



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Henri Iso-Mustajärvi

Lämpöenergian varastointi Tampereen Energialla

Energiavarastointi, Insinööri YAMK

Tekniikka

2025

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Henri Iso-Mustajärvi
Opinnäytetyön nimi	Lämpöenergian varastointi Tampereen Energialla
Vuosi	2025
Kieli	suomi
Sivumäärä	60 + 1 liite
Ohjaaja	Mikko Pieskä

Suomen kaukolämpöjärjestelmät ovat voimakkaan sähköistymisen aikakaudella, jota myös energiamurrokseksi kutsutaan. Kaukolämmöntuotanto siirtyy kohti polttoon perustumattomia tekniikoita, näitä ovat esim. sähkökattilat, lämpöpumput ja teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen. Sääolosuhderiippuvainen sähköntuotanto lisää sähkön hinnan volatiliteettia, joka lisää energianvarastoinnin tarvetta kaukolämmön tuotannossakin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lämpöenergian varastoinnin tarvetta Tampereen Energialla vuoden 2025 lopulta alkaen. Tutkimuksen kohteena oli myös muiden kaukolämpöyhtiöiden lämpövarastojen toiminnallisuuden selvitys ja laajemman käsityksen hankinta mitä mieltä muut kaukolämpöyhtiöt ovat energiavarastoinnin roolista modernissa kaukolämpösystemissä. Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli kartoittaa 2 erilaisen vaihtoehdon potentiaalia lämpövarastoksi Tampereen Energialle. Vaihtoehtoina tutkittiin Naistenlahden kallioluolalämpövaraston muuttamista lämpövarastoksi, sekä Polar Night Energyn hiekka-akua.

Johtopäätöksenä opinnäytetyössä selvisi, että Tampereen Energialla olisi käyttöä 20GWh lämpövarastolle. Parhaaksi vaihtoehdoksi nähtiin lämpövaraston rakentaminen Naistenlahden vanhaa öljyvarasto infrastruktuuria hyödyntäen. Lämpövarastoja tullaan lähivuosina näkemään lisää monen suomalaisen kaukolämpöyhtiön verkoissa.

ABSTRACT

Author	Henri Iso-Mustajärvi
Title	Lämpöenergian varastointi Tampereen Energialla
Year	2025
Language	Finnish
Pages	60 + 1 Appendices
Name of Supervisor	Mikko Pieskä

Finland's district heating systems are in an era of strong electrification, which is also referred to as the energy transition. District heating production is shifting towards technologies that do not rely on combustion, such as electric boilers, heat pumps, and the use of industrial waste heat. Weather dependent electricity generation increases the volatility of electricity prices, which in turn raises the need for energy storage in district heating production.

The purpose of this thesis was to investigate the need for thermal energy storage at Tampereen Energia starting from the end of 2025. The study also aimed to examine the functionality of thermal storage systems in other district heating companies and gain a broader understanding of how other district heating companies view the role of energy storage in modern district heating systems. The third research question was to explore the potential of two different alternatives for thermal energy storage at Tampereen Energia. The alternatives considered were converting the Naistenlahti rock cavern oil storage into a thermal energy storage facility and the sand battery of Polar Night Energy.

The conclusion of the thesis revealed that Tampereen Energia would benefit from a 20GWh thermal storage. The most favorable option was to build the thermal storage by utilizing the infrastructure of the old oil storage facility at Naistenlahti. In the coming years, thermal energy storage systems are expected to become even more common in the networks of many Finnish district heating companies.

Keywords Energy storage, Cavern thermal energy storage, Waste heat

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Opinnäytetyön tutkimusmenetelmät	7
1.2	Työn rakenne	8
2	KAUKOLÄMPÖ TAMPEREELLA	9
2.1	Voimalaitokset	10
2.1.1	Naistenlahti.....	10
2.2.2	Lielähti	12
2.2.3	Tammervoima.....	13
2.2.4	Lämpölaitokset	15
3	LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI	16
3.1	Lämpöenergian varastoinnin teoriaa.....	16
3.1.2	LCOE- mittari.....	17
3.2	Kallioluolalämpövarasto	18
3.3	Terässäiliö kaukolämpöakku	23
3.4	Kaivantovarasto	25
3.5	Hiekka-akku.....	27
4	KYSELYTUTKIMUS KAUKOLÄMPÖYHTIÖISTÄ	30
4.1	Tutkimusasetelma ja tutkimuskysymys	31
4.2	Aineiston keruu.....	31
4.3	Aineiston analysointi.....	32
4.4	Tutkimukseen liittyvät haasteet	32
4.5	Kyselyn rakenne	33
4.6	Kysymykset ja vastaukset.....	34
5	LÄMPÖENERGIAN VARASTOINNIN TARVE TAMPEREELLA.....	40

5.1	Tuotantopaletti 2025 vuoden lopulla	41
5.2	Tuotantopaletti vuodesta 2028 alkaen.....	45
6	NAISTENLAHDEN ÖLJYVARASTO	49
6.1	Toimintakuvaus ja rakenne.....	49
6.2	Paineettoman vs. Paineistetun kallioluolalämpövaraston kapasiteetti	50
6.3	Paineettoman vs. Paineistetun kallioluolalämpövaraston lataus- ja purkuteho	52
6.4	Paineeton vs. Paineellinen kallioluolalämpövarasto case Vaasa.....	53
6.5	Naistenlahden Luolalämpövaraston tyyppin valinta	56
7	HIEKKA-AKKU	59
7.1	Polar Night Energy ja hiekka-akun rakenne.....	59
7.2	Hiekka-akun toimintakuvaus, lataaminen	61
7.3	Hiekka-akun toimintakuvaus, purkaminen.....	62
7.4	Hiekka-akun käyttö	63
7.5	Hiekka-akun mahdollisuudet Tampereen Energialla.....	64
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	65
	LÄHTEET	67
	LIITTEET	71

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Naistenlahden voimalaitos (A- insinöörit, 2023).....	11
Kuva 2. Tammervoiman hyötyvoimalaitos. (Tammervoima, 2024).....	14
Kuva 3. Oulun 190 000m ³ Kallioluolalämpövarasto.....	19
Kuva 4. VECTES- järjestelmän kuvaus (Vantaan Energia, 2023).	20
Kuva 5. Tammervoiman KL- akku. Lt- mittaus 1-14. Ylin 94C ja alin 44C. (Tampereen Energia, 2024)	25
Kuva 6. Vojensin PTES- lämpövaraston geometria.(Xiang ja muut, 2025)	26
Kuva 7. Kiinteän aineen TES- järjestelmän operointi alue. (Renewable Energy Agency, 2020, s.68).	28
Kuva 8. KL- teho (MW), lämpötilan (C) funktiona. (Tampereen Energia, 2025)...	42
Kuva 9. KL- teho (MW), lämpötilan (C) funktiona. (Tampereen Energia, 2025)...	44
Kuva 10. Tuotantorakenne ajanjaksolla 7/2028 - 7/2029 (Tampereen Energia, 2025).	46
Kuva 11. Tuotantorakenne ajanjaksolla 7/2028 - 7/2029 20GWh lämpövaraston kanssa. (Tampereen Energia, 2025).....	47
Kuva 12. 20GWh lämpövaraston lataus- ja purkusykli ajalla 7/2028 - 7/2029 (Tampereen Energia, 2025).....	48
Kuva 13. Naistenlahden kallioluolaöljyvarasto. (Tampereen Energia, 2025).	50
Kuva 14. Vaskiluodon luolalämpövaraston prosessikaavio. (Björkman, 2024). ...	54
Kuva 15. Vaskiluodon korkeapaineinen kallioluolalämpövarasto. (Björkman, 2025).	56
Kuva 16. Polar Night Energyn hiekka-akun rakenne. (Polar Night Energy, 2025). 60	
Kuva 17. Hiekka-akun lataaminen (Polar Night Energy, 2025).	61
Kuva 18. Hiekka-akun purkaminen (Polar Night Energy, 2025).	62
Taulukko 1. Lielahden voimalaitoksen ajomallit.....	13
Taulukko 2. Kaukolämmityslaitosten tehot.....	15
Taulukko 3. Tuotantolaitoksien max. KL-tehot sähkön hintatason mukaan. (Tampereen Energia, 2025).....	42

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on lämpöenergian varastointi Tampereen Energian kaukolämpöverkossa. Tarkoituksena oli tutkia lämpöenergian varastoinnin tarvetta uusien LLT 45- sähkökattiloiden ja uusien kaukolämpöakkujen (1GWh) tulon jälkeen. Lisäksi työssä selvitettiin kahta lämpöenergian varastoinnin tekniikkaa sovellettavaksi Tampereen Energian kaukolämpöjärjestelmässä ja tehtiin kyselytutkimus 10 kaukolämpöyhtiölle. Kyselytutkimuksella haluttiin selvittää muiden suomalaisten yhtiöiden olemassa olevien lämpövarastojen toimivuutta, sekä tiedusteltiin yhtiöiden lähitulevaisuuden näkymiä ja asenteita lämmönvarastointia kohtaan.

Suomen energiajärjestelmä on nopeasti muuttuvassa tilassa jyrkästi lisääntyvän uusiutuvan energian ja yhteiskunnan sähköistymisen johdosta, tätä muutosta kutsutaan energiamurrokseksi. Sääolosuhderiippuvainen energiantuotanto, kuten tuuli- ja aurinkovoima kasvattaa tuotannon ja kulutuksen tasapainoeroja, voimakkaita hintavaihteluita sekä ennalta arvaamattomia tilanteita energiajärjestelmien kannalta. Näitä vaihteluita tulee tasapainottaa kysyntäjouston, energiavarastojen sekä joustavan tuotannon keinoin.

Tämän lisäksi tavoitteet hiilineutraaliin yhteiskuntaan siirtymiseksi EU regulaation sekä Tampereen Energian omistajan oman ohjauksen kautta ajaa kaukolämpöyhtiötä miettimään fossiilisten polttoaineiden vähentämisen mahdollisuuksia tuotantorakenteessa. (Honkapuro ja muut, 2020, s.7–10)

1.1 Opinnäytetyön tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyössä on kerätty ja analysoitu tietoa tapaustutkimuksen strategialla. ”Analysoimalla jotakin hyvinkin tarkkaan ajallisesti ja tilallisesti rajattua tapausta voidaan saada hedelmällistä tietoa. Tapauksesta tekee tapauksen se, että se on jollakin lailla rajattu esimerkki tutkittavasta laajemmasta ilmiöstä. Toisin sanoen tutkija pystyy perustelemaan, mitä ilmiötä tapaus edustaa ja mihin kontekstiin se

liittyy.” (Laine, Bamberg & Jokinen 2007; Ronkainen ym. 2011, 68—69; Piekkari & Welch 2020.)

Tämän tutkimuksen kohde on osa laajempaa ilmiötä, eli sähköistyvää kaukolämpöjärjestelmää energiamurroksessa. Kaukolämpöjärjestelmiä on Suomessa kymmeniä ja Tampereen Energian järjestelmä kuuluu tähän joukkoon omana uniikkina tapauksenaan.

Tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia monipuolisilla menetelmillä, yrittäen luoda tapauksesta kokonaisvaltaista kuvaa. Opinnäytetyössä yhdistellään useita aineistoja kuten muun muassa dokumentteja, muistioita ja tilastoja Tampereen Energialta, teoriatietoa oppikirjoista ja tieteellisistä artikkeleista, virastojen ja ministeriöiden nettisivuja, useampia haastatteluja ja kyselyitä asiantuntijoille sekä omaa havainnointia.

1.2 Työn rakenne

Työn rakenne on jaettu periaatteessa kolmeen osaan. Opinnäytetyön alkuosa koostuu asiaan johdatuksesta ja teoria osasta. Toisessa osassa, kappaleissa 4 & 5 selvitetään lämpöenergian varastoinnin tarpeita Tampereen kaukolämpöjärjestelmässä, sekä selvitetään kyselytutkimuksen avulla alan trendiä yleisemmällä tasolla Suomessa. Kolmannessa osassa on selvitetty kahta potentiaalista lämpövarastotekniikkaa Tampereen kaukolämpöjärjestelmään. Lopuksi kerrotaan johtopäätökset ja analysoidaan työn tuloksia.

2 KAUKOLÄMPÖ TAMPEREELLA

Tampereen kaupungin omistaman Tampereen Sähkölaitoksen toiminnan katsotaan alkaneen 15.11.1888, kun sen omistama 30 sähköpylvään ja kaarilampun muodostama kokonaisuus valaisi ensimmäistä kertaa Tampereen katuja. Myönteiset kokemukset sähkövalaistuksesta Finlaysonin puuvillatehtaan kutomosalista, jossa syttyi sähkövalo ensimmäistä kertaa Suomessa 15.3.1882, rohkaisivat kaupunkia suunnittelemaan katuvalaistuksen muuttamiseen öljylyhdyistä sähkölampujen käyttöön. Vuosikymmeniä Tampereen sähköntuotanto oli omavaraista ja perustui Tammerkoskesta saatuun vesivoimaan. 1938 Tampere tahdistettiin Imatran Voima Oy:n kantaverkkoon, josta lähtien Tampereelle saatiin myös tuontisähköä.

1960-luvulla Tampereen kaupunki halusi lisätä sähköntuotannon omavaraisuutta ja Sähkölaitokselle annettiin tehtävä esitellä tähän vaihtoehtoja. Taloudellisimmaksi ja toteutuskelpoiseksi vaihtoehdoksi valittiin vastapainesähkön tuotantoon perustuvan lämmitysvoimalaitoksen rakentaminen. Kaukolämmityksen historia Tampereella alkoi syyskuussa vuonna 1964, kun ensimmäinen kiinteistö Tampereen Hämeenpuistossa alkoi saada lämpöä Ratinaan rakennetun lämpökeskuksen välityksellä. Lämpökeskuksien rakentaminen Ratinaan ja Kalevaan oli välttämätön kaukolämpöverkon ja kaukolämpökuorman kasvattamiseksi alkuvaiheessa. Tällä luotiin edellytykset ensimmäisen CHP-voimalaitoksen (yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto) rakentamiselle ja liittämiseksi kaukolämpöverkkoon vuonna 1971. (Toiva, 2017)

Tänä päivänä Tampereen Sähkölaitos nimi on muuttunut Tampereen Energiaksi ja kaukolämpöverkko on kasvanut yli 650 kilometrin pituiseksi kulkien Tampereen, Pirkkalan ja Ylöjärven kaupunkien alueilla. Lämmön myyntiä Tampereen energialla oli vuonna 2023 yli 2200GWh. (Energiateollisuus, 2024)

CHP- Voimalaitoksia Tampereella on Naistenlahdessa ja Lielahdessa, sekä Tarastenjärvellä jätteenpolttolaitos Tammervoima. Voimalaitoksien lisäksi kaukolämmön tuotannosta vastaavat sähköä tuottamattomat lämpölaitokset eri puolilla kaukolämpöverkkoa.

