerkiksi jo olemassa olevilla puhaltimilla tehostaisi lämmönsiirtoa, mutta se vaatisi runsaasti energiaa suurten painehäviöiden takia. Lisäksi varasto menettäisi energiaansa, sillä kattilaan tuotu ilma tulee myös poistaa. Samat haasteet pätevät kuplapetikattiloille tyypilliseen hiekan leijutukseen, joka kuluttaisi lisäksi lämmönsiirtopintoja.

4.4 Varastointihäviöt

Lämpövaraston muoto, koko ja ulkoseinän lämpötila vaikuttavat häviöiden suuruuteen. Muodon ja koon vaikutusta voidaan havainnollistaa laskennallisesti varaston ulkopinta-alan suhteella tilavuuteen, sillä pinta-alan kasvaessa sekä säteilystä että luonnollisesta konvektiosta aiheutuvat lämpöhäviöt kasvavat. Kuutiolla kyseinen suhdeluku on kuusi ja saman halkaisijan sekä korkeuden omaavalla ympyrälieriöllä neljä. Sylinterin suhteelliset häviöt olisivat siten noin kolmanneksen pienemmät. Pallon pinta-ala on tilavuuteen nähden pienin suhdeluvulla kolme, mutta se on teknisesti hankala ja kallis toteuttaa. Varaston karakteristisen mitan kaksinkertaistuessa suhteelliset häviöt puolittuvat. Pallot ja sylinterit kestävät myös neliskanttisia säiliöitä suurempaa painetta samalla seinämänpaksuudella. Teknisistä syistä kaarevilla päädyillä varustettu sylinteri on käytetyin painesäiliögeometria, vaikka pallo kestäisi kaksinkertaisen paineen tavalliseen sylinteriin verrattuna. (Ibrahim et al. 2015)

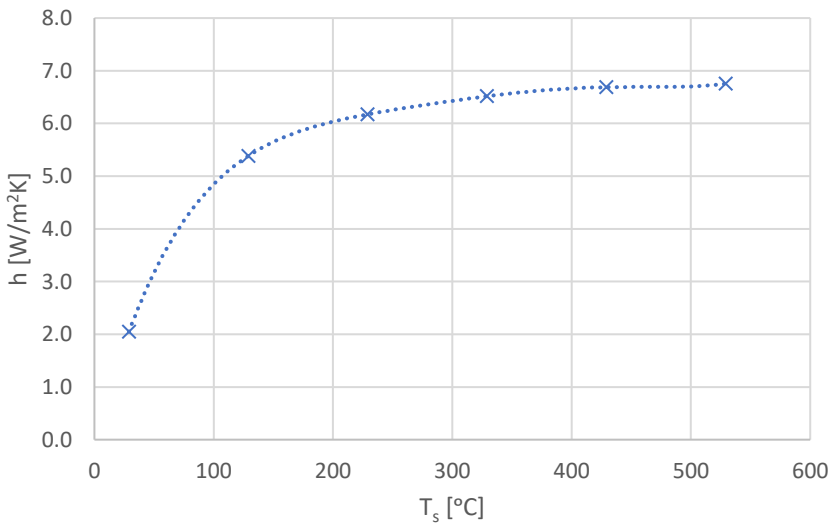
Lämpötilaerosta aiheutuva kattilan ulkoseinien luonnollinen konvektio voidaan laskea Newtonin jäähtymislaista kappaleessa 2.2.2 esitetyllä yhtälöllä 3. Tarvittava konvektiolämmönsiirtokerroin voidaan laskea ympäröivän ilman aineominaisuuksista ja kattilan karakteristisista mitoista yhtälöllä 7. Laskennassa käytetyt dimensiottomat Nusseltin ja Rayleighin luvut saadaan yhtälöillä 8 ja 9. (Incropera et al. 2017, 558–559) Konvektiolämmönsiirtokerroin ulkoseinän lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 19 ympäristön lämpötilan ollessa 25 °C. Vastaavasti säteilylämmönsiirto lasketaan yhtälöstä 4 olettamalla teräksen säteilykyvyksi 0,3. Kattilan lämpöhäviöt seinämän pintalämpötilan funktiona esitetään kuvassa 20.

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu_L} \cdot k}{L} \tag{7}$$

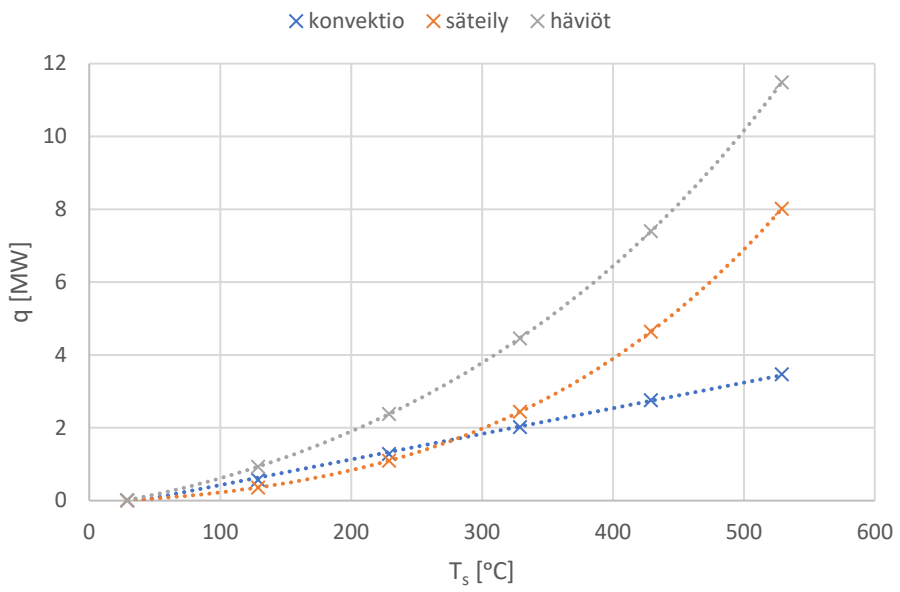
$$\overline{Nu_L} = \left\{0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{1/6}}{\left[1+\left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}\right\}^2 \tag{8}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha v} \tag{9}$$

Joissa h on konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K], Nu Nusseltin luku [-], k lämmönjohtavuus [W/mK], L karakteristinen pituus [m], Ra Rayleighin luku [-], Pr Prandtlin luku [-], g putoamiskiihtyvyys [m/s^2], β volumetrinen lämpölaajenemiskerroin [1/K], T_s pintalämpötila [K], T_∞ ympäristön lämpötila [K], α diffuusiokyky [m^2/s] ja v kineettinen viskositeetti [m^2/s].

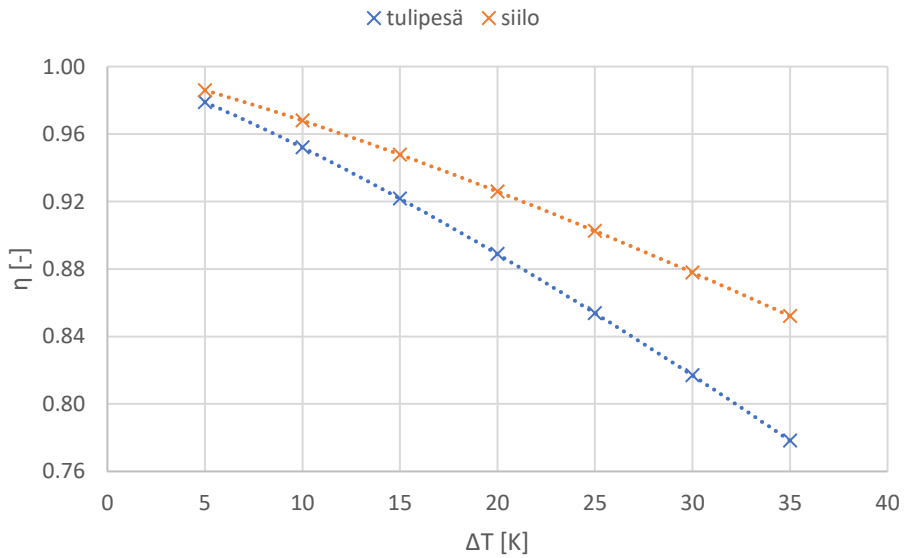


Kuva 19. Konvektiolämmönsiirtokerroin pintalämpötilan funktiona Kymijärvi I kattilan ulkoseinissä



Kuva 20. Lämpöhäviöt Kymijärvi I kattilan ulkoseinistä lämpötilan funktiona

Kuvan 20 mukaan säteilylämpöhäviöt kasvavat eksponentiaalisesti pintalämpötilan noustessa. Samalla luonnollisen konvektion häviöt kasvavat lineaarisesti. Häviöiden suuruuteen voidaan vaikuttaa paitsi riittävällä eristyksellä, myös hyödyntämällä hiekan materiaaliominaisuuksia varaston suunnittelussa. Varastointihyötysuhteen näkökulmasta pinnan tulisi olla mahdollisimman lähellä ympäristön lämpötilaa. Kuvassa 21 kattilan sekä vastaavan kokoisen siilon hyötysuhteet on esitetty vaihtelevilla lämpötilaeroilla, kahden viikon varastointiajalla ja 350 MWh kapasiteetilla. Varaston ulkopuolisissa putkissa ja lämmönvaihtimessa tapahtuvia häviöitä ei huomioida ja ympäristön lämpötilaksi on oletettu 25 °C.



Kuva 21. Hiekkalämpövaraston hyötysuhde lämpötilaeron funktiona

4.5 Lämpöakun purkaminen

Kymijärvi I kattilan tapauksessa vanhojen höyrystinputkien hyödyntäminen lämpöakun purkamisessa olisi ensisijainen vaihtoehto. Hiekan lämmönjohtavuudesta voi kuitenkin muodostua kaukolämpötehoa rajoittava tekijä. Höyrystinputkien konvektiolämmönsiirtokyky selvitetään yhtälöllä 10. Tarvittava Nusseltin luku saadaan Dittus-Boelterin yhtälöstä 11 sekä Reynoldsin ja Prandtlin luvut yhtälöillä 12 ja 13. (Incropera et al. 2017, 496–507) Lämmönsiirto lasketaan ilmalle, vedelle, vesihöyrylle ja aurinkolämpölaitoksista tutulle aurinkosuolalle. Nesteiden virtauksen keskinopeudeksi valitaan 4 m/s ja kaasuille 12 m/s. Höyrystinputkien paksuudeksi oletetaan 3,2 mm ja ulkohalkaisijaksi 31,8 mm. Kylläisen veden sekä normaalipaineisen ilman ja vesihöyryn ainekohtainen viskositeetti, tiheys sekä lämmönsiirtokertoimet luetaan taulukoista keskimääräisessä 127 °C lämpötilassa (Incropera et al. 2017, 925–933). Sulasuolan viskositeetti on saatavissa 290 °C ja tiheys sekä lämmönjohtavuus 565 °C lämpötilassa (Bonk & Bauer 2021, 16). Tulokset on koottu taulukkoon 2 ja höyrystinputkiston mahdollistama lämpövuo esitetään kuvassa 21.

$$h = \frac{k}{D_o} Nu_D \tag{10}$$

$$Nu_D = 0{,}023 Re_D^{4/5} Pr^{0{,}3} \tag{11}$$

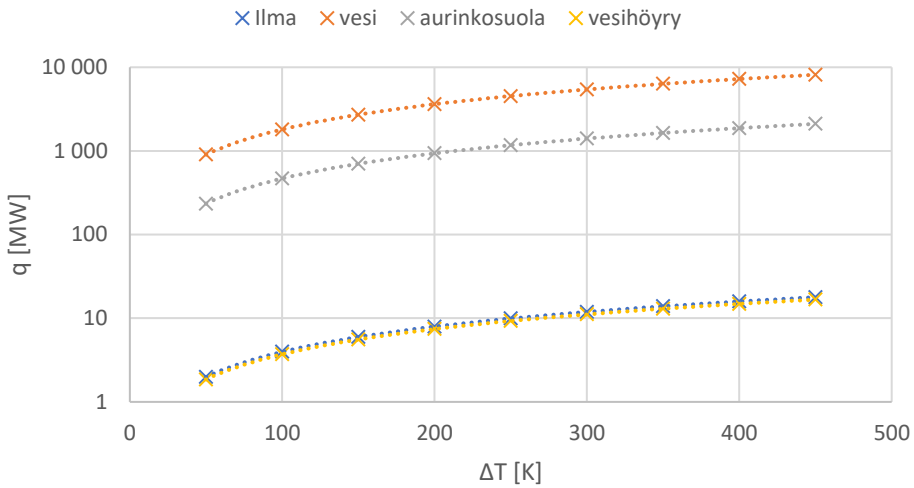
$$Re_D = \frac{\rho u_m D_i}{\mu} \tag{12}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \tag{13}$$

Missä h on konvektiolämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K], k lämmönjohtavuus [W/mK], D halkaisija [m], Nu Nusseltin luku [-], Re Reynoldsin luku [-], Pr Prandtlin luku [-], ρ tiheys [kg/m^3], u nopeus [m/s], μ viskositeetti [Ns/m^2], c_p ominaislämpökapasiteetti [J/kgK].

Taulukko 2. Konvektiolämmönsiirtokertoimet putkivirtaukselle

	ilma	vesihöyry	aurinkosuola	vesi
μ [Ns/m^2]	2,3E-05	1,3E-05	3,5E-03	2,2E-04
ρ [kg/m^3]	0,87	0,55	1712	937
k [W/mK]	0,03	0,03	0,55	0,69
c_p [J/kgK]	1014	2014	1596	4256
Re [-]	1,2E+04	1,26E+04	5,0E+04	4,4E+05
Pr [-]	0,69	1,04	10,02	1,34
Nu [-]	36,6	44,3	265	820
h [W/m^{2}K]	38,9	36,3	4 590	17 735



Kuva 22. Putkivirtauksen lämpöteho lämpötilaeron funktiona logaritmisella asteikolla

Nestemäiset lämmönsiirtofluidit siirtävät lämpöä kaasumaista ilmaa paremmin suuremman massavirran vuoksi. Lämmönsiirtofluidin olisi kuitenkin hyvä pysyä stabiilina varastoinnin lämpötila-alueella. Jos putkivirtaus pysäytetään varastoinnin ajaksi, lämmönsiirtoaineena käytettävä vesi alkaa höyrystyä kerryttäen painetta. Aurinkosuola puolestaan laskisi varaston lämpökapasiteettia noin 30 %, korkean sulamispisteen takia. Ilman etuja ovat helppo saatavuus ja pieni korroosiovaikutus. Toisaalta höyrystinputkien pinta-ala ei riittäisi tuottamaan 30 MW vähimmäistehoa normaalipaineessa. Paineen ja virtausnopeuden nostaminen lisäisi tarvittaessa vesihöyryn ja ilman lämmönsiirto-ominaisuuksia.