2.1 Voimalaitokset

2.1.1 Naistenlahti

Voimalaitostoiminta Naistenlahden tontilla alkoi vuonna 1971, kun Naistenlahti 1 voimalaitos valmistui. Laitoksen kattila tilattiin Ahlströmin Varkauden konepajalta ja turbiinigeneraattori paketti itäsaksalaiselta Bergmann-Borsigilta. Polttoaineenaan Naistenlahti 1 käytti alkuun raskasta polttoöljyä, kunnes 1983 kattila muutettiin turvekäyttöiseksi. Kaukolämpöteholtaan alkuperäinen Naistenlahti 1 oli 113MW ja sähköteholtaan 62MW.

Naistenlahti 2 voimalaitosyksikkö otettiin käyttöön lokakuussa 1977. Naistenlahti 2 oli suunniteltu heti alusta jyrshinturvekäyttöiseksi. Kattila oli Tampellan toimitama ja höyryturbiini tilattiin samalta itäsaksalaiselta Bergmann-Borsigilta. Laitos oli sähköteholtaan 66MW ja kaukolämpöteholtaan 117MW kokoinen. (Toiva, 2017, s. 87-91)

Vuonna 2000 Naistenlahti 1 aloitti muutostöiden jälkeen kaasukombivoimalaitoksena, nostaen sähköntuotantokapasiteettiaan 130MW tasolle. Naistenlahti 2 modernisoitiin vuonna 1998 kerrosleijukattilaksi. Molemmat Naistenlahti 1 & 2 voimalaitosyksiköt poistuivat käytöstä 2020- luvun alussa Naistenlahti 3 valmistumisen myötä.

Naistenlahti 3 voimalaitos valmistui vuonna 2022 ja on nykyhetkellä Tampereen Energian vuotuiselta tuotantomäärältään suurin laitos. Naistenlahti 3 kattilatoi-

mittajaksi valikoitui Valmet Technologies Oy. Kattilalaitos koostuu kiertoleijutekniikkaan perustuvasta CYMIC kattilasta, jonka höyryteho 191 MWth. Kiertoleijukattilassa tuotettu höyry toimitetaan olemassa olevaan, vanhaan Naistenlahti 2 höyryturbiiniin. Vanhasta laitoksesta käyttöön jäi myös Valmetin vuonna 2015 toimittama savukaasupesuri/lauhdutin yksikkö, josta saadaan täydellä virtauksella kaukolämmön lisätehoa 30-40MW. Alkuvuonna 2025 Naistenlahdessa otetaan käyttöön lisälämmöntalteenotto voimalaitoksen savukaasuvirrasta. Tämän jälkeen Naistenlahti 3 kaukolämpötehon käyttöalue kattaa 55-230MW alueen, säästöistä riippuen. (Afry, 2021)



Kuva 1. Naistenlahden voimalaitos (A- insinöörit, 2023).

Naistenlahti 3 säätömahdollisuuksiin kiinnitettiin paljon huomiota jo suunnitteluvaiheessa. Voimalaitos on varustettu kahdella reduktioventtiilillä, joka mahdollistaa laitoksen 100 % reduktioajon. Reduktioajolla tarkoitetaan tilannetta, jossa voimalaitoksen höyryturbiini on ohitettu joko kokonaan tai osittain.

2.2.2 Lielahdi

Lielahden voimalaitos sijaitsee Epilänharjun kupeessa läntisellä Tampereella. Kahden kaasuturbiinin ja höyryturbiinin kombivoimalaitos valmistui vuonna 1988. Voimalaitoksen prosessi koostuu kahdesta General Electricin MS 6001 -tyyppisestä maakaasua käyttävästä kaasuturbiinista, joidenka perässä on kytkettynä höyrykattilat. Höyrykattilat syöttävät Länsi-Saksassa valmistettua AEG-Kanis:in höyryturbiinia. Lisäkaasua syöttämällä höyrykattiloiden jälkipolttimille, Lielahden nimellistehot ovat täydellä sähköteholla n. 130MW sähköä, jolloin kaukolämpötehoa tulee n. 150MW. Naistenlahden tapaan, myös Lielahdi on varustettu 100% reduktiolla. Täydellä reduktioajolla laitoksella on mahdollista päästä hieman yli 200MW kaukolämpötehoon. Voimalaitoksen blokeista käytetään lyhenteitä LLT1 ja LLT2.

Maaliskuussa 2023 vihittiin käyttöön LLT3 sähkökattila. Norjalaisen Parat:in kuumavesielektrodikattila on sähköteholtaan 45MW. LLT3 sähkökattila koostuu elektrodisäiliöllä varustetusta paineastiasta ja lämmönvaihtimella varustetusta kierto-putkistosta, jolla lämpö siirretään kaukolämpöverkkoon. Kattila on asennettu Lielahden voimalaitoksen höyryturbiinisaliin ja kytketty olemassa olevaan kaukolämpöpiiriin. (Parat, 2022)

Voimalaitoksien esittelyssä on keskitytty ennen kaikkea niiden säätömahdollisuuksien esittelyyn, koska se on opinnäytetyön kannalta oleellista. Lielahden voimalaitoksella ajotapoja on lukuisia erilaisia. Päätökset seuraavan päivän ajojärjestyksestä tekee Tampereen Energian Energiamarkkinat -yksikkö, käyttöorganisaatiolta saatujen teknisten reunaehtojen mukaan. Tämän päivän hektinen sähkömarkkinan heilunta ohjaa tuotantoa monesti myös päivän sisällä tunti tunnista, tämä vaikuttaa etenkin Lielahden voimalaitoksen säätöihin. Kahden kaasuturbiinin, höyryturbiinin, lisäpolttojen, reduktioiden ja sähkökattilan kokonaisuus luo paljon eri kombinaatioita, joista kulloinkin yritetään löytää optimaalisin ajomalli.

Taulukko 1. Lielahden voimalaitoksen ajomallit.

	GT1 brutto		GT2 brutto	
	Min (-4Cel)	Max (-4Cel)	Min	Max (-4Cel)
Sähköteho brutto	31	40	31	39
Polttoainetehto	107	127	107	127
	Ilman lisäpolttoja		Lisäpolttoilla	
	Min (-4Cel)	Max (-4Cel)	Min (-4Cel)	Max (-4Cel)
Kaukolämpö (1blokki)	52	62	62	83
Kaukolämpö (2 blokkia+ht)	104	124	122	160
Kaukolämpö (2 blokkia red)	60	80	140	200
Kaukolämpö GT1+LLT3	64	104	114	146
Kaukolämpö LLT3	4	44		

Kuten taulukosta 1 voi nähdä, voi Lielahden voimalaitoksen kaukolämpötehon vaihtelu olla kaikkea välillä 4-200MW. Sähkötehon suhteen voidaan mennä 44MW kulutuksen puolella, kun ajetaan täyttä sähkökattilatehoa ja toisaalta sähköntuottoa voi kovalla pakkasella olla lähes 140MW. Vuonna 2025 kulutuksen ja tuotannon skaala laajenee entisestään, kun uusi LLT45 – projekti valmistuu ja sähkökattilateho nousee tontilla 145MW luokkaan.

2.2.3 Tammervoima

Kolmas Tampereen kaukolämpöverkkoon liitetty lämpöä ja sähköä tuottava voimalaitos on Tarastenjärven hyötyvoimalaitos Tammervoima. Tammervoima käyttää polttoaineenaan vuosittain 170 000 tonnia yhdyskuntajätettä, tuottaen 400GWh kaukolämpöä ja 70GWh sähköä. Tehoiltaan Tarastenjärven laitos on pienempi, kuin kaksi muuta Tampereen voimalaitosta. Sähkötehoa Tammervoiman höyryturbiinista lähtee täydellä sähköajolla 14MW ja kaukolämmön tuotanto on tällöin 50MW. Reduktioajossa, jolloin suurin osa höyryvirtauksesta johdetaan höyryturbiinin ohi suoraan lämmönvaihtimeen, sähköteho on 2,30MW ja kaukolämpöteho saadaan tällöin nousemaan 60MW:iin. (Tammervoima, 2024)

Tärkeänä osana Tammervoimaan kuuluu myös kaukolämpöakku. TaVo:n akku on mallia pystyssä seisova, lieriön mallinen eristetty terässäiliö. Akun kapasiteetti on 100MWh, lataus ja purkutehon ollessa max 15MW suuntaansa. Tammervoiman

KL- akku on ollut tärkeä osa tuotannon optimoinnissa ja esim. lämpölaitoksien viikatilanteista yli pääsemisessä. Akkua ladataan yleensä, kun rajakustannuksiltaan huokeampi jae antaa myöden, eli yleensä silloin kuin hakkeenpoltossa on vielä käyttämätöntä tehopotentiaalia jäljellä. Jos esimerkiksi Naistenlahti tai Hervannan hakelaitos käy vajaalla teholla, voidaan Tammervoiman akku laittaa lataukseen. Ladatulla energialla pyritään sitten myöhemmässä ajotilanteessa välttämään esimerkiksi kaasulämpölaitoksen käynnistäminen aamuvetoon purkamalla akkua verkkoon. Tammervoiman kaukolämpöakku on ollut todella hyödyllinen lisä Tampereen Energian lämmöntuotannon optimoinnissa. On kuitenkin huomattu, että akku on auttamatta liian pieni. Monesti lämpöenergiaa olisi enemmän ladattavaksi, kuin mitä TaVo:n akkuun saa ajettua. Niin ikään purkutilanteissa tehot ja akun kapasiteetti tulevat vastaan nopeasti. Nämä tosi elämän empiriset kokemukset olivat osaltaan opinnäytetyön aiheen keksimisen taustalla.



Kuva 2. Tammervoiman hyötyvoimalaitos. (Tammervoima, 2024).

2.2.4 Lämpölaitokset

Tässä kappaleessa käydään läpi Tampereen Energian lämpölaitokset lähinnä niiden ominaisuuksien osalta, joilla on merkitystä opinnäytetyön aiheen kannalta. Lämpölaitoksella tarkoitetaan laitosta, jolla tuotetaan pelkkää kaukolämpöä. Lämpölaitoksia operoidaan Lielahden voimalaitoksen valvomosta etänä, lisäksi jokaisella lämpölaitoksella on paikallisoperointi mahdollisuus.

Tärkeimpiä lämpölaitoksia ovat Hervannan hakelaitos (56MW) ja Sarankulman pellettilämpölaitos (37MW). Biolaitosten jälkeen ajoon tulevat kaasu- ja öljylämmityslaitokset ympäri kaupunkia.

Taulukko 2. Kaukolämmityslaitosten tehot

	Min	Max	Bio	Kaasu	Öljy
Hervannan hake	9	56	x		
Sarankulma 1	9	38		x	x
Sarankulma 2	9	37	x		
Nekala	9	120		x	x
Hakametsä	9	120			x
Hervanta öljy	5	95			x
Naistenlahti luola	9	90			x
Rahola	9	37		x	x
Ratina	9	40		x	x
Elovainio	1	15		x	x
Ollikka	2	20		x	x

Hervannan hake ja Sarankulman pellettilaitos toimivat ensisijaisina lämmityslaitoksina voimalaitosten rinnalla/sijasta. Kovilla pakkasilla ja isoimpien laitosten huolto- ja vikatilanteissa joudutaan kuitenkin käyttämään myös kaasu- ja öljylämpölaitoksia. Vuonna 2023 Tampereen Energialla käytettiin Kaukolämmön erillistuotantoon maakaasua 290GWh ja 53GWh polttoöljyä. (Energiateollisuus, 2024)

Koko Tampereen Energian kaukolämmön tuotannosta fossiiliset lämpökattilat tuottivat siis $(290\text{GWh} + 53\text{GWh}) / 2268\text{GWh} = 0,15123$ eli 15% kyseisenä vuonna.

3 LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI

3.1 Lämpöenergian varastoinnin teoriaa

Tässä kappaleessa käydään läpi lämpöenergian varastoinnin teoriaa ja tarkastellaan erilaisia lämpövarastotyypppejä.

Energian varastoinnilla pystytään erottamaan energian tuotanto- ja kulutushetki toisistaan. Energiaturris on aiheuttanut jo hetkiä ja lähitulevaisuudessa trendi vain kiihtyy, jossa energian tuotannon optimaalinen tilanne ei kulje käsikädessä optimaalisen kulutuksen kanssa. Esimerkkinä tuulisena päivänä Suomessa saattaa olla jo 7000MW tuulivoiman tuotantoa ja samaan aikaan 4300MW ydinvoimaa verkossa. Näinä hetkinä syntyy herkästi ylitarjonnan tila sähköverkkoon ja sähkön hinta painuu lähelle nollaa tai jopa negatiiviseksi. Näitä hetkiä varten on alkanut voimakas kehitys energian varastoinnin mahdollisuuksien lisäämiseksi. Sähköistyvän kaukolämpöjärjestelmän kannalta tämä tarkoittaa sitä, että esim. sähkökattilalla pyritään optimoimaan tuotantoa, hyödyntäen maksimaalisesti kaikkein halvimpia tunteja. Monesti tilanne on kuitenkin se, että johtuen muista lämmöntuotantoyksiköistä ki- verkossa, sähkökattilan lämmön tuotantoa ei enää mahduta ajamaan verkkoon. Kaukolämpöverkko saattaa olla jo siis päävoimalaitoksen ja muiden hitaasti säätyvien laitoksien tuotannosta niin täynnä energiaa, ettei enempää lämpöä verkkoon voida tuottaa ajamatta isoja biolaitoksia kokonaan alas. Näihin hetkiin lämpöenergian varastointi tarjoaa mahdollisuuksia ja ratkaisuja.

Lämpöenergian varastointimenetelmiä, TES (thermal energy storage), voidaan jakaa luokkiin mm. käytetyn tekniikan ja varaston energiasisällön kokoluokan mukaan. Energian varastoinnissa käytetyn lämpömekanismien mukaan TES voidaan luokitella kolmeen järjestelmätyyppiin: Tuntuva lämpövarastointi (SHS, Sensible Heat Storage), piilevä lämpövarastointi (LHS, Latent Heat Storage) ja termokemiallinen lämpövarastointi (THS, Thermochemical Heat Storage). (Hoff, 2022, s. 123-126)

Tässä opinnäytetyössä keskitytään tutkimaan tuntuvan lämmön varastoinnin (SHS) teknisiä ratkaisuja Tampereen Energian hyödynnettäväksi. Tuntuvan lämmön varastoissa energia säilötään muuttamalla energiavaraston materiaalin lämpötilaa. Varastointi materiaalina, johonka energia siis sidotaan, voivat toimia mm. vesi, ilma, öljy, kallio, tiili, tai hiekka. Energian määrä SHS-lämpövarastossa määräytyy varastointimateriaalin alku- ja loppulämpötilasta, materiaalin massasta ja sen ominaislämpökapasiteetista. Jokaisella varastointimateriaalilla on etunsa ja haittansa toisiinsa nähden. Veden korkea ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kg°C tekee vedestä monesti loogisen valinnan TES-energiavaraston väliaineeksi. Vedellä on tässä käytössä muitakin suotuisia ominaisuuksia kuten halpa hinta, turvallisuus ja hyvä saatavuus. Varastoidun lämmön määrä materiaalissa voidaan laskea kaavalla.

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V \Delta T \quad (1)$$

Jossa Q= lämpömäärä, m=massa, c_p = ominaislämpökapasiteetti, ΔT lämpötilan muutos, V= tilavuus ja ρ = materiaalin tiheys. (Dincer & Ezan, 2018, s. 110)

3.1.2 LCOE- mittari

Liiketaloudellisessa mielessä energian varastointiin liittyy oleellisesti toteutetun energiavaraston tarjoama yksikkökustannusarvo, joka on monesti muodossa €/kWh. Tämän määrittämiseksi ja erilaisten energian tuotanto- ja varastointitekniologioiden vertailun helpottamiseksi on kehitetty päätöksentekotyökaluja, jotka auttavat hankkeiden toteuttajia päättämään, mitkä järjestelmät ovat sopivimpia tai, mihin järjestelmiin tärkeimmät investoinnit tulisi tehdä. Tässä tehtävässä yksi käytetyimpiä tukivälineitä on Levelized Cost of Energy LCOE- mittari, jota käytetään hankkeiden elinkaarikustannusten laskennassa energiatalouden kentässä. (Korpisaari, 2024)

Levelized Cost of Energy LCOE, voidaan ilmaista myös muodossa Levelized Cost of heat LCOH, tai Levelized Cost of Storage LCOS. Jälkimmäinen ilmaisee energiavara-
rastosta ulos saatavan yksikkökustannusarvon. Kaikissa tapauksissa tarkastellaan
siis samaa yksikkökustannusarvoa €/kWh.

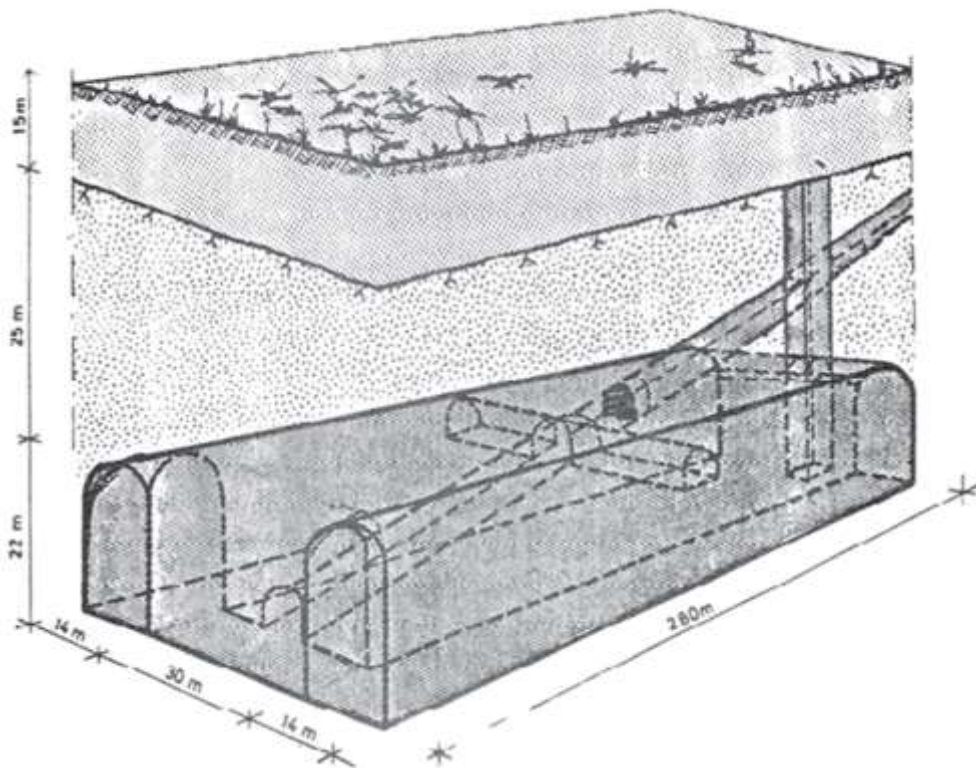
LCOH määritellään kaavalla

$$\text{LCOH} = \frac{\text{CAPEX} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{OPEX}_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_{h,t}}{(1+r)^t}}, \quad (2)$$

missä CAPEX tarkoittaa hankkeen investointikustannuksia sisältäen kaiken suunnittelusta, laitteiden hankintaan, rakentamiseen ja käyttöönottoon. CAPEX kustannukset ovat luonteeltaan kertaluontoisia. OPEX merkitsee käyttöönoton jälkeen syntyviä jatkuvia kustannuksia, pääosin käyttö- ja kunnossapito kuluja. $E_{h,t}$ on vuosittainen lämpöenergia, joka systeemistä otetaan ulos. r on diskonttokorko, t tarkoittaa yksittäistä vuotta ja n on koko systeemin elinaika. (Meriläinen & muut, 2024)

3.2 Kallioluolalämpövarasto

Kallioluolalämpövarastot, kalliosäiliövarastot tai luolalämpövarastot tarkoittavat kaikki samaa asiaa lähteistä riippuen. Kalliovarasto on maanalainen, tunnelimainen, poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen, eristämätön säiliö. Suomessa ja Ruotsissa käytössä olevat luolalämpövarastot ovat kaikki entisiä maan alle kallioon louhittuja öljyvarastoja. Näissä tapauksissa vanhat kallioluolaöljyvarastot on putsattu öljyistä ja täytetty vedellä. Vesi toimii varastointimateriaalina sen turvallisuuden, hyvän energian varaamiskykynsä ja edullisuuden vuoksi. CTES-järjestelmässä hyväksikäytetään veden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia, jotka liittyvät sen tiheyden muutoksiin eri lämpötiloissa muodostaen kerrostuneisuutta. Kylmä vesi on pohjalla ja lämmin vesi kevyempänä yläosassa. Lämmintä vettä johdetaan luolalämpövaraston yläosaan ja kylmää alaosaan.



Kuva 3. Oulun 190 000m³ Kallioluolalämpövarasto.

Kallioluolalämpövarastot (Rock Cavern Thermal Energy Storage, CTES) kuuluvat energian varastointimenetelmänä TES (thermal energy storage) luokkaan. Suomessa maanalaisia luolalämpövarastoja on tällä hetkellä käytössä Oulussa, Vaasassa ja Helsingissä. Uusia kallioluolalämpövarastoja Suomeen on suunnitteilla useita kappaleita. Tulossa on niin perinteisiä öljyvarastojen muuntamisia lämpövarastoiksi, kuin aivan uusia, neitseelliseen kallioon louhittavia projektejakin. Näistä esimerkkinä Vantaalle rakennettava maailman suurin lämpövarasto, kutsunanimeltään Varanto. Vantaan Energia on antanut tälle luolavarastolle suunnitteluarvoiksi massiivisen 1 000 000m³ tilavuuden ja 90 GWh kapasiteetin.



Kuva 4. VECTES- järjestelmän kuvaus (Vantaan Energia, 2023).

Kaukolämpöyhtiöiden lisääntyneeseen innostukseen kallioluolalämpövarastoja kohtaan, ovat syinä moninaiset hyödyt, joita hyvin suunniteltu ja rakennettu, oikein toimiva luolalämpövarasto mahdollistaa. Yhtiön koosta, tuotanto rakenteesta, maantieteellisestä sijainnista jne. riippuu kuinka monia ja missä mittakaavassa näitä hyötyjä päästään maksimoimaan.

Perinteisessä vastapainetuotannossa sähkön tuotantoa voidaan lisätä lämpövarastoa lataamalla. Kaukolämmön energiantuotantokustannuksia voidaan alentaa, kun ladataan varastoa lämmön tuotannon halvan rajakustannuksen aikana ja puretaan kalliin rajakustannuksen aikana. Lämpövarastoon ladatulla, yleensä halvalla ja päästöttömällä energialla voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä, joka tuo taloudellista hyötyä monin tavoin esim. polttoaineen hinnan, savukaasujen päästöoikeuksien, öljyn varastointitarpeen ja huippulaitoksien ajotuntien pienemisen myötä. (Energiateollisuus, 2006)

Tulevaisuuden fossiilittomassa energiajärjestelmässä sääriippuvaisen energiantuotannon osuus kasvaa, mikä edellyttää joustoa kulutuksen ja tuotannon välille.

Tätä joustoa varten suurikokoinen kallioluola -TES on avain asemassa kaukolämpöjärjestelmässä. Kaukolämpö ja valtakunnan sähköjärjestelmä elää tiiviissä synkronissa toisiinsa. Kaukolämpöyhtiöt tuottavat sähköä sähköverkkoon ja kuluttavat sähköä verkosta merkittäviä määriä. Kaukolämpöjärjestelmän joustavuuteen ja ketteryteen vaikuttaa suuresti sen lämpökuorman hallinta. Tähän lämpökuorman hallintaan auttaa suuresti kunnan lämpövarastokapasiteetin omaaminen. Esimerkiksi sähkökattiloiden ajossa kulutusjouston mahdollisuudet kasvavat, kun järjestelmään on lisätty suurikokoinen lämpövarasto. Ylös-säätö tunneilla on sähkökatila mahdollista ajaa esim. 100 MW tehosta nolliin, mikäli kaukolämpöjärjestelmässä on kapasiteettia, jolla korvata sähkökattilan alas ajettu lämpöteho. Toisinpäin alas-säätöä tehtäessä sähköverkkoon, voidaan sähkökatila ajaa päälle tuotamaan kuormaa sähköverkkoon, tällöin pitää lisääntyneelle lämpökuormalle olla tilaa. Yksi vaihtoehto on ajaa lämpö esim. järveen tai mereen, mutta ympäristönormit tulee tässä vastaan jo kohtuullisen alhaisilla tehoilla. Järkevämpää on ajaa tämä lämpö talteen kallioluolalämpövarastoon. Tällä tavoin saa liiketoiminnallisen hyödyn sekä sähkömarkkinalta, että lämpömarkkinalta ajattaessa lämpö sopivalla hetkellä kaukolämpöverkkoon. Fingridin tarjoamille sähkön reservimarkkinoille osallistuminen on myös nykyään tärkeää liiketoimintaa energiayhtiöille. Erilaisten taajuudentuenta, taajuuden palautus ja käyttö- ja häiriöreservi tuotteiden toteuttamisen kannalta TES- järjestelmä luo paljon ketteryttä ja varmuutta. (Fingrid, 2024)

Vuonna 2023 valmistuneessa ruotsalaisessa vertaisarvioidussa tutkimuksessa tutkittiin, paljonko kulutusjousto saataisiin sähköjärjestelmään, mikäli kaikki ruotsin n. 85 olemassa olevaa vanhaa luolaöljyvarastoa muunnettaisiin TES käyttöön. Tulokset näyttivät, että Ruotsin kaukolämpöjärjestelmät voisivat vähentää sähköverkon kulutushuippuja, niin alas, kuin ylöspäin suunnilleen 9 %. Kallioluolalämpövarastoilla, osana muita TES- ratkaisuja, on siis suuri rooli niin yksittäisten yhtiöiden, kuin valtakunnan voimajärjestelmänkin kannalta. (Swante & Åberg, 2023)

10.10.2024 järjestettiin Vantaalla Geologian tutkimuskeskuksen GTK:n isännöimä Geoenergia päivä. Kallioluolalämpövarastojen tulevaisuudesta oli kertomassa asiantuntijoita Vantaan Energialta, VTT:ltä, GTK:lta ja Hyvinkään lämpövoimalta. Alustuksen päivän aiheeseen antoi VTT:n Tomi Lindroos. Kaukolämmön tuotannossa on koettu useampia selkeitä energiamurroksia 1970- luvulta tähän päivään. Öljyn käyttöä alettiin korvaamaan kivihieillä 1970- luvun öljykriisin jälkeen, jonka jälkeen 1990- luvun alusta alkaen kivihieiltä alettiin korvaamaan maakaasulla. Tänä päivänä elämme murrosta, jossa kaikkia fossiilisia polttoaineita, sekä biomassan käyttöä korvataan sähköllä ja hukkalämmöillä kaukolämmön tuotannossa. Sähkön hintavaihtelut tulevat ohjaamaan päivittäistä operaatiota yhä voimakkaammin. Sähkö- ja kaukolämmönsektori integraatio tulee entisestään voimistumaan ja lämpövarastot ovat tässä keskeisessä roolissa. Lindroos kertoi myös mielenkiintoisena yksityiskohtana, että negatiivisten sähkötuntien määrä rikkoi jo elokuussa viimevuoden 2023 rajan n. 500 h ja vuonna 2024 tullaan olemaan lähellä 1000 negatiivisen tunnin rajaa. (Lindroos, 2024)