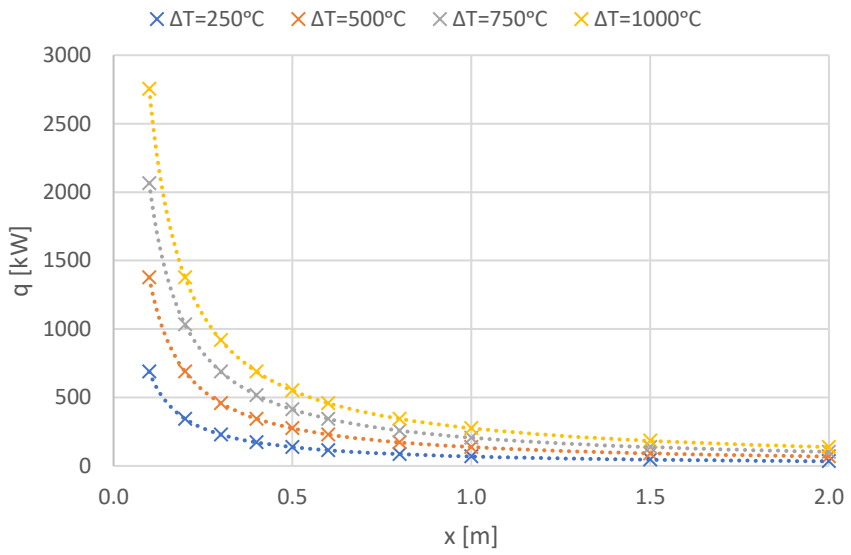
Höyrystinputkistosta lämpö siirretään kaukolämpövaihtimeen, jossa se johtuu kaukolämpöveteen. Kokonaislämmönsiirtokerroin rimoitetulle ilmavesi lämmönvaihtimelle on 25–50 W/m^{2}K ja vesivesi lämmönvaihtimelle 850–1700 W/m^{2}K. Ero lämmönsiirtokertoimessa on kompensoitavissa suuremmalla lämmönsiirtopinta-alalla yhtälön 14 mukaan. Tarvittava logaritminen lämpötilaero lasketaan yhtälöstä 15. (Incropera 2017, 658–662)

$$q = UA\Delta T_{lm} \tag{14}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \tag{15}$$

Jossa q on lämpöteho [W], U kokonaislämmönsiirtokerroin [W/m^{2}K], A pinta-ala [m], ΔT_{lm} logaritminen lämpötilaero [K], ΔT_1 ja ΔT_2 ilmaisevat lämmönvaihtimen lämpötilaerot.

Jotta lämpöä voidaan varastoida ja purkaa, tulee lämmön johtua myös hiekan sisällä. Kuvassa 23 Fourierin laista johdettu hiekan höyrystinputkiin kohdistama lämpöteho on esitetty johtumisetäisyyden funktiona eri lämpötilaeroilla.



Kuva 23. Höyrystinputkien purkuteho johtumisetäisyyden funktiona eri lämpötilaeroilla

Lämpöteho paranee lämmönsiirtoetäisyyden pienentyessä ja lämpötilaeron kasvaessa, mutta olemassa olevalla höyrystinpinnalla jäätäisiin käytännössä reilusti alle megawatin lämpötehoon. Lähelle kattilan reunoja tuotujen putkien ympäröivä hiekka luovuttaisi lämpönsä kohtuullisen nopeasti, mutta muualta hiekasta johtuva lämpö vapautuisi liian hitaasti. Purkuteho myös heikkenee varaston lämpötilan laskiessa. Kattilaan tulisi sijoittaa lisää lämmönsiirtopintoja kasvattamaan lämmönsiirtopinta-alaa ja vähentämään tarvittavaa lämmönsiirtoetäisyyttä. Tämä tulisi kuitenkin kalliiksi, varsinkin kun kattila tarvitsisi myös jäykistystä ja tukipalkkien vahvistusta. Näistä syistä kattila olisi parempi purkaa ja suunnitella tilalle kokonaan uusi lämpövarasto. Kattilan ja sen tasojen purkamisen jälkeen uudelle hiekkalämpövarastolle olisi saatavilla 500 m^2 ja lähes 70 m korkea halli. Vanhan kattilarakennuksen liitännöistä ja joistakin komponenteista saattaisi myös olla hyötyä.

5 Taloudellinen potentiaali

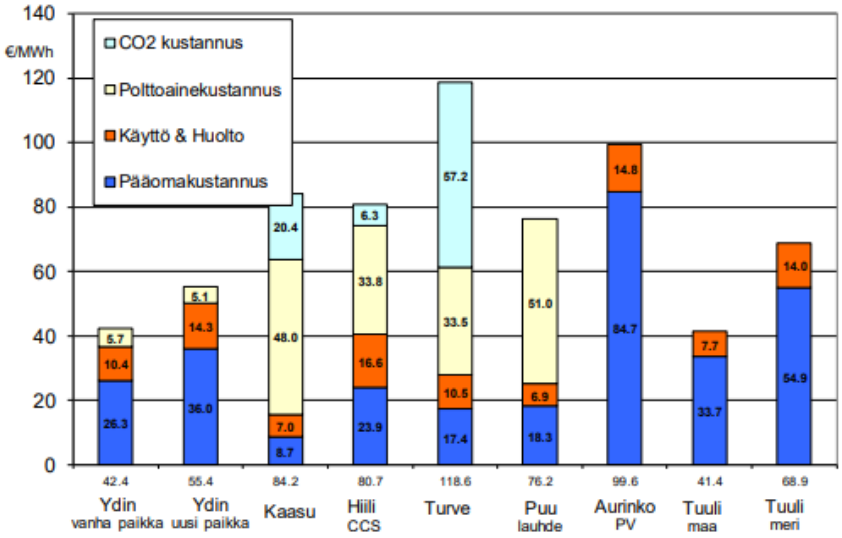
Hiekkalämpövaraston taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa sähkön markkinahintojen kehitys, korvattavan kaukolämmöntuotannon hinta ja varaston käytöstä sekä huollosta aiheutuvat kustannukset. Suora kaukolämmön tuotanto sähkökattilalla tai teollisella lämpöpumpulla on lähtökohtaisesti kannattavaa edullisen sähkön aikana, mutta markkinan hinnanvaihteluiden hyödyntäminen vaatisi erillisen energiavaraston käyttöä. Hiekkalämpövarasto kilpailee vesilämpövaraston kanssa samasta potentiaalisesta markkinaraosta, jossa osa kaukolämmöntuotannossa käytettävästä polttoaineesta korvataan varastoidulla lämmöllä erityisesti kulutushuippujen aikana korvaten fossiilisen säätötehon. Tässä kappaleessa hahmotellaan Suomen tulevaisuuden sähkömarkkinan hintakehitystä, kaukolämmön kysyntää sekä luodaan mahdollinen skenaario lämpövaraston toimintaedellytyksistä vuonna 2030.

5.1 Sähkömarkkinoiden kehitys Suomessa

Sähkön hinta määräytyy pörssissä kysynnän ja tarjonnan mukaan. Sen tuottajat tekevät tuntikohtaiset tarjoukset tuottamastaan sähköstä edellisenä päivänä ja markkinahinta määräytyy suurimman toteutuneen tarjouksen mukaan. Sähkön ostajina pörssissä toimivat suuret teollisuuden sähkön käyttäjät sekä myyjät. Markkinoihin kuuluu myös kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämät säätösähkö- ja reservimarkkinat, joiden kautta kantaverkon taajuus sekä tuntikohtaiset ennusteet saadaan tasapainoon lähempänä käyttöhetkeä. Tarjoukset tuotannon ja kulutuksen lisäämisestä sekä vähentämisestä tehdään tuntikohtaisesti samoin kuin vuorokausimarkkinoilla. Suomi on osa laajempaa eurooppalaista sähkömarkkinaa omana tarjousalueenaan. Kauppaa käydään myös naapurimaiden toimijoiden kanssa siirtokapasiteettien mukaan, jolloin markkinahinnat alueiden välillä tasoittuvat. (Fingrid 2023a)

Sähkön tuotantokustannukset riippuvat tuotantotavasta. Kuvassa 24 kustannusten jakautuminen on esitetty joillekin tuotantotavoille. Maatuulivoima on ollut vertailussa edullisinta jo vuoden 2017 selvityksessä. Tuuli- ja aurinkovoima eivät tarvitse polttoainetta, mutta niiden tuotanto on riippuvainen vallitsevista sääoloista. Kun myös käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat matalat, kannattaa sähköä tuottaa käytännössä aina kun se on mahdollista.

Ydinvoimalan pääomakustannukset muodostavat suurimman osan tuotantokuluista, jolloin sähkön tuottaminen on usein hetkellistä alasajoa kannattavampaa markkinahinnasta riippumatta. Tämän vuoksi ydinvoima luokitellaan Suomessa perustuotannoksi. Polttoainekustannukset ovat merkittävä osa polttamiseen perustuvan sähköntuotannon kustannuksia, jolloin sähkön hinta määrittelee tuotannon kannattavuutta. Tällöin pörssiin tehtävät tarjoukset ovat tuuli-, ydin- ja aurinkovoimaa korkeampia. Lisäksi fossiiliseksi luokitellut hiili, maakaasu ja turve aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä, jotka ovat osa Euroopan päästökauppaa. Päästöoikeuksien hinta määräytyy markkinoiden mukaan. (Vakkilainen & Kivistö 2017, 11–14)

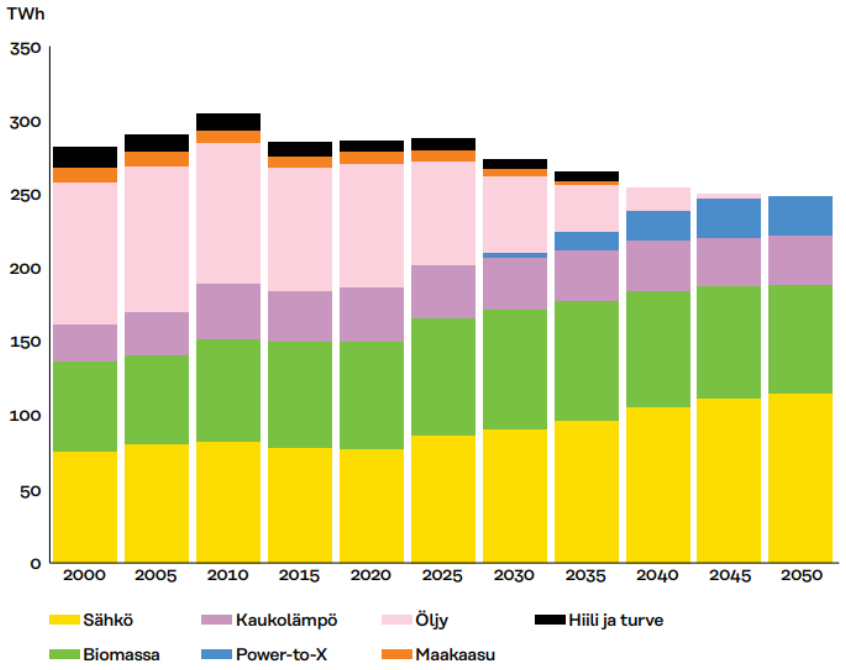


Kuva 24. Sähkön tuotantokustannukset päästöoikeuden 60 €/tCO_2 hinnalla (Vakkilainen & Kivistö 2017, 14)

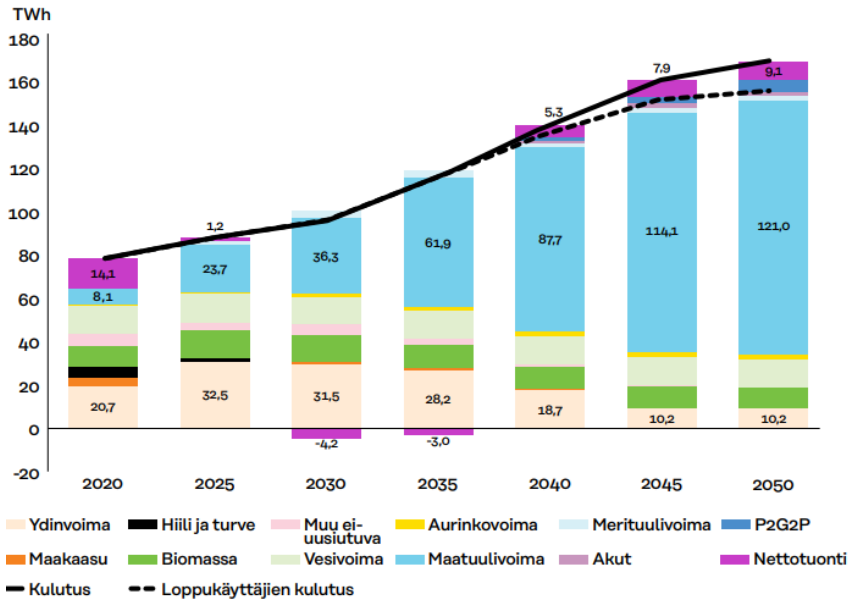
Nykyinen EU alueen päästöoikeuden hinta on noin 95 €/tCO_2, kun se vielä 2017 maksoi 5 €/tCO_2. Kehitys on ohjannut investointeja kohti uusiutuvia energianlähteitä ja vähentänyt fossiilisten polttoaineiden kysyntää. Maakaasun ja hiilen markkinahinnat Euroopassa ovat edelleen yli kaksinkertaisia vuoden 2017 tasoon verrattuna viimeaikaisesta nopeasta laskusta huolimatta. (Trading Economics 2023) Tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon kustannukset laskevat edelleen. Sitra arvioi suomalaisen aurinkoenergian tuotantokustannuksiksi 52 €/MWh sekä maa- ja merituulivoimalle 33 & 66 €/MWh vuonna 2030. (Sitra 2021, 98)