Erikoisasiantuntija Markku Hagström GTK:lta kertoi EU:n innovaatorahaston rahoittamasta INTERSTORES PROJECT- hankkeesta. Suomennettuna projektin nimi on Kansainvälinen innovaatioverkosto kustannustehokkaan ja ympäristövaikutuksiltaan minimoidun lämmön kausivaraston kehittämiseksi. INTERSTORES on 14 kumppanin yhtymä, jota johtaa Martin Luther Yliopisto Halle-Wittenberg. Tavoitteena projektilla on merkittävästi kasvattaa lämmön kausivarastojen käyttökelpoisuutta ja kannattavuutta. Projektin aikajänne on neljä vuotta (1.1.2024-31.12.2027) Projektin keskiössä ovat kaksi demotapausta, toinen Saksassa ja toinen on Vantaan Energian Varanto- hanke. GTK:n tehtävänä on tarjota asiantuntija apua kallioperän tutkimuksessa. GTK poraa kalliosta näytteitä ja analysoi niitä. Lisäksi he valmistavat erilaisia tietokonemallinnuksia esim. pohjaveden virtauksista ja lämmön siirtymisestä kallioperään. Lisäksi tarkoituksena on luoda ohjenuoria tulevaisuuden kallioluolalämpöprojekteille kallioperän käytön ja suunnittelun, lupien ym. suhteen. Lähitulevaisuudessa GTK:lla on tarkoitus muiden mittauksen

ohella porata parisen kymmentä reikää pysyvien mittauskaapelien asentamista varten Vantaan Varantoa (CTES) ympäröivään kallioperään. (Hagström, 2024)

Yhteenvedona voidaan sanoa, että kallioluolalämpövarastot ovat hyvinkin pinnalla oleva asia niin Suomen kuin EU:n energiasektorilla. Kallion sisään varastoitavalle lämmölle nähdään olevan tarvetta ja kannattavuutta nykyajan volatiilissa sähkömarkkinassa. Mielenkiinnolla jääme seuraamaan projektien edistymistä. Potentiaalia esim. Vantaan hankkeella on olla käänteentekevä palanen kaukolämmön hiilineutraalisuustavoitteiden ja kaukolämmön hintakilpailukyvyn pelastajana, jota monet muut kaupungit tulevat kopioimaan.

3.3 Terässäiliö kaukolämpöakku

Perinteisesti kun Suomessa puhutaan kaukolämpöakusta, tarkoitetaan sillä pysyvässä seisovaa lieriönmuotoista, eristettyä terässäiliötä. Näitä KL-akkuja, eli lämpövarastoja, on ollut käytössä Suomessa jo 1980-luvulta asti. (Koskelainen & muut, 2006, S.386)

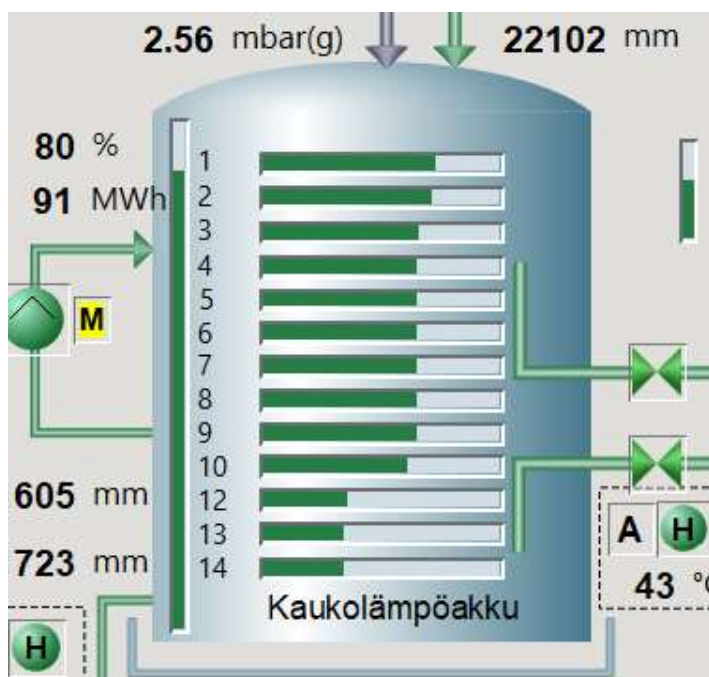
Pääsääntöisesti terässäiliö kaukolämpöakut ovat lyhytaikaisvarastointiin, 1 päivä – viikko, tarkoitettuja maanpäällisiä suoran kytkennän kaukolämpöakkuja. Suoralla kytkennällä näitä akkuja voidaan käyttää kaukolämpöverkon vesireservinä. (Karhu, 2010, S.23)

Teräslieriö akkujen varauskapasiteetti, sekä purkaus- ja latausteho vaihtelevat kaupungeittain. Suurten kaupunkien terässäiliöakkujen varauskapasiteetti vaihtelee 80MWh: sta 1200MWh: iin ja purkausteho vaihtelee välillä 15MW ja 120MW. Suomen kaukolämpöjärjestelmiin liitettyjen terässäiliö kaukolämpöakkujen keskimääräinen kapasiteetti per volyymi saadaan tutkimalla vuoden 2023 kaukolämpötilastoja. Laskemalla yhteen kaikkien käytössä olevien terässäiliöakkujen kapasiteetit yhteen ja jakamalla se kaikkien yhteenlasketulla tilavuudella, saadaan seu-

raavalla laskutoimituksella tulokseksi keskimääräinen MWh/m³ suhde. Tätä suhdetta voidaan käyttää suuntaa antavana ohjeena miettiessä uusien akkujen mitoistusta ja sijoittelua tonteille. (Energiateollisuus, 2023)

$$\frac{9955MWh}{211320m^3} = 0,047MWh/m^3$$

Terässäiliöakkujen rakenne on otettava huomioon akun mitoistusta tehtäessä. Veden tiheys erot säiliössä, johtuen kuuman ja kylmän veden fysikaalisista ominaisuuksista, aikaan saavat veden kerrostumista kaukolämpökassa siten, että kuummin vesi on säiliössä korkeimpana ja viilein alimpana. Veden kerrostuneisuus on tärkeä asia, koska kuuman ja kylmän veden sekoittuminen ja rajakerros halutaan mahdollisimman pieneksi. Rajakerros ei ole hyödynnettävissä purku- ja lataussykleissä. Akun lataussyklissä on tarkoituksena pumpata kylmää vettä säiliön pohjalta kaukolämmön paluulinjaan ja menolinjasta kuumaa vettä säiliön yläosaan. Vastavasti akkua purettaessa, pumpataan säiliön yläosassa olevaa kuumaa vettä kaukolämmön menolinjaan ja tilalle otetaan paluulinjan kylmää vettä. (Koskelainen & muut, 2006, S. 393)



Kuva 5. Tammervoiman KL- akku. Lt- mittaus 1-14. Ylin 94C ja alin 44C. (Tampereen Energia, 2024)

3.4 Kaivantovarasto

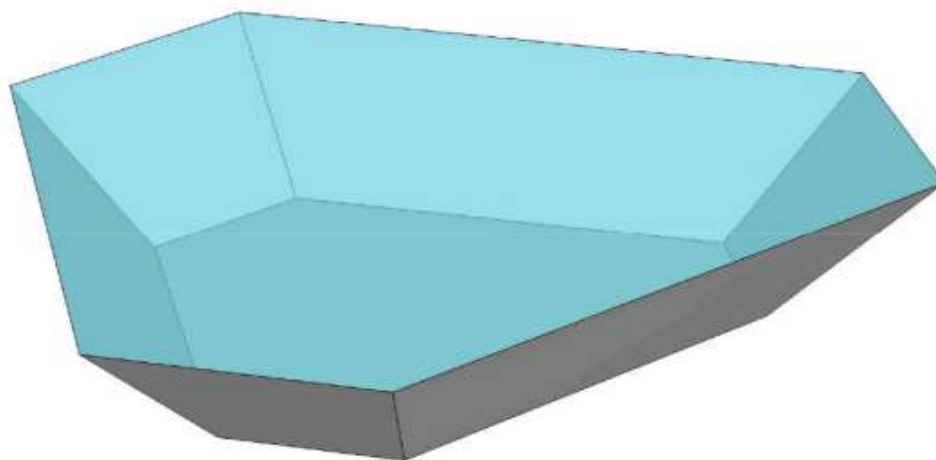
Yksi lämpöenergian pitkäaikaiseen varastointiin kehitetty vaihtoehto on maahan kaivettu ja eristävällä kannella varustettu kaivantovarasto, PTES (PIT Thermal Energy Storage). Kaivantovarasto on yleensä katkaistun kartion muotoinen ja varaston pohja ja sivukartio eristetään maata vasten, sekä tiivistetään veden pitäväksi kalvottamalla se esim. kuparifoliolla. Kaivannon katto eristetään kannella, jonka päälle tulee kelluva eristekerros. Kaivantovarastot ovat monesti rakennettu vanhoihin käytöstä poistettuihin sorakuoppiin. Varasto on yleensä paineeton, jolloin veden lämpötila on enimmillään 90°C. Kytkeä kaukolämpöverkkoon voi olla joko mallia suora, tai toteutettu lämmönvaihtimen välityksellä. (Koskelainen & muut, 2006, S. 389)

Maailman suurin käytössä oleva PTES- lämpövarasto löytyy Vojensista Tanskasta. Vojensin kaivantovarasto valmistui vanhaan sorakuoppaan vuonna 2015 ja on ti-

lavuudeltaan 200 000m³. Vertailun vuoksi voidaan muistella, että Oulun kallioluolalämpövarasto on tilavuudeltaan 190 000m³ ja Vaasan Vaskiluodon kalliovarasto 210 000m³. Lämmönvarastointi kapasiteetiksi Vojensissa on ilmoitettu 12GWh ja purkutehoksi 38,5MW. (Bärbel,2019)

Vojensin kaivantovarastoa varten kuopan rakenteeseen kiinnitettiin erityistä huomiota tarvittavan tilavuuden saavuttamiseksi. Ratkaisuksi kehiteltiin monikulmainen, käännetyn pyramidin muotoinen kaivanto. (Xiang & muut, 2022)

Varastoa Vojensissa lämmittää pääasiallisesti aurinkopaneelikenttä, joka tuottaa yli 50% varaston vuotuisesta lämmöstä. Lisäksi systeemiin on kytketty 3 kaasumoottoria, 1 kpl 10MW sähkökattila, lämpöpumppu, sekä kaasukattiloita. Kuopan vesi on erotettu kaukolämpövedestä, eli lämmönsiirto tapahtuu lämmönvaihtimen kautta.



Kuva 6. Vojensin PTES- lämpövaraston geometria. (Xiang & muut, 2022).

Hyvinkäällä on alkamassa Suomen ensimmäisen PTES- kaivantolämpövaraston rakentaminen vuonna 2025. Lämpövarasto rakennetaan Kulomäen vanhan sora-kuopan alueelle. Kaivannosta on suunniteltu tilavuudeltaan 380 000m³ kokoista,

jolloin sen lämmön varauskapasiteetti tulee olemaan noin 18 GWh täyteen ladattuna. Hyvinkään lämpö on laskenut, että varaston todellinen hyötykäyttö olisi luokkaa 70GWh vuodessa. Suunniteltu lataus- ja purkuteho on 60MW. Kaivannon pohja pinnoitetaan tiiviiksi ja kuoppa täytetään vesijohtovedellä. Lämpövarastoa ladataan kesän ja alkusyksyn aikana ja puretaan talven aikana kaukolämpöverkoon korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Varastoa on myös tarkoitus hyödyntää tuntitasolla latauksen ja purun suhteen, vallitsevien sähkömarkkinahintojen ja kaukolämpökulutuksen mukaan. Hankkeen avulla saadaan vähennettyä fossiilisten polttoaineiden käyttöä Hyvinkäällä käytännössä nolnaan, kun myös uusi sähkökattila valmistuu. Hukkalämpöjen saanti paremmin hyötykäyttöön, polttamisen päästöjen väheneminen ja lämmönhankinnan kustannuksien pieneneminen lukeutuvat myös hankkeesta saatavien hyötyjen joukkoon.

Hankkeen kustannusarvio on n. 25 miljoonaa euroa, josta voidaan vähentää pois 7,7 miljoonaa euroa Työ- ja elinkeinoministeriön investointitukea, joka Hyvinkään Lämpövoima Oy:lle myönnettiin hankkeeseen. (Klingelin, 2024)

Etelä-Suomen aluehallintovirasto myönsi Kulomäen PTES- projektille vesilain mukaisen luvan tammikuun puolivälissä 2025. Vesiluvassa määritellään alueelle ja kaivannolle monia ehtoja liittyen esimerkiksi veden enimmäismäärään ja maksimi lämpötilaan varastossa ja pohjaveden suojelemiseen varaston alueella.

Tässä opinnäytetyössä PTES- lämpövaraston tutkiminen Tampereelle toteutettavaksi rajattiin työn ulkopuolelle. Tulevaisuuden opinnäyte- tai diplomitöissä tätäkin lämpövarastovaihtoehtoa saattaa olla kuitenkin järkevää tutkia Tampereellekin.

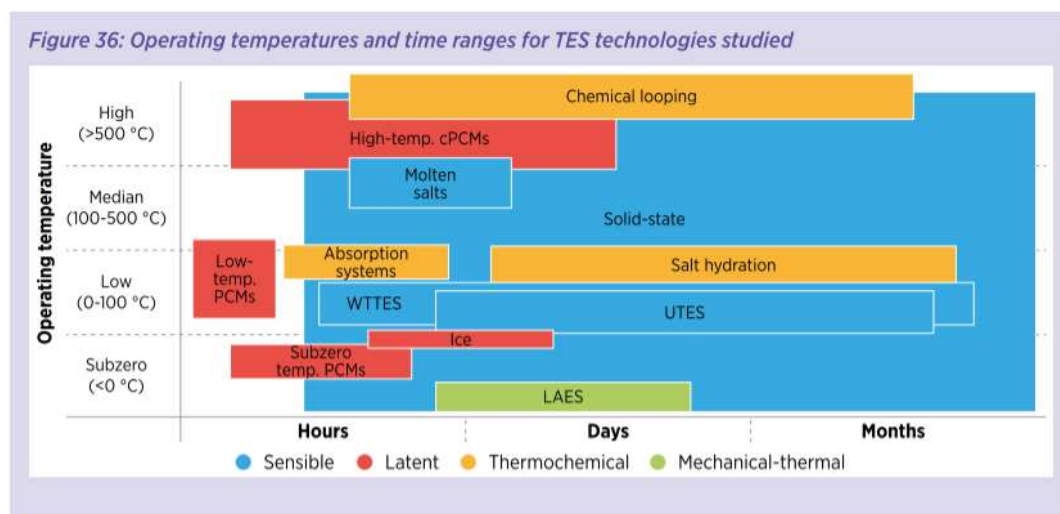
3.5 Hiekka-akku

Tuntuvan lämmön varastoinnissa SHS (Sensible Heat Storage) toinen tekniikka nestemäisen väliaineen lisäksi on käyttää kiinteää ainetta, kuten esim. tiili, kivi tai hiekka lämmön varastointiin. Tästä käytetään myös lyhennettä SSTES (Solid State

Thermal Energy Storage, joka suomeksi tarkoittaa kiinteän aineen lämpövarastoa. (Renewable Energy Agency, 2020, S.53)

Kiinteän aineen lämpövarastoissa varastointi materiaalia lämmitetään esimerkiksi sähköllä, kun sähkön hinta on alhaalla ja puretaan varastosta tarpeen mukaan. Varastointi lämpötilat voidaan saada nostettua jopa 1000°C tasolle, joka on esim. vesivarastoinnissa käytettävän max. 140°C: een nähden huomattavasti korkeampi. Kiinteän aineen varstojen energiatiheys jää huomattavasti alle verrattuna nestemäisiin vaihtoehtoihin, mutta tätä kompensoidaan juuri laajan käyttölämpötila-alueen avulla.

Kiinteän aineen varstojen avulla on myös mahdollista lämmittää kiveä, joko suoraan sähkövastuksilla tai lämpöpumpun avulla. Varastoitu korkealämpötilainen energia voidaan käyttää myöhemmin sähköntuotantoon höyryturbiinilla. (Renewable Energy Agency, 2020, S.75)



Kuva 7. Kiinteän aineen TES- järjestelmän operointi alue. (Renewable Energy Agency, 2020, s.68).

Yhtenä nousevana teknologiana kiinteän aineen (SSTES) piirissä voidaan pitää teknologiaa, jossa lämpö varastoidaan hiekkaan. Suomessa on kaksi yritystä tämän tekniikan kehittämisessä Polar Night Energy ja The Storage. Molempien yritysten

tekniikoissa energiaa varastoidaan sähkön avulla hiekkaan. Kytkennoissä on kuitenkin eroja, kuten lämmönvaihtimien ja itse hiekkavarastojen osalta. Tässä opinäytetyössä on tutkittu tarkemmin Polar Night Energyn vaihtoehdon soveltuvuutta lämmön varastointiin Tampereen Energian kaukolämpöverkossa.

4 KYSELYTUTKIMUS KAUKOLÄMPÖYHTIÖISTÄ

Opinnäytetyön yhtenä tutkimuskysymyksenä oli työnantajan puolelta osoitettu kiinnostus olemassa olevien lämpövarastojen kannattavuudesta muissa suomalaisissa kaukolämpöyhtiöissä.

Lämpömarkkinoiden tiukentunut kilpailu etenkin maalämpöpumppujen nousun myötä on lisännyt kaukolämpöyhtiöiden tarvetta pysyä ajan hermolla ja uudistua monessa suhteessa itsekkin. Kaukolämmön kysynnän on ennustettu saavuttavan lakipisteensä aivan lähivuosina. Kysyntää pienentäviä tekijöitä ovat rakennusten energiatehokkuuden merkittävä paraneminen, ilmastonmuutos ja juuri kilpailu muiden lämmitysvaihtoehtojen kanssa. Kaupungeilla on kuitenkin huomattavia eroja mallinuksissa. Suurimmalla kulmakertoimella kaukolämmön kysyntä tulee laskemaan muuttotappio kunnissa, kun taas kaupungit, joihin rakennetaan paljon lisää kompensoivat uudisrakentamisella kysyntäkatoa. (Liedes, 2024)

Suomen kaupunkien kaukolämpöjärjestelmät ovat osa isompaa kokonaisuutta, mutta silti kaikki omia uniikkeja tapauksiaan. Tietyt samat lainalaisuudet koskevat kaikkia, mutta myös eroja löytyy paljon esim. tuotantolaitosten, geografian, kokoluokan ja muun infrastruktuurin, sekä sektori-integraation suhteen. Tämän kyselyn tarkoituksena oli selvittää Suomalaisten kaukolämpöyhtiöiden tilaa ja mielipiteitä lämpöenergian varastoinnista. Kyselyssä selvitettiin tietoa toteutuneiden lämpövarasto projektien onnistumisista. Lisäksi kartoitetaan näkemyksiä yleisesti alalta, kuinka oleellisena lämmön pitkäaikainen varastointi nähdään modernissa KL- systeemissä. Kyselytutkimuksessa haluttiin selvittää mitä erilaisia lämpövarasto tekniikoita on jo käytössä ja miten ne ovat toimineet. Onko esimerkiksi vanhaan kallioluolavarastoon tehdyt lämpövarastot osoittautuneet kannattaviksi investoinneiksi. Tulevaisuuden tekniikat kiinnostivat myös, nouseeko esimerkiksi joku tietty tekniikka selvästi yli muiden kiinnostuksessa eri yhtiöillä. Tutkimuksen tuloksilla saattaa olla vaikutusta tulevien investointien kannalta eri kaukolämpöyhtiöissä.

4.1 Tutkimusasetelma ja tutkimuskysymys

Tutkimusmenetelmänä oli kvantitatiivinen kyselytutkimus, jossa oli myös kvalitatiivisia osia. Kyselytutkimus on hyvä tapa kerätä ja tarkastella tietoa muun muassa erilaisista yhteiskunnan ilmiöistä, ihmisten ja yritysten toiminnasta, mielipiteistä, asenteista ja arvoista. Kyselytutkimuksessa tutkija esittää vastaajalle kysymyksiä kyselylomakkeen välityksellä. Kyselylomake on mittausväline, jonka sovellusalue ulottuu yhteiskunta- ja käyttäytymistieteellisestä tutkimuksesta mielipidetiedusteluihin, katukyselyihin, soveltuvuustesteihin ja palautemittauksiin. (Vehkalahti, 2014, s. 11)

Tämä tutkimus koostuu Microsoft Forms pohjaan tehdystä kyselystä, joka lähetettiin sähköpostilla linkin kautta vastaajille. Selvityksen kohderyhmänä olivat suomalaiset kaukolämpöyhtiöt ja heidän lämmitysliiketoiminnassansa riittävän korkeassa asemassa toimivat henkilöt kuten esim. energiajohtajat, tuotantopäälliköt ja toimitusjohtajat.

Kyselytutkimuksen tarkoituksena ja kysymyksenä oli selvittää millaisia lämpöenergiavarastoja yhtiöillä on jo käytössään, sekä miten ne ovat toimineet odotuksiin nähden. Lisäksi haluttiin tutkia, millaisia uusia projekteja lämmönvarastointiin eri yhtiöillä on tulossa, sekä asenteita kuinka tärkeänä yritykset näkevät pitempiaikaisen lämmönvarastoinnin tulevaisuuden kaukolämpöverkoissa.

4.2 Aineiston keruu

Aineiston keruu tapahtui tutkimusta varten luodulla Microsoft Forms- kyselylomakkeella. Kyselyyn vastanneille yhtiöiden edustajille soitettiin ensin puhelimella, jonka jälkeen henkilöille lähetettiin linkki verkkopohjaiseen kyselyyn sähköpostilla. Microsoft Forms on online- kyselyiden luonti työkalu ja osa Office 365 pakettia. Aineistoa saatiin kerättyä kymmenestä suomalaisesta kaukolämpöyhtiöstä. Vastausten määrä yllätti positiivisesti ja lisäsi tutkimuksen validiteettia, eli

luotettavuutta siitä, miten tarkka ja yleistettävä kuva tutkimustuloksista voidaan vetää.

4.3 Aineiston analysointi

Aineiston analysointi tehtiin pääosin Microsoft Formsin omien analyysityökalujen avulla. Forms kyselyssä on mahdollista käyttää 7 erilaista kysymystyyppiä, jotka ovat Valinta, Teksti, Luokitus, Päivämäärä, Luokitus, Likert ja Tiedosto la-taa. Luokitus ja Likert-asteikolla asetetuilla kysymyksillä haettiin vastausten keskiarvojen ja keskihajonnan kautta lähinnä kvantitatiivista tietoa yhtiöiden lämpövarastoista. Joidenkin kysymysten asettelulla on kuitenkin saatu myös laadullista tietoa likert-asteikkoa käyttämällä. Kvantitatiivista analyysia ja raportointia tehtiin myös Excelin avulla joidenkin kysymystyyppien kanssa.

Avointen vastausten analysoinnissa pyrittiin saamaan laadullista tietoa tutkittavasta ilmiöstä ja saattamaan tämä data esitettävään muotoon. Avoimista vastauksista yritettiin koodata jonkinlaisia numeerisia yhteenvetoja. Lisäksi muutamia suoria lainauksia esitetään tutkimuksen raportissa.

4.4 Tutkimukseen liittyvät haasteet

Tutkimuksen suurimpia haasteita oli vastaajien saaminen mahdollisimman monesta kohderyhmästä, eli tässä tapauksessa kaukolämpöyhtiöstä. Haasteena oli myös tehdä verkkokyselystä sopivan mittainen ja oleellisia kysymyksiä sisältävä. Olennaisen tärkeäksi seisaksi kyselyyn vastauksien saamisessa osoittautui ennakopuhelun soittaminen, jossa kerrottiin, kuka tekijä on ja millä asialla. Kysymysten asettelu ja oikeiden mittareiden valinta osoittautui haasteelliseksi tehtäväksi, jossa olisi voinut onnistua vielä paremmin.

Kyselyn vastausten analysointiin liittyi omat haasteensa, koska Microsoft Forms ei ollut tekijälle ennalta tuttu. Kuinka saada mahdollisimman selvään esitysmuotoon

kyselystä saatu tieto on omanlaisensa taiteen laji. Avointen kysymysten analysointi ja yhteenveto tuotti mietintää lähinnä, kuinka tuoda ne raporttiin ja mikä on hyväksyttävä tyyli niiden suhteen. Lupaus vastaajille siitä, että tulokset julkaistaan sillä tavoin anonyymina, ettei yksittäisen yhtiön antamista tiedoista paljastu heidän tietojaan vaati tarkkuutta ja hieman luovuutta.

4.5 Kyselyn rakenne

Kysely tehtiin siis Microsoftin Forms tuotteella verkkokyselynä. Kysely koostui kymmenestä kysymyksestä. Kysymys patteristo voidaan ajatella jaettavan 3 osaan. Ensimmäisissä kolmessa kysymyksessä tiedustellaan vastaajien taustatietoja. Mitä yhtiötä vastaaja edustaa, mikä on nimi ja titteli yhtiössä. Taustatietona kysytään myös vastaajan kaukolämpöverkon huipputehomitoitusta, jolla saadaan selville kyseisen vastaajan kaukolämpöjärjestelmän kokoluokka.

Toisessa osassa kysellään olemassa olevia lämpöenergian varastoja eri yhtiöissä valmiin valinta kysymystyyppin avulla. Valinta mahdollisuuksia on annettu 6 erilaista lämpövarastotyyppiä, sekä tyyppi x ja ei varastoa vaihtoehto. Tämän jälkeen näistä varastoista, jotka ovat siis jo käytössä kysellään lisää kokemuksia kysymyksissä 5 ja 6. Kysymyksessä 5 haetaan tietoa Likert-asteikolla kuuteen eri väittämään siitä, kuinka hyvin lämpövarasto on vastannut odotuksiin. 6. kysymys on avoin tekstikenttä, joka antaa vielä lisätukea kysymykselle 5.

Kyselytutkimuksen ns. kolmas vaihe keskittyy lähitulevaisuuden visioiden tarkasteluun kysymyksillä 7-10. Kysymyksessä 7 käytetään samaa valintataulukkoa kuin kysymyksessä 4. Tällä kertaa kysymyksenä on suunnitelmat uusien lämpövarastojen suhteen. Haluna oli selvittää miten paljon ja minkälaisia lämpövarastoja eri kaukolämpöyhtiöihin on suunnitteilla. Kysymyksissä 4 ja 7 käytetty Valinta- kysymystyyppi toimi hyvin. Kysymyksestä tuli selkeä ja ymmärrettävä ja tuloksien esittäminen Forms:lla on näissä selkeä ja havainnollistavaa. Kohdissa 8 ja 9 tiedustellaan enemmän mielipiteitä likert- ja valinta kysymystyyppiä hyväksikäyttäen. Tutkija oli kiinnostunut kuinka isoa kapasiteettia (GWh) nähtiin optimaalisena kokona

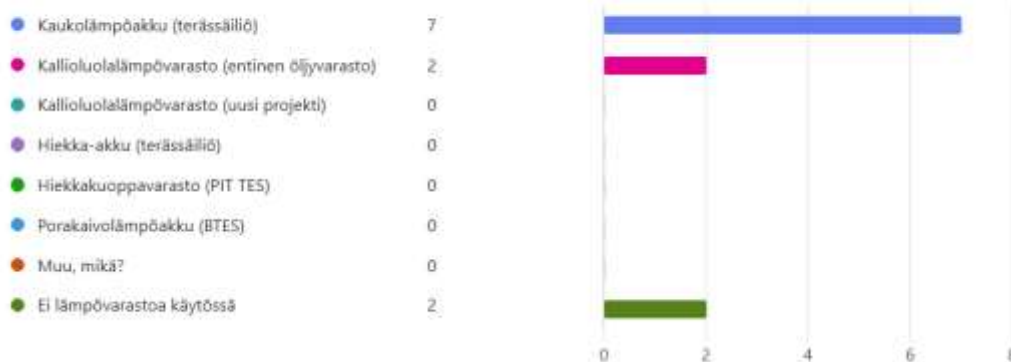
kunkin vastaajan lämpöjärjestelmään. Kiinnostavaa oli myös kuulla, kuinka tärkeänä pitempiaikaista lämmön varastointia pidettiin modernissa kaukolämpöjärjestelmässä. Loppuun annettiin tyhjä tekstikenttä vapaalle sanalle lämpöenergian varastointiin liittyen kysymyksessä 10.