Vuoden 2035 hiilineutraalisuustavoitteen ja markkinoiden hintakehityksen vuoksi Suomen energiajärjestelmä on sähköistymässä. Sitran julkaisu sisältää kaksi skenaariota: suoran ja epäsuoran power-to-X ratkaisuihin perustuvan sähköistymisen. Kuvassa 25 esitetty suora sähköistyminen parantaa järjestelmän energiatehokkuutta muun muassa liikenteessä ja kotitalouksissa, mikä vähentää energian kokonaiskulutusta. Skenaarion toteutuminen vaatisi

sähkön tuotannon kaksinkertaistamista vuoteen 2050 mennessä. Kustannustehokkain tuotantorakenne tavoitteen toteuttamiseen on esitetty kuvassa 26. (Sitra 2021, 27–31)



Kuva 25. Energian polttoainekohtainen loppukäyttö (Sitra 2021, 27)

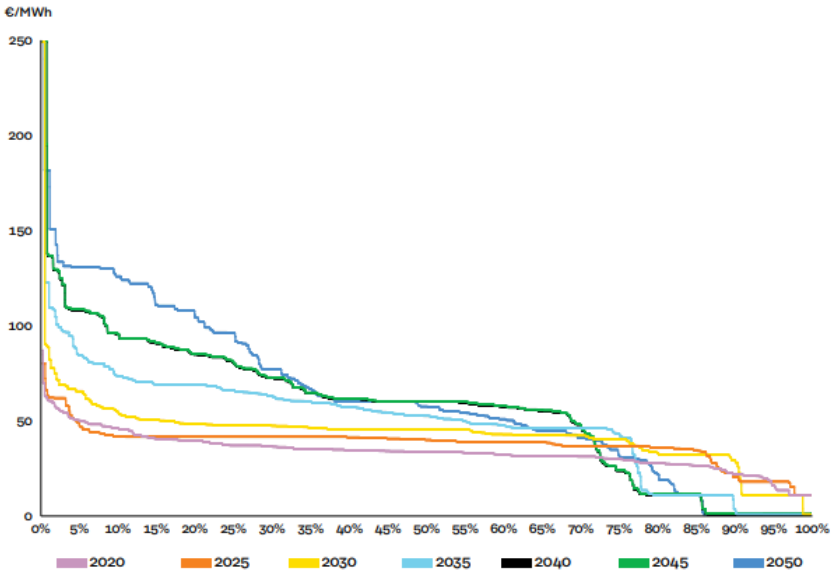


Kuva 26. Sähkön tuotanto ja kulutus (Sitra 2021, 31)

Kaukolämmön kysynnän odotetaan pysyvän tasaisena, mutta tuotanto on sähköistymässä. Vuonna 2050 lämpöpumput kuluttaisivat yli 90 % kiinteistöjen lämmitykseen käytetystä sähköstä ja niillä tuotettaisiin yli 55 % kaukolämmön energiasta. Vastaavaa kehitystä odotetaan myös teollisuudessa, jossa suora sähköistys korvaisi fossiilisia polttoaineita muun muassa valokaariuunien avulla. Suora sähköistämismalli olettaa power-to-X teknologioiden

sähkönkulutukseksi 34 TWh ja epäsuora malli 60 TWh vuonna 2050 (Sitra 2021, 27–28, 74). Molemmat skenaariot jäävät kauas Valtioneuvoston tuoreesta vedyntuotannon periaatepäätöksestä, joka vaatisi 50 TWh uusiutuvaa sähköä jo vuonna 2030.

Sähköä tuotettaisiin edullisella maatuulivoimalla, jonka kapasiteetti ylittää 14 GW vuonna 2030 ja 70 % tuotanto-osuuden 2050. Biomassaan perustuva CHP säilyy entisellään tuottaen noin 10 TWh sähköä vuosittain. Myös vesivoiman määrä pysyy vakiona, sillä sen keskimääräinen 14 TWh potentiaali on jo saavutettu. Ennuste olettaa ydinvoiman vähenevän, mutta Loviisan reaktoreiden tuoreiden jatkolupien takia tuotanto tuskin laskee merkittävästi ennen vuotta 2050. Järjestelmää tasapainotettaisiin 4 GW akku- sekä 9 GW kaasuturbiini- ja polttokennokapasiteetilla. Lisäksi Ruotsin ja Viron nykyiset siirtokapasiteetit yli kaksinkertaistuvat sekä 1000 MW siirtolinja Norjaan rakennettaisiin. Vuonna 2050 kysyntäjouston kapasiteetiksi oletetaan alle 8 GW. Suoran sähköistyksen ennuste pörssisähkön pysyvyyskäyristä on esitetty kuvassa 27. Sen mukaan sähkön keskihinta pörssissä nousisi ilman kysyntäjoustoja 86 % nykyisestä tuotannon vaihteluiden vuoksi. (Sitra 2021, 29–36, 95) Toisaalta myös sähkön edulliset/negatiiviset hinnan yleistyisivät ja tuotannosta tulisi päästötöntä.

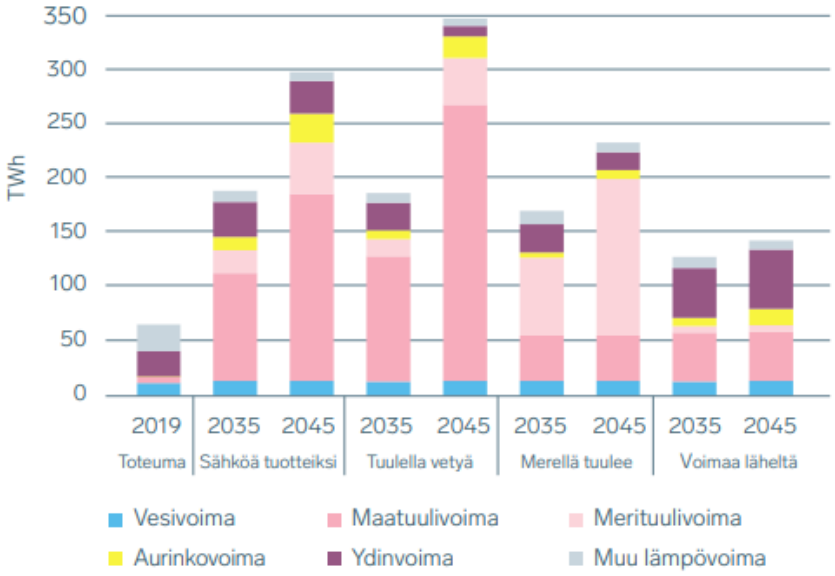


Kuva 27. Sähkön pörssihinnan ennustetut pysyvyyskäyrät ilman kysyntäjoustoa (Sitra 2021, 126)

Kantaverkkoyhtiö Fingrid on julkaissut neljä omaa skenaariotaan tulevasta sähkömarkkinan kehityksestä vuodelle 2035. Sähköä tuotteeksi -skenaariossa Suomi vie ulkomaille päästöttömästä vedystä valmistettuja johdannaistuotteita. Tuulella vetyä -skenaariossa jalostamatonta vetyä viedään ulkomaille. Merellä tuulee -skenaario korvaa fossiiliset polttoaineet sähköllä sekä uusiutuvilla polttoaineilla ja voimaa läheltä -skenaariossa sähköä tuotetaan

pääasiassa omiin tarpeisiin. Kaikissa skenaarioissa uusiutuvan energian tuotantokustannukset ovat huomattavasti Sitran arvioita edullisemmat. Vuonna 2035 aurinkovoiman hinnaksi oletetaan 26–37 €/MWh, maatuulivoimalle 21–25 €/MWh ja merituulivoimalle 26–41 €/MWh. Arvioita tukevat vuoden 2022 ensimmäisen vuosineljänneksen aikana toteutuneet pitkäaikaisten ostosopimusten hinnat, joissa aurinkovoima maksoi Suomessa keskimäärin 45 €/MWh ja maatuulivoima 36 €/MWh. (Fingrid 2022a)

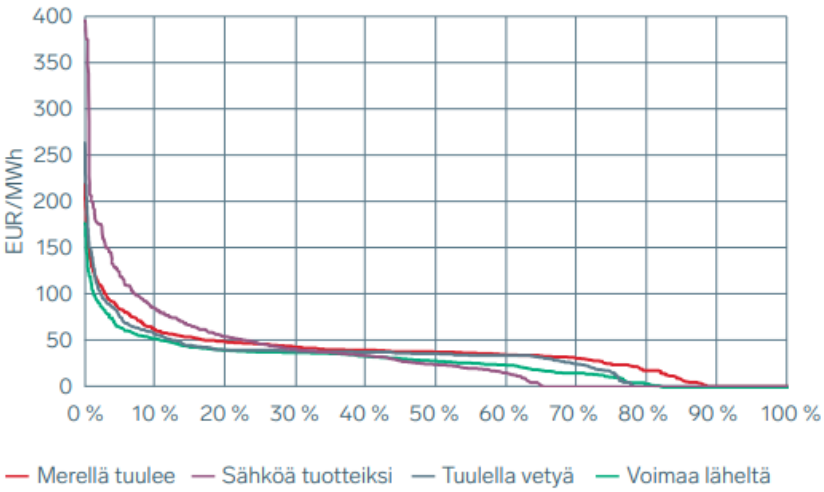
Skenaarioiden tuotantojakaumat vuosille 2035 ja 2045 esitetään kuvassa 28. Säätötehona käytettävän vesivoiman kolmen gigawatin kapasiteetti pysyy entisellään ja pienydinvoimaa hyödynnetään ainoastaan voimaa läheltä skenaariossa, jossa sen hinta on määritelty tarkoituksella alakanttiin. Perinteisen ydinvoiman rakentaminen todetaan liian kalliiksi 79 €/MWh tuotantokustannuksilla. Vuoden 2035 skenaarioissa maatuulivoiman kapasiteetiksi saadaan 13–36 GW, merituulivoimalle 1–15 GW, aurinkovoimalle 5–12 GW sekä muulle lämpövoimalle 4–5 GW. Fingridille on tehty kyselyitä tuuli- ja aurinkovoiman liittämisestä kantaverkkoon 170 GW edestä, josta vain osa realisoituu. Uusiutuvan energian tuotantopotentiaali on Suomessa moninkertainen energiantarpeeseen verrattuna toisin kuin monessa Euroopan maassa, mikä mahdollistaisi laajamittaisen energian viennin. (Fingrid 2022a)



Kuva 28. Fingridin skenaariot tulevaisuuden energiantuotannolle (Fingrid 2022, 11)

Vaihtelevaa sähköntuotantoa tasapainotettaisiin kehittyvillä siirtoyhteyksillä, energian varastoinnilla ja kulutuksen joustavuuden lisäämisellä. Lisäksi sähkökaupassa ollaan siirtymässä tuntikohtaisista markkinoista 15 minuutin tarkkuuteen. Arvio sähkömarkkinan pysyvyyskäyrästä eri skenaarioissa on esitetty kuvassa 29. Verrattuna kuvan 27 nykytilanteeseen

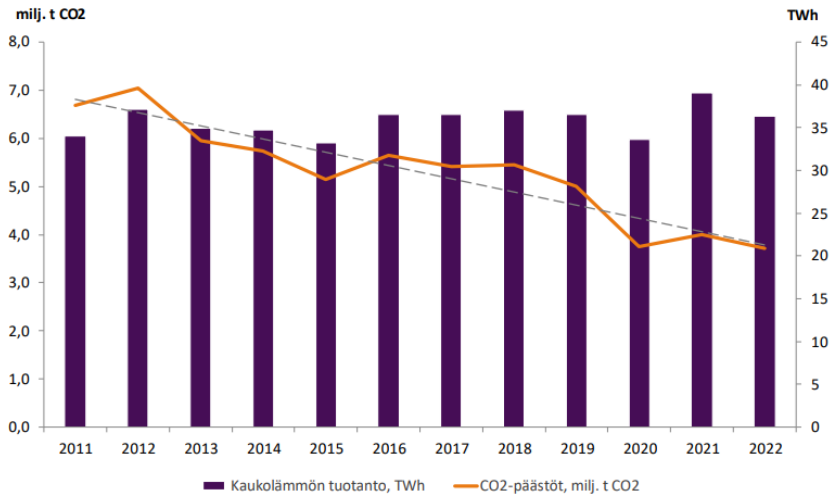
sähkön mediaanihinta laskisi, mutta hintapiikit yleistyisivät erityisesti vähätuulisina päivinä. Kehitys heikentäisi polttoon perustuvan sähköntuotannon kilpailukykyä ja kannustaisi investointeja huippuvoimaan. Tuotannon säätökyky heikkenee lämpövoimakapasiteetin laskiessa, mutta kulutusjouston kapasiteetin odotetaan kasvavan. Se on jaoteltu teollisuuteen, elektrolyysiin, sähköiseen lämmitykseen ja liikenteeseen. Vedyntuotannon joustavuus riippuu käytetystä teknologiasta sekä sen tuotanto- ja varastointikapasiteetista. Sähköinen lämmitys sisältää myös lämpövarastot, jotka mahdollistavat akkuja pidemmän varastointiajan. Liikenteen osalta joustoksi lasketaan sähköautojen älykäs lataus. Jouston määrä ja kesto riippuu vallitsevista olosuhteista, joustotyypistä ja markkinahinnasta. (Fingrid 2022a)



Kuva 29. Sähkön hinnan mediaani pysyvyyskäyrä vuonna 2035 eri skenaarioissa (Fingrid 2022, 30)

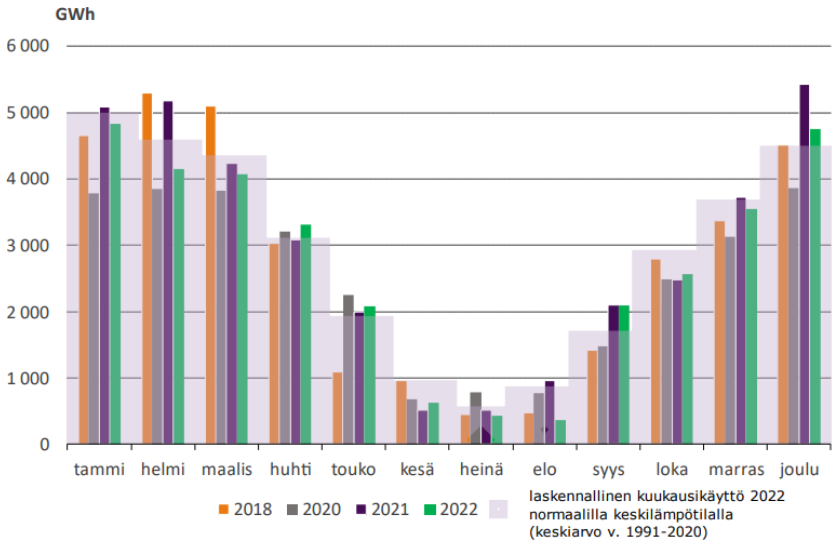
5.2 Kaukolämmön kysyntä

Kaikissa edellä esitetyissä skenaarioissa kaukolämmön kysynnän odotetaan pysyvän nykyisellä tasolla, mutta tuotantorakenteen muuttuvan sähköistymisen myötä. Kaukolämmön kulutus riippuu ulkolämpötilan aiheuttamasta lämmitystarpeesta, joka on vakiintunut valtakunnallisesti noin 33–40 TWh tasolle viimeisen vuosikymmenen aikana kuvan 30 mukaan. Samalla hiilidioksidipäästöt ovat lähes puolittuneet. Päästöjen väheneminen on seurausta biomassan, hukkalämmön ja lämpöpumppujen lisääntyvästä käytöstä. (Energiateollisuus ry 2023c) Ilmaston lämpenemisen vuoksi talvikaudet kuitenkin lyhenevät, jolloin lämmitystarve vähenee. Samaan aikaan rakennusten energiatehokkuus paranee. Nykyisen kulutuksen ylläpito vaatisi siis uusia kaukolämpöliitäntöjä.