4.6 Kysymykset ja vastaukset

Kysymykset 1-3 liittyivät taustatietoihin jotka luvattiin pitää salassa julkisuudelta, jotenka varsinainen raportointi vastauksista alkaa kysymyksestä 4.

Kysymys 4.

4. Minkälaisia lämpöenergiavarastoja yrityksellänne on käytössä?



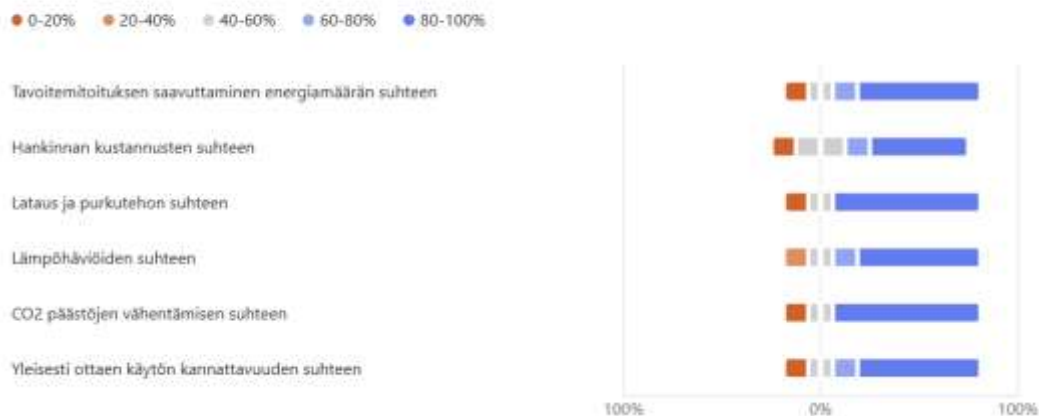
Vastauksista nähdään, että perinteisiä lieriön muotoisia teräsakkuja, joissa kaukolämpövesi kulkee sisällä, on jo suurimmalla osalla yhtiöistä käytössä. Näillä akkutyypeillä energian kapasiteetti on yleensä 100-800 MWh luokkaa, lataus- ja purkaustehojen ollessa 15-70 MW luokassa. Tämän energiamäärän ja teholuokkien suhteen voidaan todeta, että terässäiliö akkuja voidaan käyttää lähinnä päivätason lämmönvarastoinnissa ja tuotannon optimoinnissa. Esimerkkinä 500MWh akku purkautuu tyhjäksi 10 tunnissa täydellä oletetulla purkuteholla, $50\text{MW} \cdot 10\text{h} = 500\text{MWh}$.

Vanhoja käytöstä poistettuja kallioöljyvarastoja ja lämpövarastoiksi muunnettuja kallioluolalämpövarastoja oli käytössä kahdella kyselyyn osallistujalla.

Kahdella pienemmällä toimijalla ei ollut vielä yhtään kaukolämpövarastoa käytössä.

Kysymys 5.

5. Kuinka hyvin lämpövarasto on vastannut odotuksia? Vastaa suurimman varaston mukaan, mikäli käytössä useampia.



Tässä kysymyksessä selvitettiin erilaisilla väittämillä sitä kuinka hyvin käytössä olevat lämpövarastot ovat vastanneet odotuksiinsa. Kysymystyyppinä käytettiin likert-asteikkoa, jossa väittävät olivat viisiportaisella asteikolla. Väittämät muutettiin perinteisistä täysin eri mieltä - täysin samaa mieltä luokista prosenttias-teikoksi. 0-20% oli siis huonoin luokka ja 80-100% korkein. Tämä haluttiin tehdä analyysin teon tarkentamiseksi.

71,4% vastaajista oli vastannut kolmeen kohtaan lämpövarastonsa toimineen ylimmän 80-100% luokan mukaisesti. Kolmeen muuhun kohtaan ylimmän luokan valitsi 57,1% vastaajista. Alimman luokan valinta missään kysymyksessä ei ylittänyt sen enempää kuin 14,3%

Yhteenvedona voidaan nähdä, että olemassa olevat lämpövarastot on koettu hyviksi hankinnoiksi ja ne ovat vastanneet odotuksiinsa. Tuloksien koherenttisuutta haittasi tässä kysymyksessä vastaajien erilaisista varastoista vastaaminen. Joku saattoi vastata kallioluolalämpövaraston mukaan, kun taas suurin osa vastasi teräsakun kokemuksen pohjalta.

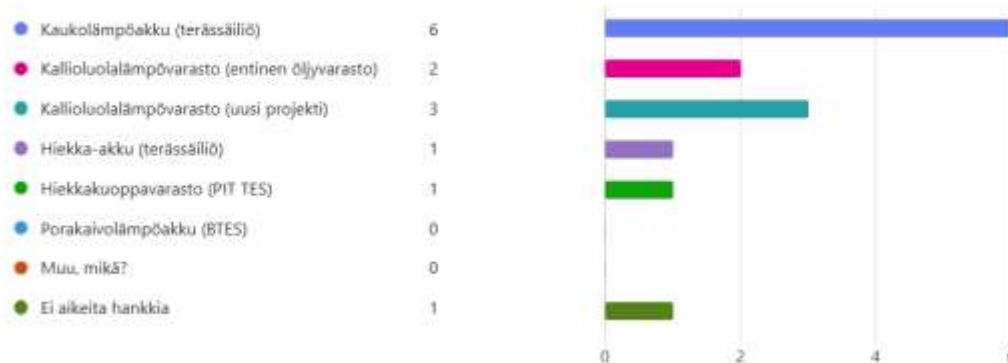
Kysymys 6.

Kuudes kysymys kuului; *Millainen haarukka lataus- ja purkutehoille lämpövarastosta teidän järjestelmässänne on?*

Tähän vastaukset vaihtelivat välillä 20MW-110MW. Keskiarvollinen lataus- ja purkuteho oli 57MW.

Kysymys 7.

7. Oletteko aikeissa hankkia lämpöenergiavarastoja/lisää varastoja, jos niin minkä tyyppisiä?



Koko kyselytutkimuksen ehkäpä mielenkiintoisin osa oli saada tietää, millaisia uusia lämpövarastoprojekteja suomalaisilla yhtiöillä on suunnitteilla. Pylväistä voidaan nähdä, että perinteisten terässäiliöakkujen suosio kasvaa jatkossakin. 66,7% yhtiöistä on aikeissa rakentaa uuden kaukolämpöakun (terässäiliö).

Perinteisen vesiakun lisäksi yksi yritys on suunnittelemassa hiekka-akun lisäämistä palettiinsa. Hiekka-akussa ei säiliön sisällä ole vettä, vaan lämpöä varaavana massana toimii hiekka. Säiliössä oleva hiekka lämmitetään suljetulla, sähkölämmitteisellä ilmakierrolla ja lämpö otetaan ulos lämmönvaihtimen kautta esimerkiksi juuri kaukolämpöverkkoon. (Polar Night Energy, 2024)

Kallioluolalämpövarastoja on kyselyyn osallistuneista 9 yhtiöstä tulossa jopa 5:een. Näistä 3 on täysin uusia kallioluolia ja 2 tehdään olemassa olevan kallio-

luolaöljyvaraston vanhaan infrastruktuuriin. Tämä indikoi sitä, että monessa yhtiössä nähdään tarvetta vähintään viikkotason lämmön varastoinnille.

Suomessa täysin uudenlaista tekniikkaa edustava hiekkakuoppavarastokin (PIT TES) on tulossa yhteen kaukolämpöyhtiöön. Tässä vaihtoehdossa lämpö varastoidaan sorakuopalla suureen pinnoitettuun altaaseen, jossa on puhdasta vesijohtovettä. Lämpövarasto varustetaan kelluvalla kansirakenteella, jotta lämpö ei haihdu vesialtaasta ilmaan.

Kysymys 8.

8. Kuinka suuri lämpövarastoinnin kapasiteetin pitäisi omassa järjestelmässänne mielestänne olla?



Tähän kysymykseen hajontaa tuli eniten, 1GWh:sta aina +100GWh asti. Kaksi vastaajaa valitsi 1GWh ja myös kaksi toisen ääripään +100GWh. Loput vastaukset sijoittuivat luokkiin 10GWh ja 50GWh.

Järjestelmät ovat tietenkin kaikilla oman kokoisensa ja täten tarpeet lämpövaraston kapasiteetin suhteen vaihtelevat. Tuotantorakenne, hukkalämpöjen saataavuus ja muut seikat vaikuttavat yhtä lailla siihen kuinka suuri lämpövarastoinnin tarpeen taso kenellekin olisi järkevää. Työssä haluttiin kuitenkin tutkia, miten saatuja vastauksia voisi yhtenäistää ja käyttää löysästi työkaluna miettiessä yksittäisen kaukolämpöverkon lämmönvarastoinnin kapasiteetin mitoitusta.

Kysymys 8 vastauksista otettiin ensin keskiarvo ja saatiin tulos 30,20 GWh. Seuraavaksi haettiin kunkin vastaajan kaukolämmön kokonaismyynti vuodelta 2022. (Energia, 2023) Tutkimukseen osallistuneiden yhtiöiden vuosikulutus oli ollut keskiarvoltaan 1055,1 GWh. Sitten laskettiin, kuinka monta prosenttia lämpövaraston sopivaksi tasoksi arvioitu keskiarvo oli kl-verkkojen vuoden kokonaiskulutuksen keskiarvosta. $30,20\text{GWh}/1055,1\text{GWh}=2,9\%$

Tällä tavalla saatiin siis käsitys, että lämpöenergian varastoinnin kapasiteetti voisi olla luokkaa 3% kaukolämpöverkon vuosikulutuksesta. Esimerkiksi Tampereelle tämä tarkoittaisi 66,6 GWh lämpövarastokapasiteettia, koska $2220\text{GWh} \cdot 0,03 = 66,6\text{ GWh}$. Kyseessä ei ole mikään absoluuttinen totuus, mutta suuntaa antavana työkaluna mielenkiintoinen.

Kysymys 9.

9. Kuinka tärkeänä näette lämmön pitkäaikaisen varastoinnin modernissa kaukolämpöjärjestelmässä? (Viikkotason tai yli)



Kysymyksessä 9 vastausten hajonta oli pientä, sijoittuen 6 ja 10 väliin. Keskimääräiseksi arvioksi lämmön pitkäaikaisen varastoinnin tärkeyteen tuli 8.40. Tulos kertoo kiistatta, että lämpöenergian pitkäaikaisella varastoinnilla nähdään olevan tärkeä rooli modernissa kaukolämpöjärjestelmässä.

Kysymys 10.

Viimeisessä kysymyksessä annettiin vastaajille mahdollisuus kertoa vapaasti mietteitään lämpöenergian varastointiin liittyen kaukolämpöverkoissa. Alla on lueteltu suoria lainauksia vastaajilta anonyymisti.

” lämpövaraston kapasiteettin koko pitää suhtautua tarpeisiin, ei ole pakko olla iso varasto että se auttaa järjestelmän paljon. esim 10h varasto tekee jo aika paljon hyvää”

” Lämpövarastointi tulee olemaan viiden sukupolven kaukolämpöverkon sydän.”

” Lämmön pitkä aikainen varastointi tulee olemaan mielestäni tärkeä tekijä kaukolämmön kilpailukyvyyn ylläpitämiseen, koska se mahdollistaa edullisen hukkalämpöjen paremman hyödyntämisen.”

” Lämpövarastot ovat merkittävässä roolissa tulevaisuudessa. Ne ovat lähes ainoita tapoja hyödyntää eri prosesseissa (vety, Co2) syntyviä hukkalämpöjä.”

” Kalliolämpöakun (n. 200m3) häviöt ovat olleet suuret n. 35%”

” siirryttäessä polttavien rinnalle tuleviin vaihtoehtoihin lämmöntuottajiin (sähkökattilat, mahdolliset datasenterit jne.) entisestään korostuu joustavuutta ja säädeltävyyttä ajatellen ei pelkästään päivä eikä viikko vaan kausivaraston tärkeys. Selvitystötä käynnissä ja nyt käynnistetään myös kausivaraston (esim. 600 000 kuutiota) investoinnin järkevyysselvitystä. Tsemiä koulutyöhön!”

”sähköntuotannon tasehallinnan ja sähköntuotannon profiilijon suhteen ratkaiseva rooli”

”Ehdottoman tärkeää sähkön yhä suurenevien hintavaihteluiden takia”

Avoimissa vastauksissa ilmenee hyvin ne tarpeet ja muutokset mitkä ovat tehneet energian varastoinnin päivänpolttavaksi aiheeksi energia- ja teollisuuskentässä.