Kuva 30. Kaukolämmön tuotanto Suomessa vuosina 2011–2022 (Energiateollisuus ry 2023c)

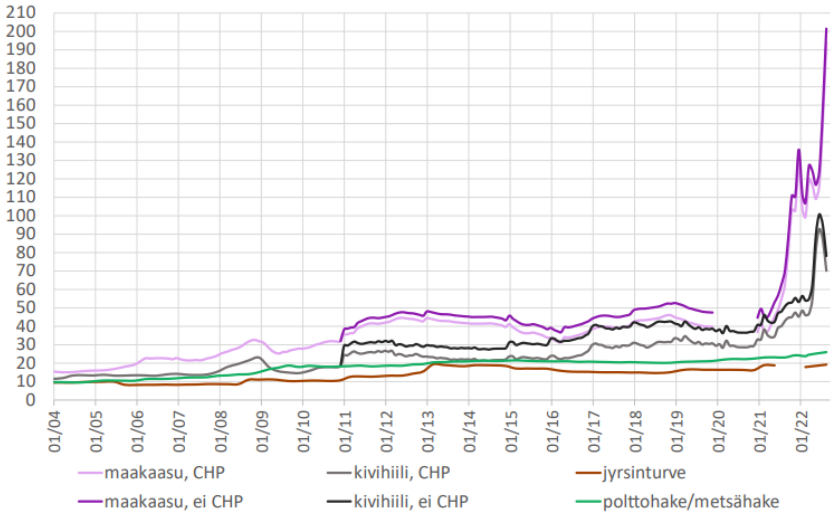
Kaukolämmön kysyntä vaihtelee Suomessa vuodenaikojen mukaan. Viime vuosien kuukausikohtainen kysyntä on esitetty kuvassa 31. Kaukolämmön tarve on suurinta talvella, jolloin huippukulutus on lähes valtakunnallisen sähkönkulutuksen tasolla. Toisaalta kesällä lämmön kulutus on hyvin maltillista. Kysynnän vaihtelu vaikuttaa kaukolämmön tuotantokustannuksiin ja kuluttajahintoihin. (Energiateollisuus ry 2023c) Esimerkiksi Lahdessa kaukolämpöä myydään kolmessa hintaluokassa: talvikausi, kevät/syksy ja kesä. Kesällä energian hinta on 65 % sekä keväällä ja syksyllä 29 % talvihintaa edullisempaa. (Lahti Energia 2022) Lahdessa kaukolämpöverkon teho on kysynnän mukaan 30–500 MW.



Kuva 31. Kaukolämmön kysynnän vaihtelu Suomessa 2018–2022 (Energiateollisuus ry 2023c)

Kuvassa 32 esitetty voimalaitospolttoaineiden hintakehitys vaikuttaa suoraan kaukolämmön tuotantokustannuksiin. Viimeaikaiset muutokset energian jakeluketjuissa nostivat erityisesti maakaasun ja kivihiilen hintaa. Lisäksi fossiilisiin polttoaineisiin kohdistuva päästömaksu

ja verotus lisäävät kustannuksia. Poltto- ja metsähakkeen hinnat ovat nousseet kotimaisen kysynnän myötä. Nykyisin sen markkinahinta olisi noin 27 €/MWh, josta korkeintaan 90 % saadaan hyödynnettyä sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Kesäajan pienempää kysyntää voidaan korvata kaukojäähdytyksellä, jonka tuotanto on kasvussa. Pääasiassa lämpöpumpuilla tehtävää kaukokylmää myy Suomessa tällä hetkellä 11 energiayhtiötä. Myynti vuonna 2022 oli 340 GWh ja sopimusteho lähes 600 MW. (Energiateollisuus ry 2023c)

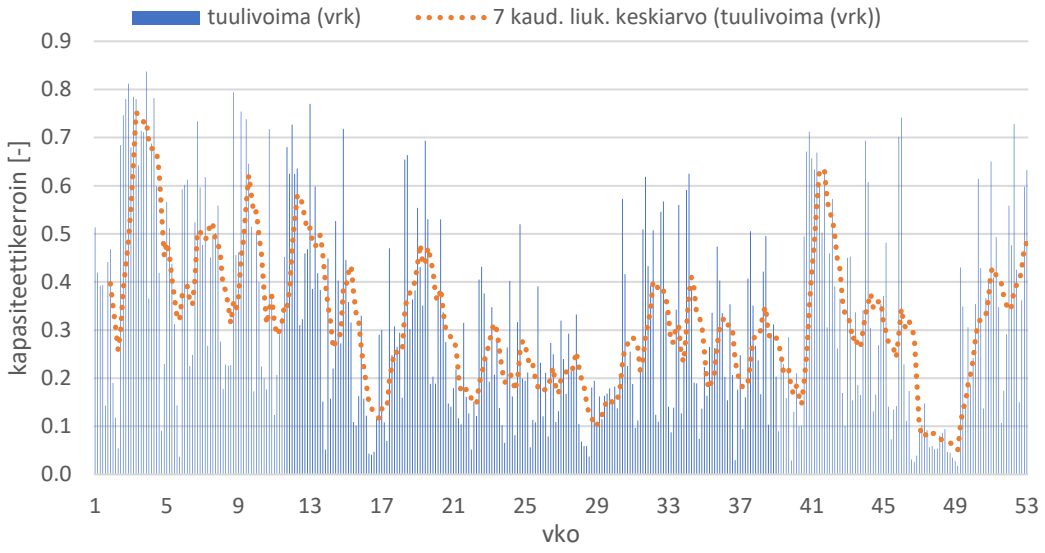


Kuva 32. Voimalaitospolttoaineiden hintojen (€/MWh) kehitys 2004–2022 (Energiateollisuus ry 2023c)

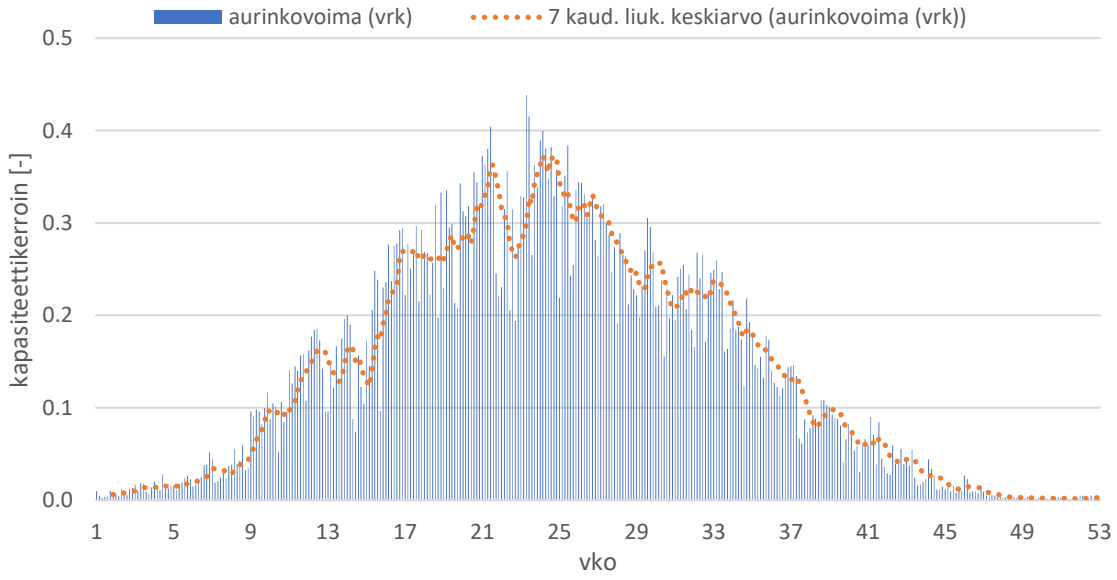
5.3 Skenaario 2030 ennustetulla tuotantorakenteella

Energiamarkkinoiden odotetaan muuttuvan merkittävästi seuraavan seitsemän vuoden aikana. Sähköistyminen lisää kysyntää teollisuudessa, liikenteessä ja lämmöntuotannossa. Fingrid on varautunut yli 14 GW tuuli- ja 3 GW aurinkovoimakapasiteettiin vuonna 2030. (Fingrid 2022b) Heidän tuotantoennusteissansa käytettyjen arvioiden mukaan kyseiset kapasiteetit olivat vuoden 2022 lopussa 5,2 ja 0,6 GW (Fingrid 2023b). Suomen Tuulivoimayhdistyksen ylläpitämässä tilastossa todellinen tuulivoimakapasiteetti olisi lähes 5,7 GW. Heidän mukaansa tuulisella paikalla maatuulivoiman huipunkäyttöaika uudella turbiinilla on 3000–4000 ja merituulivoimalla 4200–4600 tuntia. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2023) Energiaviraston julkaisema verkkoon liitetty aurinkovoimakapasiteetti on päivitetty vuoden 2021 lopussa, jolloin se oli 395 MW (Energiavirasto 2022). Aurinkovoiman huipunkäyttöaika on Suomessa kuitenkin vain noin 800 tuntia. Vuonna 2022 tuulivoimalla tuotettiin 11,5 TWh sähköä, mikä vastasi 16,7 % Suomen kokonaistuotannosta. Vastaavat luvut aurinkovoimalle olivat noin 0,41 TWh ja 0,6 %. (Energiateollisuus 2023a)

Hiekka-akun kannalta oleellista on uusiutuvan energian tuotannon ja kaukolämmön kysynnän ajalliset vaihtelut. Vuoden 2022 kapasiteettikorjatut tuuli- ja aurinkovoima tuotannon jakautuminen on esitetty kuvissa 33 ja 34 Fingridin avoimen datan perusteella. Laskennassa on käytetty tuulivoiman tuntikohtaista tuotantotietoa ja aurinkovoiman ennustettua tuntikohtaista tuotantoa Suomessa sekä ennusteissa käytettyjä kapasiteetteja. Niiden perusteella Suomen tuulivoiman huipunkäyttöaika olisi noin 2800 ja aurinkovoiman 1200 tuntia. (Fingrid 2023b) Tuulivoimalle luku on uskottava, mutta aurinkovoiman tuotanto ja kapasiteetti eivät täsmää. Syynä on todennäköisesti viiveellä päivitetty kapasiteetti ja arvioitua matalampi toteutunut tuotanto. Tuotannon suhteellinen jakautuminen vaikuttaa kuitenkin oikealta.

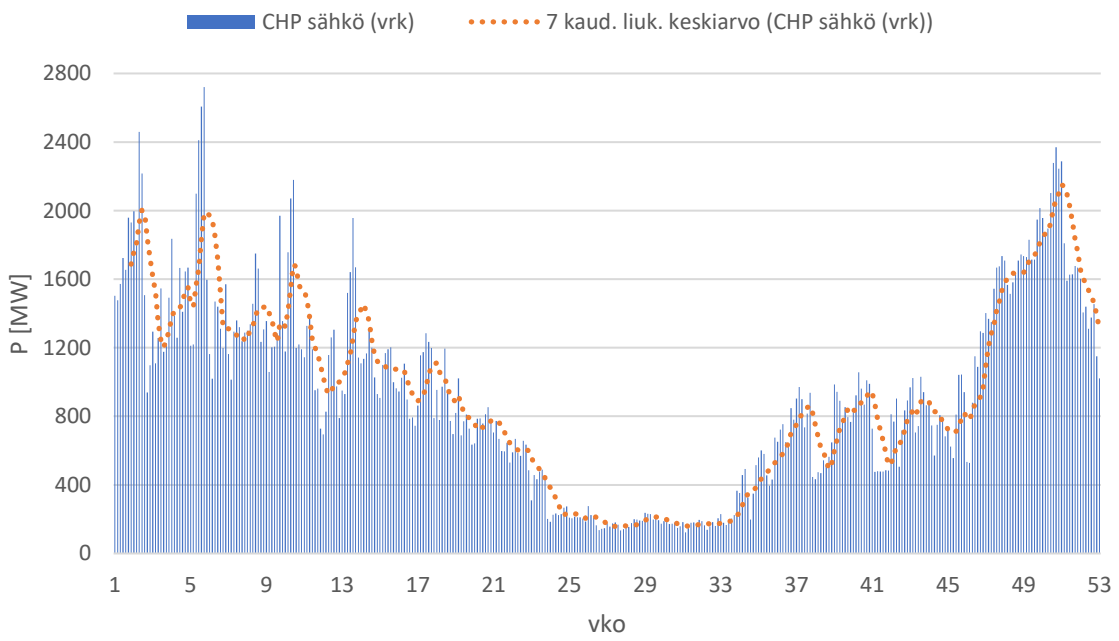


Kuva 33. Päivittäiset tuulivoiman kapasiteettikertoimet vuonna 2022



Kuva 34. Päivittäiset aurinkovoiman kapasiteettikertoimet vuonna 2022

Vertaamalla tuotantojakaumia kuvassa 35 esitettävään CHP-voimaloiden sähkötehoon huomataan, että aurinkovoiman tuotannolla ei tule olemaan vaikutusta sähkön hintaan suurimman kaukolämmön tehontarpeen aikana. Kapasiteetin kasvaessa aurinkosähköä voidaan kuitenkin hyödyntää keväällä ja syksyllä. Tuulivoiman tuotanto puolestaan painottuu talvikuukausille ja sen kapasiteetti on huomattavasti aurinkosähköä suurempi. Tämän takia lämpövarasto kannattaisi mitoittaa tuulivoiman 2–3 viikon tuotantosyklien mukaan. Kun datajoukkojen välistä korrelaatiota tutkitaan yhtälöstä 16 laskettavalla korrelaatiokertoimella *r*, joka palauttaa arvoja -1 ja 1 väliltä huomataan vain pieni positiivinen korrelaatio tuulivoiman tuotannon ja kaukolämmön kysynnän välillä kertoimella 0,13. (Kreyszig et al. 2011, 1106-1109) Toisaalta, kun tuulivoimatuotantoa verrataan Nord Poolin datasta saatuun Suomen tuntikohtaiseen sähkön aluehintaan, havaitaan selvä käänteinen korrelaatio kertoimella -0,55. (Nord Pool 2023) Kyseinen ilmiö, jossa tuulivoimantuotanto laskee koko alueen sähkön hintaa tulee vahvistumaan kapasiteetin kasvaessa. Tämä lisää suurten lämpövarastojen kilpailukykyä suoraan sähkölämmitykseen verrattuna, sillä kaukolämmön kysyntä ja tuulivoimatuotanto osuvat vain ajoittain samoihin ajankohtiin.



Kuva 35. CHP-voimalaitosten vuorokausikohtainen sähköteho ja vuonna 2022

$$r = \frac{n\sum_{j=1}^{n} x_j y_j - (\sum_{j=1}^{n} x_j)(\sum_{j=1}^{n} y_j)}{\sqrt{n\sum_{j=1}^{n} x_j^2 - (\sum_{j=1}^{n} x_j)^2}\sqrt{n\sum_{j=1}^{n} y_j^2 - (\sum_{j=1}^{n} y_j)^2}} \tag{16}$$

Missä *r* on korrelaatiokerroin [-], *n* datapisteiden lukumäärä [-] ja *x* & *y* datajoukot 1 & 2.

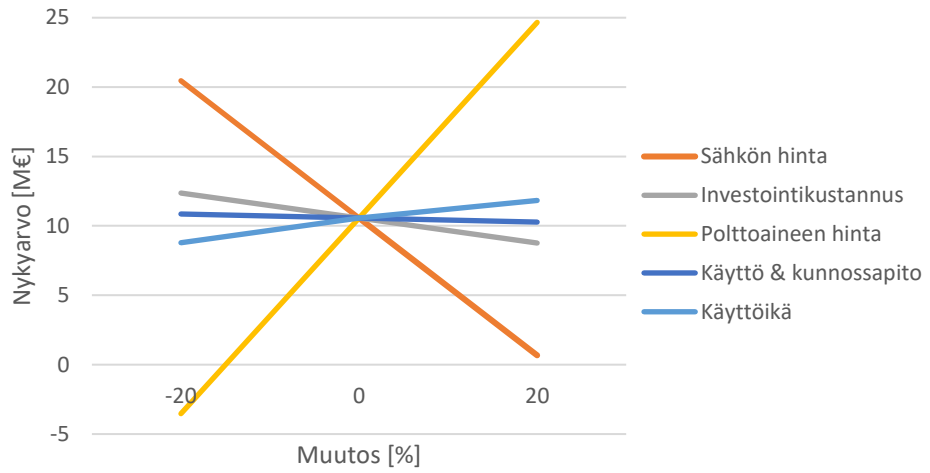
Kannattavuuslaskentaa varten hiekka-akulle oletetaan 20 vuosittaista lataussykliä. Varaston purkutehoksi valitaan 30 MW ja kapasiteetiksi 10,1 GWh. Polar Nightin teknologiaa mukaillen investointikustannukset olisivat tällöin noin 9 miljoonaa euroa. Arvio ei kuitenkaan sisällä esimerkiksi korkeajännitteisiä sähköliitäntöjä tai perustusten valmistelua, jotka voivat itsessään maksaa joitakin miljoonia. Hiekka-akun käyttöiäksi oletetaan 25 vuotta ja lainan koroksi 7 %. Hiekkalämpövaraston hyötysuhde on 95 % ja biomassan polton 90 %. Akun käyttämän sähkön keskihinnaksi oletetaan 20 €/MWh ja uusiutuville polttoaineille 27 €/MWh vuodelle 2030 edellä esitettyihin skenaarioihin ja polttoaineen hinnan kehitykseen vedoten. Laskentaa varten akun käyttö- ja kunnossapitokustannuksiksi oletetaan 125 000 € vuodessa. Näillä oletuksilla investoinnin nykyarvo voidaan laskea yhtälöllä 17 ja siihen tarvittava annuiteetti yhtälöstä 18. Tällöin investoinnin nykyarvoksi saataisiin noin 10,5 miljoonaa euroa. Vuotuinen tuotto muodostuu pienemmästä polttoaineen kulutuksesta, mutta myös sähköverkon taajuuden säätelystä voi tulla lisätuloja.

$$NA = a_{n,i}s - I \tag{17}$$

$$a_{n,i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \tag{18}$$

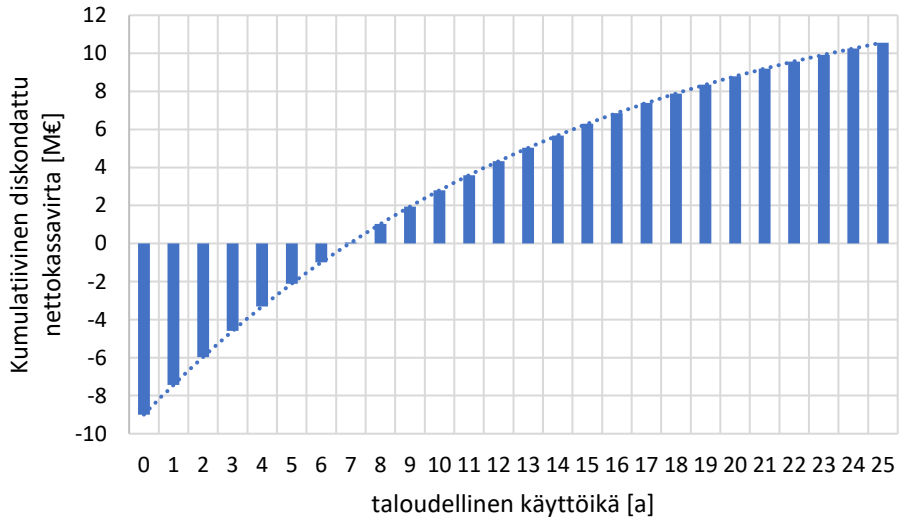
Missä *NA* on investoinnin nykyarvo [€], $a_{n,i}$ annuiteettitekijä [-], *s* vuotuinen tuotto [€], *I* investointikustannus [€], *i* korkoprosentti [-] ja *n* käyttöikä [a].

Herkkyysanalyysissä sähkön ja polttoaineen hintaa, käyttöikää, investointikustannusta, sekä käyttö ja kunnossapitokustannuksia muutetaan vuorollaan 20 % suuntaansa. Tällöin investoinnin herkkyysanalyysi voidaan esittää graafisesti kuvassa 36. Kuvasta huomataan sähkön ja polttoaineen hintojen merkitys investoinnin kannattavuuteen. Oletetulla polttoainehinnalla käytetyn sähkön keskihinta saa olla korkeintaan 24,3 €/MWh, jotta investoinnista ei tulisi tappiota. Vastaavasti oletetulla sähkön hinnalla kriittinen polttoainekustannus olisi 23 €/MWh. Käyttöikä, investointikustannus sekä käyttö ja kunnossapito eivät ole yhtä kriittisiä.



Kuva 36. Hiekka-akkuinvestoinnin herkkyysanalyysi oletetuilla kustannuksilla ja hinnoilla

Perusskenaarion mukainen takaisinmaksuaika voidaan selvittää edellä esitetyistä yhtälöistä 17 ja 18 määrittämällä nykyarvo nollaksi ja ratkaisemalla *n*, joka saa arvon 7,0 vuotta. Lainan ja koron takaisinmaksu esitetään graafisesti kuvassa 37 ratkaisemalla kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta investoinnin taloudelliselle käyttöiälle.



Kuva 37. Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta oletetun taloudellisen käyttöiän funktiona

Edellä oletettujen arvojen mukainen hiekkalämpövarasto osoittautuisi kannattavaksi investoinniksi. Projektin todellista kannattavuutta on kuitenkin hankala arvioida ilman tarkempaa tietoa tulevaisuuden energiamarkkinoiden kehityksestä ja lopullisista investointikustannuksista. Vuoden takainen Energiateollisuuden arvio polttoainekustannuksista voi kuitenkin olla vanhentunut nykyisessä markkinatilanteessa. Tällöin herkkyysanalyysin 20 % kalliimpi hinta saattaa olla lähempänä totuutta tehden investoinnista entistäkin houkuttelevamman.

6 Johtopäätökset

Kappaleessa käsitellään hiekka-akun teknistä ja taloudellista toteutettavuutta edellisissä kappaleissa esitettyjen havaintojen pohjalta. Lämpövaraston mahdollinen toimintaperiaate ja kokoluokka selvitetään ja sitä verrataan vastaavaan vesilämpövarastoon. Lisäksi pohditaan mahdollisuutta soveltaa teknologiaa pienemmässä mittakaavassa esimerkiksi kaukolämpöverkon hännissä paikallisen lämmönsaannin turvaamiseksi.

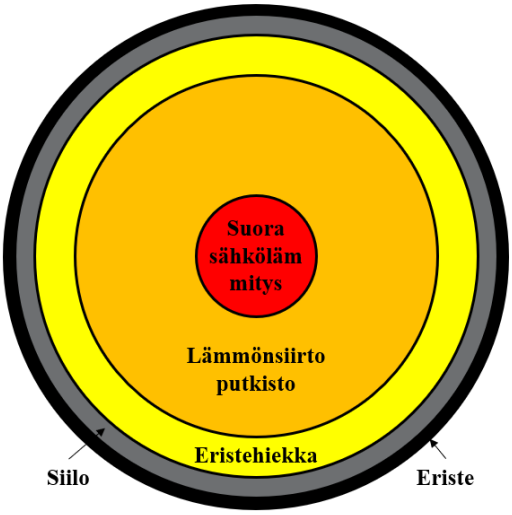
6.1 Hiekkalämpövaraston toteutettavuus

Kuten neljännessä kappaleessa todettiin, vanha hiilikattila ei sovellu sellaisenaan lämmön varastointiin suuren painon, korkean hydrostaattisen paineen sekä riittämättömien lämmönsiirtopinta-alojen vuoksi. Neliskanttinen tulipesä aiheuttaisi myös tarpeettomia häviöitä suuren suhteellisen ulkopinta-alansa vuoksi, mikä laskee varaston hyötysuhdetta heikentäen taloudellista kannattavuutta. Kattilan muuntaminen lämmön varastointiin soveltuvaksi tulisi siten uutta lämpövarastoa kalliimmaksi. Mikäli vanha kattila puretaan tasoineen, jäljelle jäisi lähes 70 metriä korkea 500 m^2 rakennus, jonka sisämitat ovat 20 ja 25 metriä. Energiavaraston rakennuttaminen sisätilaan parantaisi varaston hyötysuhdetta korkeamman ympäristön lämpötilan vuoksi. Hiekka-akun toteutus voi kuitenkin osoittautua hankalaksi ja kalliiksi ilman seinien purkamista. Varastosiilo sekä tarvittavat lämmönsiirtopinnat tulisi tuoda tontille osissa ja koota paikan päällä. Tämän kannattavuutta tulisi pohtia erikseen.

Hiekka-akun taloudellinen kannattavuus perustuisi suurilta osin tuulivoiman hinnanvaihteluihin. Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, paras hyöty saavutetaan noin 2–3 viikon kapasiteetilla. Suuressa kaukolämpöverkossa varaston purkutehon tulisi olla ainakin 30 MW, jolloin nimelliskapasiteetti ylittäisi 10 GWh. Paremman hyötysuhteen ja rakennekestävyyden vuoksi akku olisi muodoltaan siilomainen. Metallista ilmaputkistoa käytettäessä hiekkaa voidaan kuumentaa korkeintaan noin 600 asteiseksi, jolloin kapasiteetin laskennassa käytetty keskimääräinen lämpötila jäisi alle 500 ^{o}C. Vanhaan kattilahalliin sopisi 60 metriä korkea ja halkaisijaltaan 16 metrinen ympyrälieriö. Tällöin varastointikapasiteetti ylittäisi 2 GWh ja akun purkaminen nimellisteholla veisi noin kolme päivää. Kannattavuuslaskennassa käytettyä akkua kooltaan lähes viisi kertaa pienempi varasto ei juurikaan laskisi

investointikustannuksia, mutta se nostaisi hyödynnettävissä olevan sähkön keskihintaa tai vähentäisi käyttöastetta. Molemmat heikentävät investoinnin kannattavuutta. Lisäksi varaston korkeus hankaloittaisi lämmönsiirtoputkiston rakentamista lisäten kustannuksia.

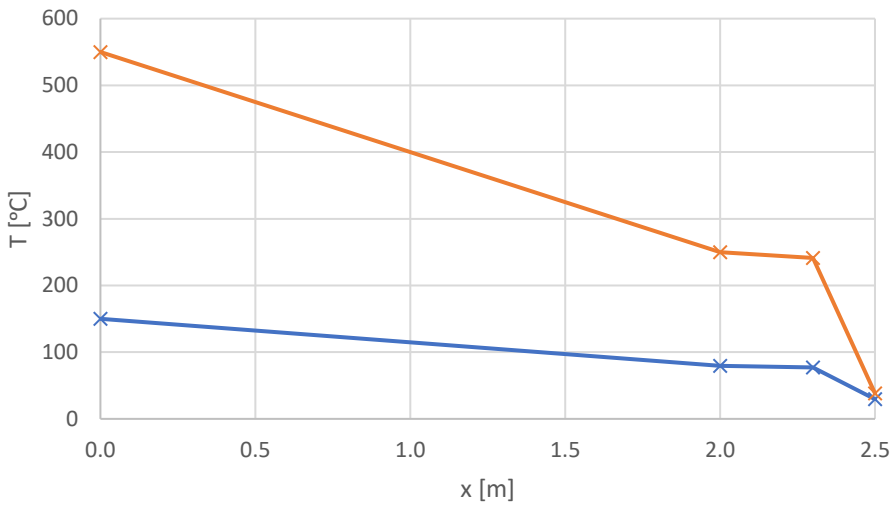
Lämpövarasto toimisi kuvassa 6 esitellyn hiekka-akun tapaan säädettävillä putkivirtauksilla. Näin akun purkutehoa voidaan tasata varauksen laskiessa ohjaamalla virtausta uusiin putkiin. Lämpökapasiteettia voitaisiin kasvattaa sijoittamalla varaston keskiosaan suoraa sähkölämmitystä. Varastoitu lämpö johtuu kohti ulkoisilla vastuksilla kuumennettavia lämmönsiirtoputkia, joiden ulkopuolella oleva hiekka toimii samalla lämpöeristeenä. Hiekkalämpövaraston rakennetta havainnollistetaan kuvassa 38. Suoran sähkölämmityksen lisääminen kasvattaa samalla lataustehon suhdetta purkutehoon mahdollistaen nopeamman latauksen ja edullisemman sähkön hyödyntämisen. Toisaalta varaston keskiosassa olevan hiekan massa on huomattavasti muuta hiekkamassaa pienempi, jolloin vaikutus jäisi maltilliseksi.