Sektori-integraation kautta kaukolämpöverkot kietoutuvat entistä syvemmin muuhun yhteiskunnan infrastruktuuriin kiinni. Hukkalämpöjen keruu datasaleista, vedyn tuotannosta ja muusta teollisuudesta synnyttää kaukolämpöverkkoon omistajasta (KL-yhtiö) riippumatonta energiaa, jonka käsittelyyn riittävän suuri lämpövarasto tuo paljon lisäarvoa, säädettävyyttä ja joustoa. Yhtä lailla kaksisuuntainen kaukolämpöverkko, jossa tavalliset kuluttaja-asiakkaatkin voivat alkaa syöttämään lämpöä verkon suuntaan ylijäämä tilanteessa, lisää tarvetta kaukolämpöverkon ketteryyteen.

Lämpövarastojen tärkeä rooli sähkömarkkinoiden heilunnan tasaajana esim. sähkökattiloiden käytön rinnalla tuli myös hyvin vastauksissa esiin.

5 LÄMPÖENERGIAN VARASTOINNIN TARVE TAMPEREELLA

Tässä kappaleessa selvitettiin todellista lämmön varastoinnin tarvetta/potentiaalia vuoden 2025 syksyn jälkeisessä ajassa Tampereen Energian kaukolämpöverkossa. Syksyllä 2025 Lielahteen valmistuva LLT-45- projekti tuo Tampereen Energian tuotantopalettiin uusia ulottuvuuksia, kun 100MW lisää sähkökattilatehoa ja noin 900MWh lisää varastointikapasiteettia valmistuu.

Nordic Ren-Gas- yhtiön suunnittelema e-metaanintuotantolaitos Tarastenjärvelle toisi merkittävästi lisää hukkalämpöä (180GWh) Tampereen Energian kaukolämpöverkkoon. Tämän ja mahdollisten muiden vetylaitosten tuottamien hukkalämpöjen optimaalisessa hyödyntämisessä auttaisi suuresti suurikapasiteettinen lämpövarasto. Ilman vähintään viikkotason lämpövarastoa, voisi hukkalämpöjen maksimaalinen hyödyntäminen tulla haasteelliseksi varsinkin lämmityskauden ulkopuolella.

Ren-Gas: in ja muiden mahdollisten vedyn ja e-metaanintuotantolaitosten liittäminen on hyvä mahdollisuus Tampereen Energialle saada hiilineutraalia ja edullista hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon. Tämän tyyppisen teollisuuden tuotanto ja ajomallit aiheuttavat kuitenkin omat haasteensa kaukolämpöverkolle. Vetylaitos ajaa tuotantoaan uusiutuvan sähkön saatavuuden mukaisesti ja täten voi tulla tilanteita, että täyttä kapasiteettia ajetaan silloin, kun se kaukolämpöverkon näkökulmasta ei ole optimaalista. Tämä voi taas syödä kuormaa kaukolämpöyhtiön optimaaliseksi suunnittelemlta laitoksilta siinä hetkessä. Voi olla mahdollista, että tulee tilanteita, jolloin kaukolämpöyhtiö joutuu ajamaan suuren lämpölaitoksen tehoja alas, mahdollistaakseen vedyntuotantolaitoksen jäähdytyksen kaukolämpöverkkoon. Vetylaitoksille tulisi tosin myös vaihtoehtoinen jäähdytysmuoto, jolla varmistetaan vetylaitoksen jäähdytys. Ylimääräisen lämmön jäähdytys esimerkiksi Näsijärveen olisi myös yksi mahdollisuus lisätä järjestelmään. Ympäristöluvalliset seikat ja mahdolliset mainehaitat, olisivat kuitenkin potentiaalisia riskitekijöitä järveen jäähdyttämisessä.

Tällaisiin lämmön ylimäärä tilanteisiin olisi suureksi avuksi, mikäli KL- verkko omaisi riittävän suuren kapasiteetin lämpövarastoja. Lataamalla hukkalämpöjen energia lämpövarastoon, voitaisiin muu peruskulutus kattaa siihen suunnitellulla optimaalisella tuotannolla, eikä hukkalämmönlähteet häiritsisi muuta verkon ajamista. Kesäkaudella tämä ongelma voisi muuten realisoitua, kun ajatellaan, että kaukolämpökuorma kesällä on pitkiä aikoja luokkaa 60-70 MW. Tammervoiman jätteenpolttolaitosta ajetaan kesälläkin täydellä teholla, jolloin sieltä tulee KL- tehoa vähintään 40 MW, kun turbiini on täydellä sähköteholla. Tällöin jos KL- verkkoon ajetaan vielä esim. 30 MW hukkalämpötehoa, ollaan tilanteessa, että tuotanto ylittää kulutuksen. Tämän lisäksi Tammervoima yksinään, ainoana kaukolämpöverkon paine-eron säätäjänä olisi hidas ja testaamaton vaihtoehto.

Mikäli näin kuitenkin pystyttäisiinkin jotenkin ajamaan, ilman lämpövarastoa jäisi muut halvat tuotantomuodot seisomaan tyhjänpantteina pitkiksi ajoiksi. Esimerkiksi kaikki, tai ainakin suurin osa 145 MW sähkökattilatehoa jäisi hyötykäyttämättä, vaikka sähkön hinta olisi 0€/ MWh.

Siinäkin skenaariossa, että hukkalämpöjä ei tulekaan Tampereen Energialle toivutussa määrin, olisi kaikkien tuotantolaitosten verkkoon mahtuminen aina optimaalisesti vaikeaa ilman suurikapasiteettista lämpövarastoa kesäkaudesta 2026 alkaen, lisääntyneen sähkökattilakapasiteetin myötä LLT-45 projektin valmistuttua.

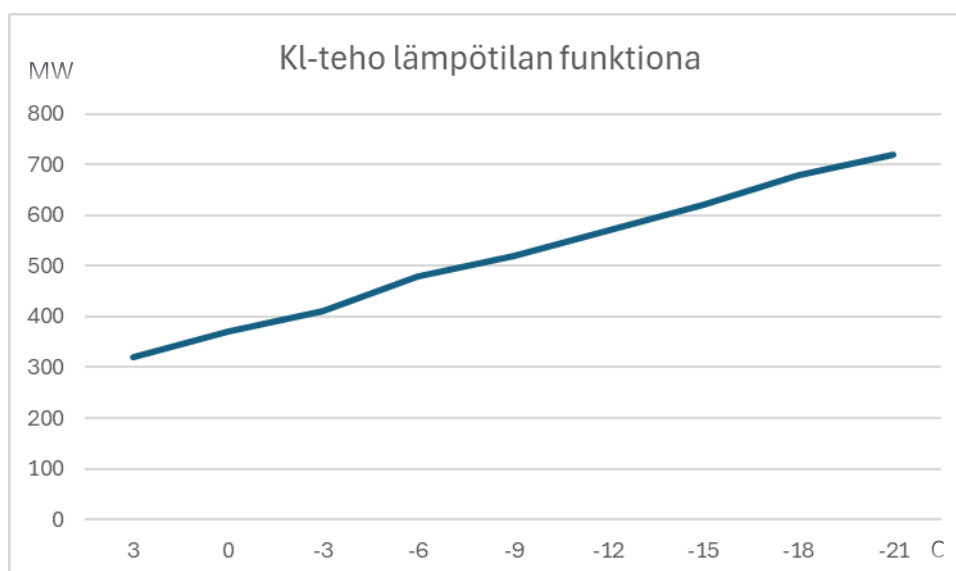
5.1 Tuotantopaletti 2025 vuoden lopulla

Tampereen Energia on sitoutunut Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin pyrkiä pysäyttämään ilmaston lämpeneminen 1,5°C: een. Ilmastotavoitteet ja taloudellinen kannattavuus kaukolämmön tuotannossa kulkevat käsikädessä. Fossiilisten polttoaineiden pois saaminen tuotantopaletista tukee näistä kumpaakin tavoitetta.

Seuraavilla taulukoilla ja kaavioilla on havainnollistettu Tampereen Energian kaukolämmön kysyntää eri vuoden aikoina ja tuotantorakennetta 2025 loppuvuodesta alkaen. Ensin on listattu tuotantolaitokset eri ajomoodien mukaan riippuen päivän sähkön hinnasta ja haettu lämmityskauden aikaisia teholukuja lämpötilan funktiona referenssi vuodelta 2024. Lämmityskauden, suunnilleen +3°C - 21°C, aikana lämpövarastojen käytön profiili on enemmän purku puolella.

Taulukko 3. Tuotantolaitoksien max. KL-tehot sähkön hintatason mukaan. (Tampereen Energia, 2025)

Tuotantopaletti 2025 lopulla						
Halpa spot			Kallis spot			
Laitos	MW		Laitos	MW		
Nsl 3	220		Nsl 3	170		
LLT 3-5	140		LLT 3-5	0		
TaVo	60		TaVo	40		
HV1	55		HV1	55		
SK1	37		SK1	37		
LLT akku	100	(9h)	LLT akku	100	(9h)	
	612			402		



Kuva 8. KL- teho (MW), lämpötilan (C) funktiona. (Tampereen Energia, 2025).

Taulukkoa 3. ja kuvaa 8. tutkittaessa nähdään, että sähkön hinnan ollessa alhaalla, uusi tuotantopaletti riittää ensimmäiset n. 9h vielä suunnilleen 12 pakkasasteen lämpötilalla kattamaan kaukolämpötuotannon ilman fossiilisia jakeita, maakaasua tai öljyä. LLT- 45 akkujen tyhjettyä, riittäisi fossiiliton tuotanto n. 500MW tasoon ja lämpötilaan -8°C. Näiden tehotasojen jälkeen olisi viimeistään suuremman lämpövaraston vuoro purkaa ladattua tehoa, mikäli haluttaisiin välttää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Pellettiä, tai seuraavaksi kalleinta jaetta vasten purettaessa, lämpövaraston (esim. Nsl luola) purku aloitettaisiin luonnollisesti jo aikaisemmin. Vielä on epävarmaa sekkin, pystytäänkö kaikki LLT 3, 4 & 5 teoreettinen maksimi teho ajamaan samanaikaisesti länsipuolen pumppausaseman rajoitusten vuoksi itäpuolelle kaukolämpöverkkoa.

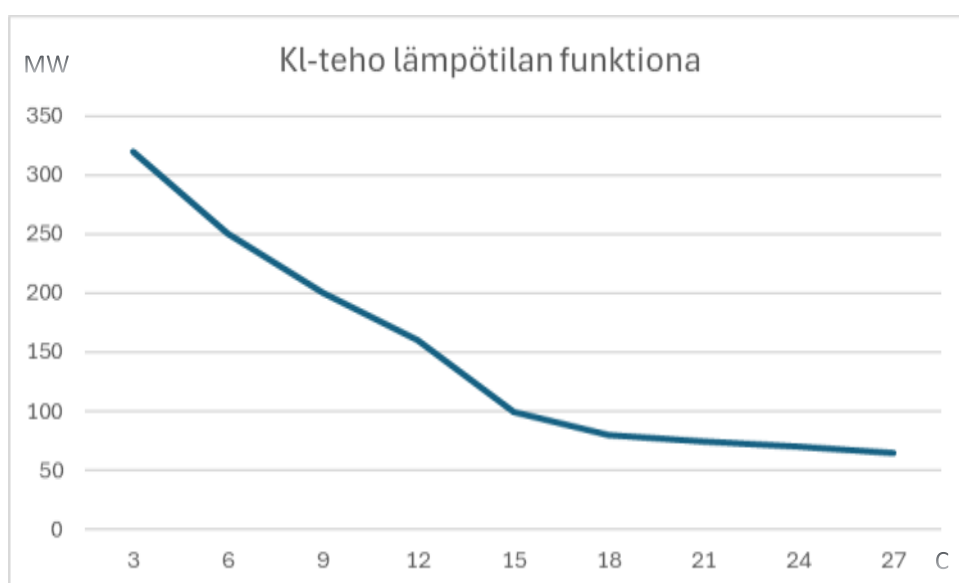
Kalliin sähkön spot- hinnan aikana LLT- 45 akkujen ollessa tyhjillään KL- tuotanto olisi tasoa 300 MW, joka riittää enää muutaman asteen plussakelillä kattamaan kulutuksen.

Uuden tuotantopaletin sähkökattilateho, joka ollessaan suurimmillaan 145MW, tuo myös säätösähkömarkkinoiden hyödyntämiseen uusia mahdollisuuksia. Ajatellaan tilanne, että Lielahden kaikki 3 sähkökattilaa ovat täydellä tuotannolla 145 MW ja Fingrid ilmoittaa ylössäädöistä. Ylössäätö tarkoittaa sähkökattilan tapauksessa tehon laskua, jolloin sähköverkon sähkönkulutus laskee. Tätä tehon laskua ei pystytä kuitenkaan toteuttamaan, ellei tehonlaskusta johtuvaa kaukolämpötehoa korvata samaan tahtiin jollain muulla tuotannolla. Näissä tilanteissa suuri kapasiteettinen lämpövarasto olisi omiaan korvaamaan menetetyt teho ja mahdollistaisi ylössäädön toteutuksen. Ylössäätöhinnan ollessa esimerkiksi 200 €/MWh, saisi 5 tunnin ylössäädöillä $(200 \text{ €/MWh} * 145 \text{ MW}) * 5 \text{ h} = 145 \text{ 000€}$ ylimääräistä katetta.

Säätösähkömarkkinoiden alassäädöillä tarkoitetaan tilannetta, jolloin sähköntuotajalle/käyttäjälle maksetaan siitä, että sähköverkon kulutusta lisätään, tai tuotantoa verkkoon pienennetään. (Fingrid, 2025)

Näissä tilanteissa sähkökattiloiden nopea käynnistys olisi mahdollista, mikäli niiden tuottama kaukolämpöteho voidaan jäähdyttää. Viisain keino olisi ajaa tämä teho talteen lämpövarastoon ja saada säädoistä tupla hyöty.

Suuremman lämpövaraston, (esim 20GWh) lämpövaraston purkamiselle on siis tulevaisuudessakin vielä paikkansa, mutta se pitää tietysti pystyä ensin lataamaan. Seuraavaksi on esitetty kesäkauden kaukolämpötuotantoa ja kysyntää.



Kuva 9. KL- teho (MW), lämpötilan (C) funktiona. (Tampereen Energia, 2025).