Kuva 38. Hiekkalämpövaraston poikkileikkaus

Siiloa ei välttämättä tarvitse rakentaa teräksestä kuten Kankaanpäässä, sillä seinämissä ei itsessään ole lämmönsiirtoputkistoja. Materiaaliksi voisikin valikoitua esimerkiksi betoni ENDURING lämpövaraston tavoin. Betonin lämmönsiirtokerroin on huomattavasti hiekkaa suurempi, mutta häviöitä voidaan vähentää eristekerroksella. Kerroksellinen rakenne parantaa varaston hyötysuhdetta ja varastointiaikaa. Kuvassa 39 lämpötilan jakautuminen varaston ulommissa kerroksissa on havainnollistettu yksiulotteiselle stationaariselle johtumiselle tasoseinässä yhtälöstä 19 olettamalla uloimman lämmönsiirtoputkiston ympäröivän hiekan lämpötilaksi 150 °C ja 550 °C sekä ympäristön lämpötilaksi 25 °C. (Incropera et al. 2017, 104) Tasoseinä oletus ei ole kaukana totuudesta suuren halkaisijan lieriöillä. Tyypillisen

eristemateriaalin lämmönjohtavuus on 0,04 W/mK, hiekan 0,27 W/mK ja betonin 1,4 W/mK. Oletetuilla seinämänpaksuuksilla ulkoseinän ja ympäristön lämpötilaerot olisivat 4,5 & 13,3 °C. Kuvasta 21 luettuna nämä vastaisivat noin 98,7 ja 95,5 % hyötysuhteita.



Kuva 39. Eristekerrosten lämpötilat lämmönsiirtoputkistosta varaston ulkoseinään etäisyyden funktiona

$$q_x = \frac{T_1 - T_\infty}{\frac{L_{hiekka}}{k_{hiekka}A} + \frac{L_{betoni}}{k_{betoni}A} + \frac{L_{eriste}}{k_{eriste}A} + \frac{1}{h_\infty A}} \tag{19}$$

Missä q_x on yksiulotteisen johtumisen teho [W], T_1 & T_∞ hiekan ja ympäristön lämpötilat [°C], L seinämäpaksuus [m], k lämmönjohtavuus [W/mK] ja A pinta-ala [m^2].

Vanhaan kattilahalliin rakennetun lämpövaraston kapasiteetti jäisi toivottua pienemmäksi edellä esitetyillä lämpötilatasoilla. Vaihtoehtoina olisi siirtää varasto ulkotilaan tai kasvattaa keskimääräistä lämpötilaa korvaamalla metalliset lämmönsiirtoputket. Hiekkalämpövaraston sijoittaminen kattilahallin ulkopuolelle mahdollistaisi yksinkertaisemman toteutuksen sekä muodon ja koon optimoinnin hyötysuhteen mukaan, jolloin ympäristön lämpötilan merkitys vähenee. Normaalipaineinen ilma ja stationäärinen hiekka eivät itsessään rajoita putkimateriaalin valintaa. Haasteeksi muodostuu materiaalin lämmönkestävyys. Yksi vaihtoehto metallin korvaajaksi voisivat olla keraamiset sintratusta piikarbidista valmistetut putket, jotka kestävät eroosiota, korroosiota ja enintään 1900 °C lämpötiloja (Saint-Gobain 2022). Keraamiset putket ovat kuitenkin vielä harvinaisia sekä tyypillisiä metalliputkia kalliimpia ja vaikeampia liittää toisiinsa. Suuremman energiatiheyden lisäksi korkean lämpötilan hiekkavarastot voisivat mahdollistaa höyryn tai sähkön tuottamisen.

Suuren kokoluokan hiekkalämpövarastot kilpailevat markkinassa vesilämpövarastoja vastaan. Vesilämpövarastojen etuja ovat pidempiaikainen käyttökokemus, suurempi purkuteho sekä mahdollisuus kausivarastointiin ja hukkalämmön tehokkaampaan hyödyntämiseen. Hiekkalämpövarasto puolestaan tarjoaa edullisempaa energiakapasiteettia, korkeampia varastointilämpötiloja sekä paremman energiatiheyden ja hyötysuhteen, sillä varaston sisäisiä häviöitä kylmän ja kuuman veden välillä tai vuotoja ei tapahdu (Eronen 2023). Vesilämpövarastolla voidaan varastoida lämpöpumppujen tuottamaa edullista lämpöä, kun taas hiekkalämpövarastot hyödyntäisivät tuulivoiman aiheuttamia sähkön hinnanvaihteluita. Hiekkalämpövarasto voidaan sijoittaa joustavasti lämpö- ja sähköliittymien solmukohtaan. Suuri vesilämpövarasto puolestaan tarvitsee louhitun kallioluolan ja sen luvitus on hankalampaa.

Suuren hiekkalämpövaraston toteutus Kymijärven voimalaitosten yhteyteen loisi uudenlaisen mahdollisuuden edullisen pörssisähkön hyödyntämiseen ja kaukolämmöntuotannon säätelyyn. Varasto sisältäisi vähän liikkuvia osia ja olisi pitkäaikainen investointi edullisilla käyttö- ja kunnossapitokustannuksilla. Projektin tuottavuus riippuu polttoaineiden ja sähkön pörssihinnan kehityksestä, mutta sitä voidaan parantaa mitoittamalla kapasiteetti vastaamaan tuulivoiman tuotantoa ja lisäämällä lataustehon suhdetta purkutehoon. Purkutehon lisäys edesauttaa suurimpien tuotantopiikkien hyödyntämistä, mutta sitä rajoittaa hiekan heikko lämmönjohtavuus. Lämmönsiirtoputkia tulisi olla riittävästi, sillä niiden välinen etäisyys vähentää purku- ja lataustehoa kuvassa 23 esitetyllä tavalla. Hiekan joukkoon asetetut lämpövastukset voivat ylikuumentua ja niiden vaihtaminen on huomattavasti ulkoista asennusta hankalampaa. Varaston lämpötiloja tulisikin seurata jatkuvasti. Nykyteknologialla varaston lämpötilan rajaaminen 600 ^{o}C lämpötilaan on järkevää, mutta kehitystä kannattaa seurata.

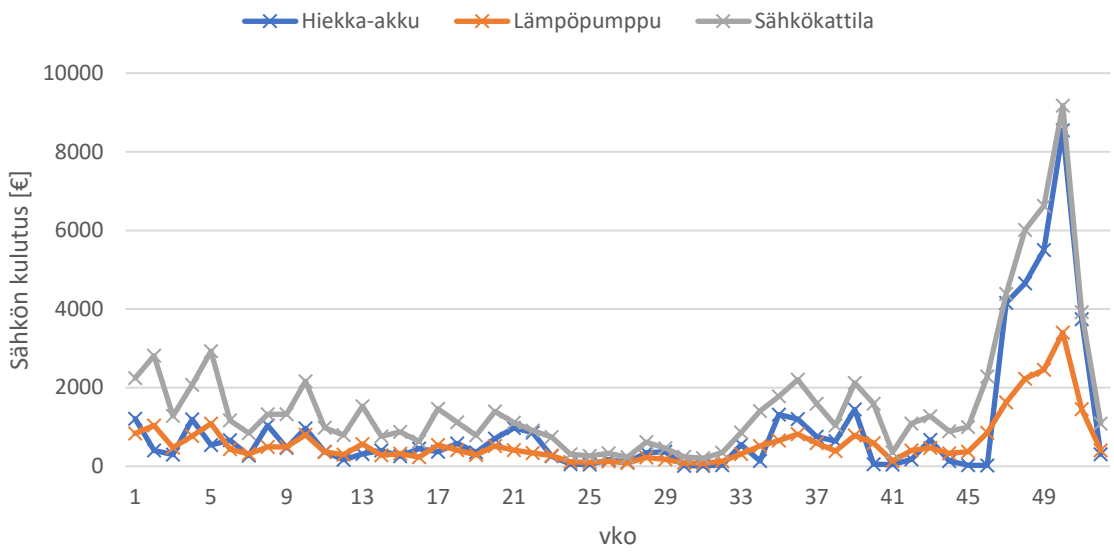
6.2 Muut käyttökohteet

Suuren hiekkalämpövaraston lisäksi lämmön varastoinnille voisi olla käyttöä kaukolämpöverkon hännissä. Kaukolämmön toimittaminen verkon kaukaisimmille asiakkaille hankaloituu erityisesti pitkillä pakkasjaksoilla, jolloin paikallisen huipputehon tarve kasvaa. Verkon hännissä lämmön kysyntä on pääverkkoa vähäisempää, mikä johtaa pienempään tehontarpeeseen. Fossiilisen maakaasulla tai öljyllä tuotetun huipputehon ohella kaukolämpöä voidaan tuottaa lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla. Molemmat käyttävät sähköä, jonka hinta on usein korkeimmillaan suurimman lämmöntarpeen aikana. Hiekkalämpövarasto

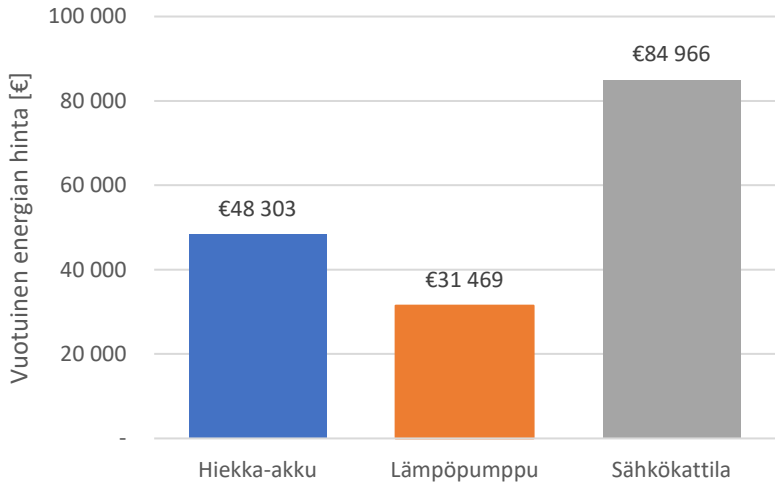
mahdollistaisi lämmön tuottamisen edullisemman pörssisähkön tunneilla ja jakelun muun kaukolämmöntuotannon kustannusten mukaan. Varaston purkamisen aikainen sähkön omakäyttö rajoittuu puhaltimen tehoon, joka on hyvin pieni verrattuna lämmön tuottamiseen. Lämpöä voidaan varastoida muutamista päivistä viikkoihin varaston koon mukaan.

Hiekka-akun pienentyessä sen hyötysuhde heikkenee ja suhteellinen energian varastointikustannus kasvaa. Toisaalta kilpailu kaukolämpöverkon hännissä on helpompaa, sillä keskitetyn lämmöntuotannon sijasta hinta vertautuu hajautettuun huipputuotantoon, jonka päästöoikeuden hinta on kasvussa. Toinen varteenotettava verrokki on lämpöpumppulaitos, joka tarvitsee hukkalämpövirran toimiakseen parhaalla hyötysuhteella. Kuten kappaleessa 3.4.2 todettiin, lämpöpumpun suhteellinen kilpailukyky paranee vuotuisten käyttötuntien kasvaessa korkean COP-kertoimen ja suurten investointikustannusten vuoksi. Vuositasolla pumppuvoimalaitos voikin osoittautua kilpailukykyisemmäksi ratkaisuksi erityisesti, jos samalla tuotetaan jäähdytystä ja kesäisin kaukokylmää. Hiekkalämpövaraston kilpailukyky perustuisi pienempiin investointikustannuksiin, edulliseen tehoreserviin ja vapaampaan sijaintiin.

Hiekka-akun, lämpöpumpun ja sähkökattilan energiakustannuksia verrataan vuoden 2022 Suomen aluehinnoilla (Nord Pool 2023). Jokaisen vaihtoehdon lämpötehoksi määritetään 200 kW ja kaukolämmön päiväkohtainen tuotanto arvioidaan kuvan 35 CHP-laitosten suhteellisesta sähköntuotannosta. Tällöin vuotuinen kaukolämmön kokonaistarve olisi noin 550 MWh. Hiekka-akun hyötysuhteeksi määritetään 90 % ja käytetyn sähkön hinta muodostuu kunkin viikon edullisimman päiväkohtaisen hintakeskiarvon mukaan. Lämpöpumppu toimii COP-kertoimella kolme ja sähkökattila muuntaa sähköä kaukolämmöksi 100 % hyötysuhteella. Lämpöpumpun ja sähkökattilan käyttämän sähkön hinta määrittyy päiväkohtaisten keskimääräisten markkinahintojen ja kaukolämmön kysynnän mukaan. Tällöin viikoittaisen sähkön energiakustannukset voidaan esittää kuvassa 40 ja vuotuisen energiankäytön kustannukset kuvassa 41. Todellisuudessa hiekka-akku, lämpöpumppu tai sähkökattila ei tuotettaisi kaikkea alueilla käytettyä lämpöä vaan verkossa olisi myös muuta perustuotantoa, joka määrittää teknologioiden käyttöasteen. Vertailu tuo kuitenkin esiin teknologioiden ominaispiirteitä muuttuvilla energian hinnoilla. Viime vuoden energian hinnat olivat normaalia korkeampia, mutta tämä ei itsessään vaikuta teknologioiden väliseen kilpailukykyyn.



Kuva 40. Hiekka-akun, lämpöpumpun ja sähkökattilan viikoittaiset energiakustannukset

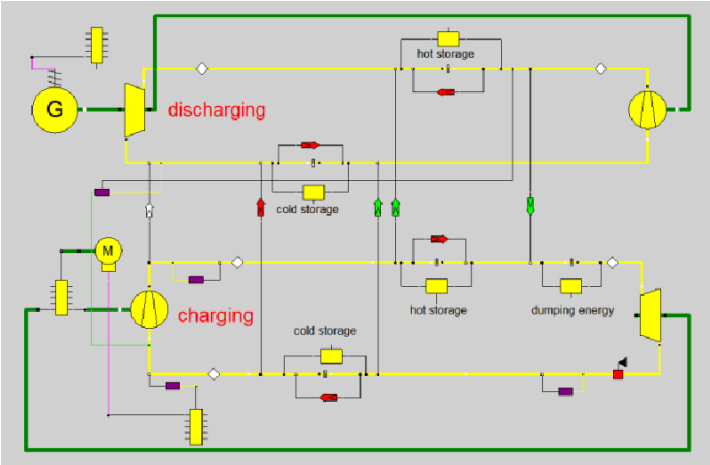


Kuva 41. Hiekka-akun, lämpöpumpun ja sähkökattilan vuotuiset energiakustannukset

Kuvasta 40 huomataan, että sähkökattila olisi kallein vaihtoehto jokaisessa tilanteessa. Toisaalta sen investointikustannukset ovat verrattain edulliset ja kattila soveltuu nopeaan tehotasapainon ylläpitoon. Hiekka-akku hyötyy suhteessa eniten muuttuvista energian hinnoista tehden siitä edullisimman vaihtoehdon viikkoina, joina kuvan 33 tuulivoimatuotanto on suurimmillaan. Akun energiakapasiteetin kasvattaminen on edullista, jolloin otollinen 2–3 viikon varastointiaika on mahdollinen. Lisäksi hiekkalämpövaraston latausteho voitaisiin valita esimerkiksi kaksinkertaiseksi purkutehoon nähden, jolloin oletus viikon edullisimman päivän hintakeskiarvosta on oikeansuuntainen. Todellisuudessa akkua ladattaisiin tuntikohtaisesti hyödyntäen myös vuorokauden sisäistä hintojen vaihtelua. Lämpöpumppu puolestaan

hyötyisi eniten tasaisista energian hinnoista korkean hyötysuhteensa vuoksi. Tämä huomataan erityisesti loppuvuoden pitkästä tuulettomasta jaksosta. Muina ajankohtina hiekka-akun ja lämpöpumpun energiakustannukset olisivat lähellä toisiaan. Viime vuoden markkinahinnoilla lämpöpumpun käyttämä energia olisi tullut noin 35 % hiekka-akkua edullisemmaksi. Vertailu ei kuitenkaan huomioi lämpöpumpun korkeampia investointikustannuksia tai käyttö- ja kunnossapitokuluja. Lämpöpumpun ja sähkökattilan kilpailukykyä voitaisiin parantaa suoralla sähkön varastoinnilla, mikäli akkujen hinnat jatkavat laskuaan.

Hiekkalämpövarasto voi tulevaisuudessa mahdollistaa edullisen kaukolämmön tuotannon lisäksi sähkön varastoinnin jopa 75 % hyötysuhteella. Korkealla hyötysuhteella toimiva sähkövarasto tarvitsee suuria lämpötilaeroja, jolloin varastoidun hiekan lämpötilan tulisi ylittää 1000 °C. Saksalaisyhtiö Enolcon on tällä hetkellä lähimpänä tavoitteen saavuttamista, sillä ensimmäisten noin 65 % hyötysuhteisiin yltävien kaupallisten OPTES-laitosten on tarkoitus tulla markkinoille vuoden 2023 aikana. Teknologialla on mahdollisuus saavuttaa huomattavasti litiumioni akkuja korkeampi energiatiheys. Lämmönsiirron väliaineena toimii ilman sijasta inertti typpi, jolle suunnitellaan omia turbokompressoreja ja turbiineita yhdessä Atlas Copcon kanssa. (Schneider et al. 2020, 31–32). Hiekkalämpövaraston toimintaperiaate esitellään kuvassa 42. Kaasuturbiinin avulla purettavan varauksen hukkalämpö voitaisiin hyödyntää Suomen olosuhteissa kaukolämmön tuotannossa, hyötysuhteen parantamiseksi.



Kuva 42. OPTES-hiekkalämpölaitoksen prosessikaavio (Schneider et al. 2020, 31)

Polar Night Energy puolestaan suunnittelee hiekka-akku teknologiansa monipuolistamista mahdollistamalla teollisuushöyryn sekä kaukokylmän tuotanto. Teollisuuden tarvitsemaa höyryä voitaisiin tuottaa liittämällä hiekka-akkuun perinteisen kaukolämmönvaihtimen sijasta höyrystin. Kaukokylmän tuotannossa yhtiö suunnittelee käyttävänsä kappaleessa 2.2 mainittua lämpökemiallista absorptioprosessia. (Eronen 2023)

7 Yhteenveto

Valtaosa valtioista on sitoutunut hiilineutraalius tavoitteisiin, joiden tarkoituksena on pysäyttää ilmaston lämpeneminen 1,5 celsiusasteeseen. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää muutoksia muun muassa sähkön ja lämmön tuotannossa, teollisuudessa sekä liikenteessä. Noin 60 % maailman sähköstä ja yli 80 % energian tuotannosta pohjautuu edelleen fossiiliseen kivihiileen, maakaasuun ja öljyyn, mutta uusiutuvan aurinko- ja tuulivoiman osuus kasvaa nopeasti tuotantokustannusten laskiessa (Ritchie et al. 2022). Uusiutuvan sähkön tuotanto on avainasemassa vihreässä siirtymässä, sillä sen avulla voidaan parantaa järjestelmän energiatehokkuutta sekä poistaa päästöjä muilta sektoreilta. Suomi on yksi päästöttömän sähköntuotannon edelläkävijöistä, mutta kasvava tuulivoiman osuus on jo havaittavissa alueellisen sähkömarkkinan hinnan vaihteluna. Kehitys ei ole hidastumassa, sillä sähköistyminen lisää uusiutuvan tuotannon kysyntää ja tuotantokapasiteetti kehittyy markkinavetoisesti.

Suomi on osa Pohjoismaista sähköverkkoa, jonka tehotasapaino tulee ylläpitää kaikissa tilanteissa. Sään mukaan vaihtelevan tuotannon yleistyminen aiheuttaa haasteita, joihin pyritään vastaamaan kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämillä säätösähkö- ja reservimarkkinoilla. Joustavan kysynnän ja tuotantoreservien lisäksi valtioiden välille ollaan rakentamassa uusia voimalinjoja ja putkiyhteyksiä, jotka mahdollistavat laajemman energiamarkkinan. Kyseiset keinot ovat kuitenkin rajalliset ja jokainen valtio vastaa lopulta omasta kantaverkostaan. Tämän vuoksi laajamittainen energian varastointi on houkutteleva ja potentiaalisesti kustannustehokkain työkalu osaksi tulevaisuuden hiilineutraalia energiajärjestelmää.

Energiavarastot käsittävät joukon teknologioita, joilla voidaan varastoida tuotettua sähköä ja lämpöä aina muutamasta sekunnista vuosiin vaihtelevissa mittakaavoissa. Pumppuvoimalaitoksia on käytetty sähkön kysynnän tasaamiseen jo vuosikymmenien ajan, mutta joukko muita kantaverkon tehotasapainon ylläpitoon soveltuvia teknologioita on vasta yleistymässä. Näistä maailmanlaajuisesti merkittävimmät ovat sähköautoissakin käytetyt litiumioni akut sekä elektrolyysereillä erityisesti teollisuuden tarpeisiin tuotettu vety. Kantaverkkoon liitettävä stationäärinen litiumakkuvarasto toimii korkealla 95 % hyötysuhteella, mutta nimellinen varastointiaika rajoittuu noin pariin tuntiin. Elektrolyysin hyötysuhde on nykyisin noin

60–70 %, mutta vetyä voidaan varastoida pitkiäkin aikoja. Tuotantoon valittu teknologia vaikuttaa laitoksen kykyyn reagoida sähkön markkinahintojen muutoksiin.

Tuntuvan lämmön varastointi on osoittautumassa kustannustehokkaaksi vaihtoehdoksi sekä lämmön, että sähkön osalta edullisten materiaalikustannusten vuoksi. Sulasuolaan pohjautunutta teknologiaa käytettiin alkujaan aurinkolämmön varastointiin, mutta sitä ollaan korvaamassa muun muassa hiekalla korkean lämpötilan sovelluksissa. Matalilla lämpötiloilla energiaa voidaan varastoida veteen, mutta tällöin menetetään mahdollisuus sähkön tuotantoon. Litiumioniakkujen ohella markkinoille on tulossa myös muita akkuteknologioita, jotka hyödyntävät yleisempiä ja edullisempia materiaaleja hyötysuhteen kustannuksella. Sulametalli- ja natriumrikki akut vaikuttavat tällä hetkellä potentiaalisimmilta vaihtoehdoilta, mutta myös virtausakkuteknologia voi saavuttaa kaupallisen kannattavuuden lähivuosina.

Energian osalta Suomen toimintaympäristö määräytyy pohjoisesta sijainnista aiheutuvan lämmitystarpeen, matalan asukastiheyden, laajan metsäpeitteen sekä korkean teknologiaosaamisen mukaan. Pohjoinen sijainti ja harva asutus mahdollistavat suuren tuulivoimapotentiaalin, mutta aurinkovoiman tuotanto painottuu voimakkaasti kesään. Maltilliset korkeuserot rajoittavat vesivoiman kapasiteetin nykyiselle 3200 MW tasolle, josta noin kaksi kolmasosaa on padottua. Rakennusten talvilämmitys vaatii energiaa, jota jaetaan kaupungeissa keskitetysti kaukolämpöverkon kautta. Suuri osuus kaukolämmöstä tuotetaan jatkossakin biomassalla, jota syntyy metsäteollisuuden sivuvirroista. Rinnalle on kuitenkin tulossa enenevissä määrin hukkalämpöä ja sähkölämmitystä, joka hyödyntää uusiutuvan energiantuotannon aiheuttamia hinnan vaihteluita. Kehittynyt teknologia mahdollistaa älykkäiden sähköverkkojen käyttöönoton, joka itsessään mahdollistaa kasvavan kulutusjouston. Samalla valveutuneet kuluttajat tulevat olemaan entistä aktiivisempia toimijoita energiamarkkinoilla hyödyntäen aurinkovoimaa, akkuvarastoja ja kaksisuuntaisia kaukolämpöverkkoja.

Edellä kuvatussa hiilineutraalissa toimintaympäristössä olisi tarvetta laajamittaiselle energian varastoinnille ja mahdollisuus energian viennille. Nykyinen tuulivoimakapasiteetti tulee yli kaksinkertaistumaan vuoteen 2030 mennessä. Tämän lisäksi Suomessa on runsaasti käyttämätöntä tuulivoimapotentiaalia merialueilla ja itäisissä maakunnissa, joiden hyödyntämistä on vasta alettu selvittämään. Kehittyvä kantaverkko, kapasiteetin maantieteellinen hajauttaminen sekä kasvavat voimalakoot tasaavat tuulivoiman tuotantoa ja lisäävät huipunkäyttöaikaa. Rakenteilla on myös suuria aurinkovoimaloita, jotka lisäävät edullisen sähkön tuotantoa erityisesti kesäaikaan. Suomi on sitoutunut ydinvoimatuotantoon vuosisadan

loppupuolelle saakka uuden Olkiluoto 3 voimalaitoksen myötä, mutta alhaisten polttoainekustannusten vuoksi laitokset eivät juuri jousta muun tuotannon mukaan. Vesivoimakapasiteetin pysyessä samana, sen suhteellinen säätökyky heikkenee muun tuotannon lisääntyessä. Lyhyen aikavälin tehosäätö voitaisiin suorittaa akkuvarastoilla, mikäli niiden hinta jatkaa laskuaan. Laajamittaista päästöttömän vedyn tuotantoa ollaan vasta suunnittelemassa, mutta sillä voisi olla merkittävä tasaava vaikutus sähkön markkinahintoihin. Kaupallinen toiminta vaatii kuitenkin vakiintuneita siirtoyhteyksiä ja markkinoiden kehittymistä.

Työn lähtökohtana oli tutkia mahdollisuutta muuntaa vanha hiilikattila suureksi hiekkalämpövarastoksi. Ajatus osoittautui mahdottomaksi kattilarakenteen ja kannatinpalkkien kestävyyden sekä hiekan heikon lämmönjohtavuuden vuoksi. Kokonaan uuden hiekkalämpövaraston toteutusta vanhan kattilan tilalle tai rakennuksen ulkopuolelle kuitenkin jatkettiin. Mahdollisen hiekka-akun purkutehoksi määritettiin 30 MW, jotta sillä olisi käytännön vaikutusta suuressa kaukolämpöverkossa. Polar Night Energyn hiekka-akkutekniikka osoittautui käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvaksi kolmen kilpailevan hiekkalämpövaraston joukosta. Akku koostuisi sylinterimäisestä hiekkatilavuudesta ja sen läpäisevästä lämmönsiirtoputkistosta. Lämmönsiirtoaineena käytettäisiin normaalipaineista ilmaa, sillä hiekka olisi lämmönsiirtoa rajoittava tekijä. Ilmaa kuumennettaisiin ulkoisten sähkövastusten avulla ja se johdettaisiin hiekkamassan läpi puhaltimella ja virtausta ohjaavilla säätöpelleillä. Hiekkamassan keskelle voitaisiin myös asentaa kiinteitä sähkövastuksia lataustehon lisäämiseksi.

Latauksensa kaukolämmönvaihtimen kautta purkavan varaston optimaalista kokoa tarkasteltiin sähkön hintaan vaikuttavan tuulivoimatuotannon perusteella. Vuoden 2022 toteutuneella tuulivoimatuotannolla varaston tulisi riittää nimellisteholla noin 2–3 viikon varastointiaikaan. Monipuolistuva tuulivoimatuotanto tulee lisäämään voimaloiden huipunkäyttöaikaa, jolloin pitkistä tuulettomista jaksoista tulee jatkossa harvinaisempia. Investointikustannusten näkökulmasta lämmönsiirtoteho on kuitenkin mittakaavaa määräävämpi tekijä, ja varaston hyötysuhde kasvaa varaston suurentuessa. Varastoidun hiekan massan lisäksi sen lämpötila vaikuttaa varaston energiakapasiteettiin. Nykyisellä metallisia lämmönsiirtoputkia hyödyntävällä tekniikalla varaston enimmäislämpötila olisi noin 600 ^{o}C.

Kahden viikon varastointiaikaa vastaavan 10 GWh hiekkalämpövarasto maksaisi arviolta 9 miljoonaa euroa. Investoinnin kannattavuutta tarkasteltiin oletetulla 20 €/MWh sähkönhinnalla hakkeen 27 €/MWh polttoainekustannuksia vastaan. Laskennan tuloksena hiekka-akku maksaisi itsensä takaisin seitsemässä vuodessa, jolloin se olisi edelleen käyttöikänsä

alkuvaiheessa. Varasto sisältää vain vähän liikkuvia osia, jolloin myös huolto- ja kunnossapitokustannukset jäisivät alhaisiksi. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa eniten sähkön ja verrannaispolttoaineen hinta. Nykyisessä markkinatilanteessa polttoainekustannukset on todennäköisesti määritetty alakanttiin. Toisaalta sähkön hinnan vaihteluiden odotetaan lisääntyvän entisestään. Riittävällä latausteholla varustetun hiekkalämpövaraston toimintaedellytykset voivatkin osoittautua vielä edellä esitettyä arviota positiivisemmiksi.

Suuri energiatiheys, korkea hyötysuhde ja edullinen energiakapasiteetti ovat hiekkalämpövaraston kilpailuetuja vakiintuneempiin vesilämpövarastoihin verrattuna. Korkea varastointilämpötila tarjoaa myös jatkossa mahdollisuuksia prosessihöyryn tuotantoon ja sähkön varastointiin. Vesilämpövarasto puolestaan mahdollistaa tehokkaamman hukkalämmön hyödyntämisen sekä suuressa kokoluokassa lämmön kausivarastoinnin. Vesilämpövaraston purkutehon kasvattaminen on myös hiekkalämpövarastoa edullisempaa ja yksinkertaisempaa, sillä hiekan lämmönjohtavuudesta ei muodostu rajoittavaa tekijää.

Pienemmän mittakaavan hiekkalämpövarastoja voitaisiin hyödyntää kaukolämpöverkon hännissä, joissa tehontarve on pääverkkoa maltillisempi. Tällöin varaston hyötysuhde laskee noin 90 prosenttiin, mutta kilpailu muita vaihtoehtoja vastaan helpottuu. Pienemmällä hiekkalämpövarastolla voitaisiin vastata erityisesti pitkien pakkasjaksojen asettamaan haasteeseen, jolloin kaukolämpöverkon teho ei välttämättä riitä kaukaisimmille asiakkaille ilman huipputehon käyttöä. Huipputeholaitokset ovat tyypillisesti maakaasu tai öljykäyttöisiä, mutta myös pienet sähkökattilat ovat hiljalleen yleistymässä. Hiekkalämpövarastolla olisi selkeä kilpailuetu molempia vaihtoehtoja vastaan, sillä fossiilisten polttoaineiden ja päästöoikeuksien hinnat ovat kasvussa, ja sähkökattila ei kykene hyödyntämään edullisempia sähkön markkinahintoja ilman erillistä lämpövarastoa. Tämän vuoksi hiekka-akun varteenotettavin kilpailija olisi lämpöpumppu, joka kykenee tuottamaan noin kolminkertaisen lämpömäärän käyttämästään sähköstä. Lämpöpumpun vuotuiset energiakustannukset olisivat olleet vuoden 2022 hintatasolla edullisemmat, mutta investointikustannukset suuremmat.

Tulevaisuuden hiilineutraalin energiamarkkinan sähkönhinnat tulevat heilahtelemaan nykyistä enemmän erityisesti kasvavan tuulivoimakapasiteetin myötä. Tämä avaa uusia mahdollisuuksia, joihin energian varastoinnilla voitaisiin tarttua. Monipuolisen ja kustannustehokkaan varastointikapasiteetin rakentaminen laskisi kuluttajahintoja ja mahdollistaisi energian viennin Suomen ulkopuolelle. Hiekkalämpövarasto osoittautui potentiaaliseksi teknologiaksi edullisen pörssisähkön tehokkaampaan hyödyntämiseen kaukolämpöverkoissa.

Lähteet

Ambri. 2023. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 2.3.2023. Saatavissa: https://ambri.com/

BATSTORM project. 2018. *Battery storage to drive the power system transition.* EU. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage_en

Bloess, A., Schill, W.P. & Zerrahn, A. 2018. *Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials.* Applied Energy 212, 1611-1626. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.073

BNEF. 2022. *Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 9.2.2023. Saatavissa: https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/

Bonk, A. & Bauer, T. 2021. *Solar Salt – Thermal Property Analysis.* Saatavissa: https://doi.org/10.57676/3rea-p782

Brauns, J. & Turek, T. 2020. *Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review.* Processes 8, 248. Saatavissa: https://doi.org/10.3390/pr8020248

Cabeza, L. F. 2021. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. London, United Kingdom: Elsevier.

Calefa, 2020. *HotLevel® -kuumalämpöpumppu mullisti energiantuotannon.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 24.3.2023. Saatavissa: https://www.calefa.fi/hotlevel/

Centrica. 2022. *Centrica starts work on 50MW battery storage plant at former gas power station.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 24.2.2023. Saatavissa: https://www.centrica.com/media-centre/news/2022/centrica-starts-work-on-50mw-battery-storage-plant-at-former-gas-power-station/

DOE. 2021. *Global Energy Storage Database.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 9.2.2023. Saatavissa: https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html

Ding, W. et al. 2019. *Molten chloride salts for next generation concentrated solar power plants: Mitigation strategies against corrosion of structural materials.* Solar Energy Materials and Solar Cells 193, 298–313.

Energiateollisuus ry. 2023a. *Energiavuosi 2022 Sähkö.* Saatavissa: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf

Energiateollisuus ry. 2023b. *Kaukolämpöverkkoja yli 150 000 km.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 20.2.2023. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot

Energiateollisuus ry. 2023c. *Energiavuosi 2022 Kaukolämpö.* Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2022.pdf

Energiavirasto. 2022. *Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021.* Saatavissa: https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021

Engineering ToolBox. 2003. *Thermal Expansion - Linear Expansion Coefficients.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 27.3.2023. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html

Eronen, T. 2023. Polar Night Energy Oy:n toimitusjohtajan sähköpostihaastattelu 3.4.2023.

Euroopan komissio. 2022. *The role of renewable H_2 import & storage to scale up the EU deployment of renewable H_2.* Saatavissa: https://data.europa.eu/doi/10.2833/727785

Euroopan komissio. 2023. *Hydrogen.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 10.2.2023. Saatavissa: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

Fingrid. 2022a. *Fingridin sähköjärjestelmävisio 2022 – tulevaisuuden järjestelmän skenaarioluonnokset.* Saatavissa: https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/suomen-sahkojarjestelman-tulevaisuusskenaariot-julkaistu/

Fingrid. 2022b. *Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2022–2031.* Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/kehittamissuunnitelma/

Fingrid. 2023a. *Johdanto sähkömarkkinoihin.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 29.3.2023. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#taseselvitys

Fingrid. 2023b. *Avointa data sähkömarkkinoista ja voimajärjestelmistä.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 12.4.2023. Saatavissa: https://data.fingrid.fi/

Fortum. 2020. Vartiainen, E. *Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 27.2.2023. Saatavissa: https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/fort-hedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin

Hunt, J. D. et al. 2020. *Global resource potential of seasonal pumped hydropower storage for energy and water storage.* Saatavissa: https://doi.org/10.1038/s41467-020-14555-y

Hurttila, E. 2022. *Hiekkalämpövaraston tekniikka ja käyttö.* [Opinnäytetyö]. Saatavissa: https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022061317811

Ibrahim, A., Ryu, Y., & Saidpour, M. 2015. *Stress Analysis of Thin-Walled Pressure Vessels.* Modern Mechanical Engineering, 5, 1-9. Saatavissa: http://dx.doi.org/10.4236/mme.2015.51001

IEA. 2010. *Technology Roadmap – Concentrating Solar Power.* Saatavissa: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-concentrating-solar-power

IEA. 2022. *ETP Clean Energy Technology Guide.* IEA, Paris. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 13.2.2023. Saatavissa: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergmann, T. L. & Lavine, A. S. 2017. *Incropera´s principles of heat and mass transfer.* Wiley-Blackwell.

IRENA. 2017. *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.* International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Saatavissa: https://www.irena.org/publications/2017/oct/electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets

IRENA. 2020. *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5ºC Climate Goal*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Saatavissa: https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction

Kreyszig, E., Kreyszig, H. & Norminton, E. J. 2011. *Advanced Engineering Mathematics*. Wiley, Hoboken, NJ.

Lahti Energia. 2022. *Lämpömaksuhinnasto.* Saatavissa: https://www.lahtienergia.fi/wp-content/uploads/2022/09/Lampomaksuhinnasto-ilman-palveluhinnastoa-01112022.pdf

Mäkelä, M., Öistämö, J., Soininen, L. & Tuomola, S. 2019. *Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä.* 20. painos. Tampere: Tammertekniikka: AMK-kustannus.

Nord Pool. 2023. *Day-ahead prices.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 12.4.2023. Saatavissa: https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Daily/?view=table

NREL. 2021. *NREL Options a Modular, Cost-Effective, Build-Anywhere Particle Thermal Energy Storage Technology - Energy Storage in Sand Offers Low-Cost Pathway for Reliable Electricity and Heat Supply in Renewable Energy Era.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 1.3.2023. Saatavissa: https://www.nrel.gov/news/program/2021/nrel-options-a-modular-cost-effective-build-anywhere-particle-thermal-energy-storage-technology.html

Ouchi, T., Kim, H., Spatocco, B. & Sadoway, D. 2016. *Calcium-based multi-element chemistry for grid-scale electrochemical energy storage.* Nature Communications 7, 10999 Saatavissa: https://doi.org/10.1038/ncomms10999

PARAT. 2022. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 24.3.2023. Saatavissa: https://www.parat.no/fi/

Polar Night Energy. 2022. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 24.3.2023. Saatavissa: https://polarnightenergy.fi/

Power Mechanical. 2022. *Industrial electric boilers.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 1.3.2023. Saatavissa: https://www.powermechanical.com/industrial-electric-boilers/

Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P. 2022. *Energy.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 2.5.2023. Saatavissa: https://ourworldindata.org/energy

Saint-Gobain. 2022. *Hexoloy® SiC Process Tubes.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 25.4.2023. Saatavissa: https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/products/shapes/tubes/hexoloy-sic-process-tubes

Schlipf, D., Faust, E., Schneider, G. & Maier, H. 2017. *First Operational Results of a High Temperature Energy Storage with Packed Bed and Integration Potential in CSP Plants.* AIP Conference Proceedings 1850, 080024. Saatavissa: https://doi.org/10.1063/1.4984445

Schneider, G., Maier, H., Häcker, J. & Siegele, S. 2020. *Electricity Storage With a Solid Bed High Temperature Thermal Energy Storage System (HTTES) - A Methodical Approach to Improve the Pumped Thermal Grid Storage Concept.* Atlantis Highlights in Engineering, volume 6. Saatavissa: https://doi.org/10.2991/ahe.k.210202.005

Schweiger, G. Rantzer, J. Ericsson, K. & Lauenburg, P. 2017. *The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems*. Energy, 137, 661–669. Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.075

Sitra. 2021. *Enabling cost-efficient electrification in Finland.* Saatavissa: https://www.sitra.fi/en/publications/enabling-cost-efficient-electrification-in-finland/

SolarPACES. 2022. *NREL Results Support Cheap Long Duration Energy Storage in Hot Sand.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 22.2.2023. Saatavissa: https://www.solarpaces.org/nrel-results-support-cheap-long-duration-energy-storage-in-hot-sand/

STORASOL. 2022. *High Temperature Thermal Energy Storage (HTTES) Technology introduction – Technology for the future and today.* Saatavissa: https://storasol.com/wp-content/uploads/2022/12/191202-STORASOL-HTTES-technology-introduction.pdf

Suomen Tuulivoimayhdistys. 2023. *Toiminnassa olevat ja puretut voimalat.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 12.4.2023. Saatavissa: https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/toiminnassa-olevat-puretut

Svidró, J., Diószegi, A. & Svidró J.T. 2020. *The origin of thermal expansion differences in various size fractions of silica sand.* International Journal of Cast Metals Research, 33:6, 242-249. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1838078

TEM. 2023. *Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä*. Saatavissa: https://tem.fi/delegate/file/116946

Tilastokeskus. 2022. *Fossiilivapaan sähkön tuotannon osuus nousi 86 %:iin vuonna 2021*. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 14.2.2023. Saatavissa: https://www.stat.fi/julkaisu/cku28dfkw805d0b9922uxoyep

Toho Gas. 2022. *Installation of NAS batteries for promoting the widespread use of renewable energy - First attempt in the Tokai Region.* Saatavissa: https://www.tohogas.co.jp/langn/en/corporate/press/__icsFiles/afieldfile/2022/09/27/20220928.pdf

Trading Economics. 2023. *EU Carbon Permits.* [Verkkojulkaisu]. Viitattu 30.3.2023. Saatavissa: https://tradingeconomics.com/commodity/carbon

Vakkilainen, E. 2017. *Steam Generation from Biomass: Construction and Design of Large Boilers.* Amsterdam, Netherlands: Butterworth-Heinemann.

Vakkilainen, E. & Kivistö, A. 2017. *Sähkön tuotantokustannusvertailu.* Saatavissa: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-124-0

Vantaan Energia. 2021. *Lämmön kausivarasto – Kesän lämpö talteen talvea varten.* Saatavissa: https://vantaanenergia.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20220211135743/VantaanEnergia_Whitepaper_La%CC%88mmo%CC%88nKausivarasto_FI_2022.pdf

World Energy Council. 2016. *World Energy Resources E-Storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications.* Saatavissa: https://www.worldenergy.org/publications/entry/e-storage-shifting-from-cost-to-value-2016

Zhang, S., Liu, Y., Fan, Q., Zhang, C., Zhou, T., Kalantar-Zadeh, K. & Guo, Z. 2021. *Liquid Metal Batteries for Future Energy Storage.* Energy & Environmental Science. Saatavissa: 10.1039/D1EE00531F