Kesäkaudella jakso, jolloin kaukolämmön tarve Tampereella on alle 100 MW, ajoittuu noin toukokuun puolivälistä syyskuun puoliväliin. Tämä noin 4kk kesäaika katetaan kaukolämmön tuotannossa suurimmalta osin Tammervoiman teholla, joka kesällä on keskimäärin 50MW kl- tehossa. Tammervoiman jälkeen verkkoon ei paljoa enää tuotantoa mahdukaan. Sähkön hinnan ollessa alle hakkeen rajakustannuksen, ajaa Tammervoiman rinnalla sähkökattilat teholla 15-50 MW. Tällöin voidaan nähdä, että kun Lielahden sähkökattilateho on 145MW, niin teoriassa sähkökattilatehoa jää kesällä 4kk aikana vähintään 100MW ajamatta, vaikka sähkö olisi halpaa. Aina sähkö ei kuitenkaan ole halvempaa kuin seuraavaksi halvin jae, mutta

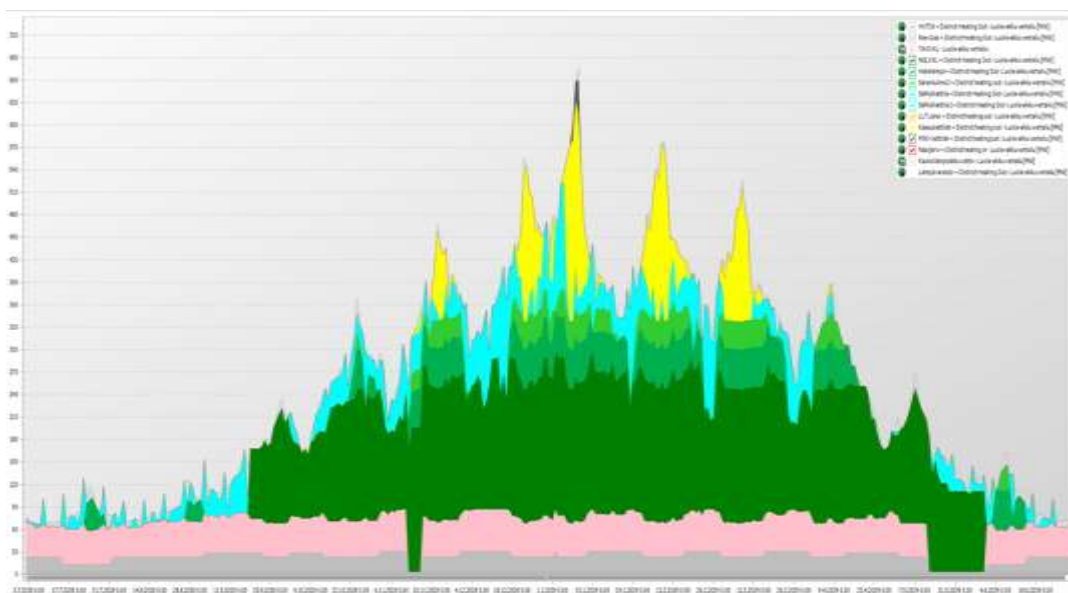
voidaan arvioida, että vähintään puolet kesäajan tunneista sähkön hinta on alle hakkeen rajakustannuksen. Tällöin voidaan laskea: $4kk = 30d \cdot 4 = 120d \cdot 24h = 2880h / 2 = 1440h$

Kesäaikana olisi siis 1440h jolloin sähkökattiloita voisi ajaa lämpövarastoon min 100 MW teholla, jolloin lämpöä saisi pelkästään sähkökattiloilla talteen $1440h \cdot 100 MW = 144\,000 MWh = 144 GWh$

Tätä voidaan peilata vaikka kevyt öljyn käyttöön, jota paloi Tampereen Energiolla vuonna 2023 53,5 GWh. Kokonaan 144 GWh: in lämpömäärää ei pystyttäisi hyödyntämään myöhemmin ilmojen kylmetessä, mutta selvää on, että kesäaikana tulee olemaan merkittäviä määriä halpoja tunteja varastoitavaksi jo vuonna 2026 kesällä.

5.2 Tuotantopaletti vuodesta 2028 alkaen

Seuraavana on tarkasteltu tuotantopalettia ja kaukolämmön kysynnän kattamista vuodesta 2028 eteenpäin. Vuonna 2028 nykyinen investointiputki on valmistunut Lielahden sähkökattiloineen ja akkuineen, sekä Ren-Gasin hukkalämmöt ovat tulleet osaksi kaukolämpöverkkoa. Kuvassa on pystyakselilla kaukolämpöteho alueella 0-720 MW ja vaaka-akselilla ajanjakso 7/2028 – 7/2029. Kuvan mallinnus on tuotettu Tampereen Energian Energy Optima 3 optimointiohjelmalla, jolla voidaan tutkia erilaisia tulevaisuuden skenaarioita. Kuvassa 11 verrataan miltä vuosituotanto näyttäisi 20 GWh lämpövaraston kanssa.



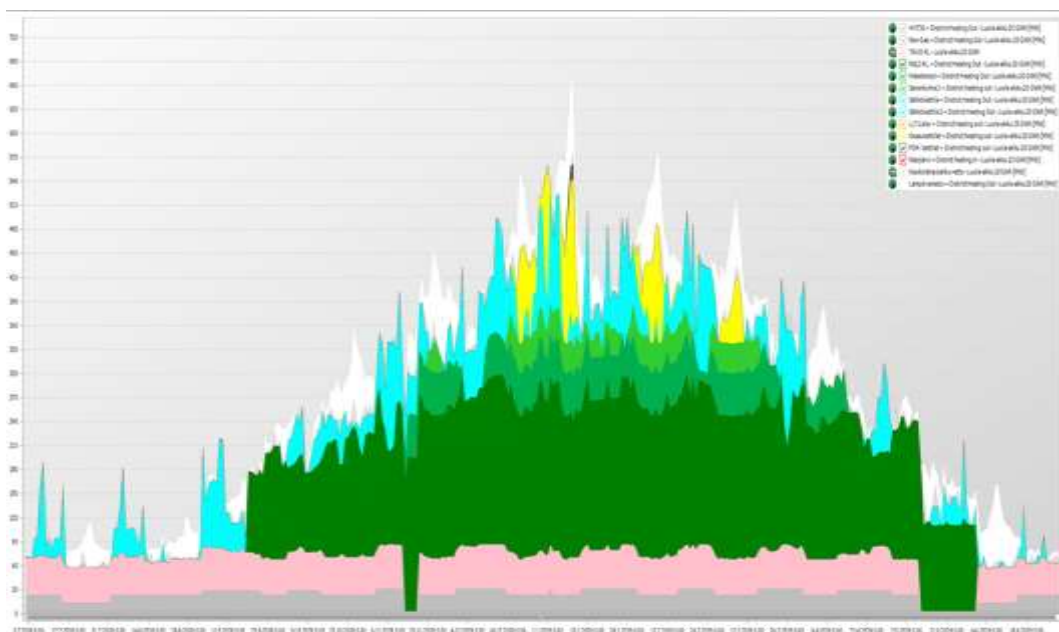
Kuva 10. Tuotantorakenne ajanjaksolla 7/2028 - 7/2029 (Tampereen Energia, 2025).



Tulevaisuudessa Ren-Gas: in hukkalämmöt ja Tammervoiman tuotanto tulevat yhdessä muodostamaan tuotannon perustan ympäri vuoden, pois lukien lyhyet huoltoseisakit. Kuvassa Pysty akselin jako on 30MW kerrallaan, eli Ren- Gas tuottaisi noin 25 MW peruskuormaa. Yhdessä Tammervoima ja Ren-Gas tuottavat siis 60-80 MW pohjakuormaa kaukolämpöverkkoon. Syksyllä ja keväällä lisäksi tulisi lähinnä sähkökattila-ajoa LLT- akkujen kanssa, höystettynä satunnaisilla HV 1 haakeajoilla. Talvikaudella NSL 3 ajaisi peruskuormaa, sähkönhinnan mukaan reduktioajo ja täyttä sähköntuotantoa vaihdellen, kuten tälläkin hetkellä. Loput kaukolämpökulutuksesta katettaisiin hakkeella, pelletillä, sähköllä ja kaasulla kulloisenkin kannattavuuden mukaan.

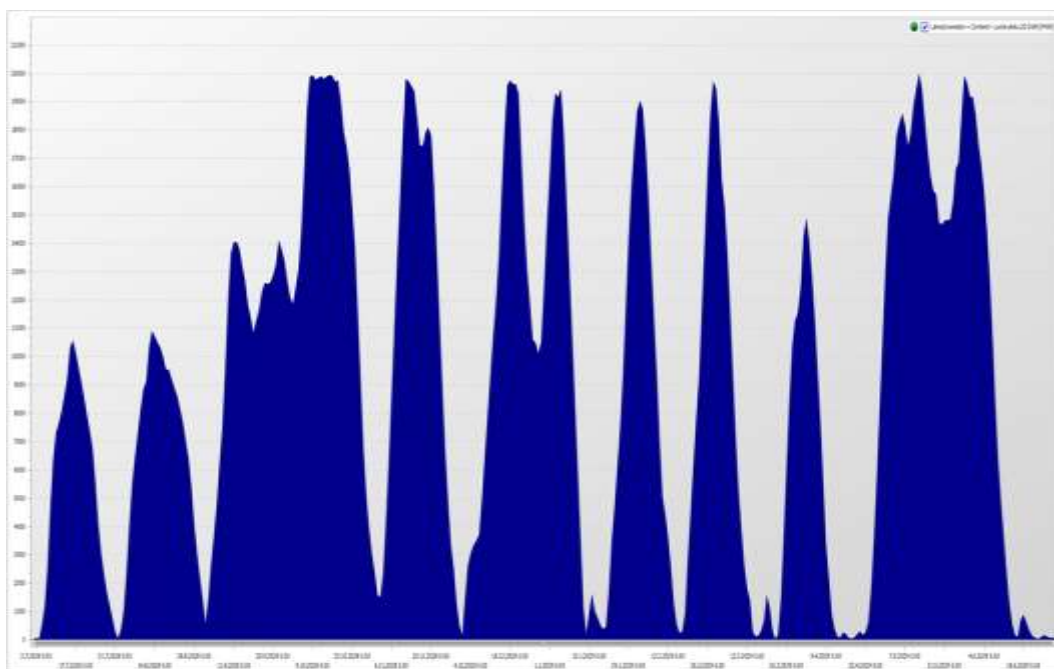
Seuraavassa kuvassa on mallinnettu tuotantopalettia vuonna 2028 mikäli siihen lisättäisiin 20 GWh:n lämpövarasto. Tämän kokoluokan lämpövarasto olisi teoriassa mahdollista rakentaa Naistenlahden vanhan kallioluolaöljyvaraston tilalle,

hyödyntäen 140°C asteen lämpötilaa varastossa. Perinteisemmällä max. 95°C lämpötilalla NSI- luolaan mahtuisi n. 11GWh lämpövarastokapasiteetti.



Kuva 11. Tuotantorakenne ajanjaksolla 7/2028 - 7/2029 20GWh lämpövaraston kanssa. (Tampereen Energia, 2025).

Tässä kuvassa värit kuvaavat samoja laitoksia kuin edellä, lisättynä valkoinen käyrä, joka kuvaa 20GWh:n lämpövarastoa. Kuvia 10 ja 11 analysoitaessa nähdään lämpövaraston vaikutukset tuotantoon. Suurimpina eroina löydetään keltaisen, eli maakaasun käytön väheneminen ja sinisen, eli sähkökattiloiden käytön lisääntyminen lämpövarastollisessa kuvassa 11. Lisäksi keväältä ja syksyltä on lämpövaraston avulla leikattu hakkeen ja pelletin polttaminen pois kokonaan. Talvijakson hakkeen ja etenkin pelletin ajojaksot leikkaantuvat myös harvemmiksi ja suppeammiksi. Kuvia vertaamalla voi nähdä lämpövaraston konkreettiset hyödyt tuotannossa. Kalliimpia energiajakeita tarvitaan vähemmän, kun lämpövaraston halvempi, sekä puhtaampi lämpö korvaa kysynnän tarpeita.



Kuva 12. 20GWh lämpövaraston lataus- ja purkusykliä ajalla 7/2028 - 7/2029 (Tampereen Energia, 2025).

Kuvan 12 pystyakseli ylettyy tasolle 21000MWh, eli 21GWh. Vaaka-akselilla on jälleen tarkasteltu ajanjakso 7/2028 – 7/2029. Kuvaajasta nähdään, että optimointiohjelma antaisi 20 GWh lämpövarastolle suunnilleen 9 sykliä vuodessa (normaali ennustettu vuosi). Rahassa mitattuna tämä olisi useampia miljoonia euroja vuodessa. Optimointiohjelman mukaan 10GWh ja 20GWh varaston välillä vuotuinen energiakatteen hyöty nousee selvästi, korottaessa lämpövarastoa 20GWh tasolle. Verrattaessa 30GWh ja 20 GWh kapasiteetteja, hyödyt 10GWh:n lisäämisestä jäävät jo pieniksi. Lopputuloksena nähdään, että 20GWh tasoinen lämpövarasto voisi olla lähellä optimaalisinta kokoa rakennuskustannusten, käyttökulujen ja hyödynnettävyyden kannalta. Nämä laskelmat ovat alustavaa karkeaa laskentaa ja aihetta tulee tarkastella vielä tarkemmin.

6 NAISTENLAHDEN ÖLJYVARASTO

Kappaleen 5 tuloksien perusteella voidaan arvioida, että jo kesästä 2026 alkaen Tampereen Energian kaukolämpöverkkoon sopisi merkittävästi lisäkapasiteettia lämmön varastointiin. Tulokseksi saatiin, että vähintään 20GWh lämpövarastolle olisi hyötykäyttöä vuodesta 2028 alkaen. Vaihtoehtoja tämän kokoluokan lämpövarastoksi tutkittaessa pitää miettiä millainen varasto olisi, mihin varaston saisi pienimmillä kustannuksilla rakennettua ja kuinka maksimoitaisiin varaston käytettävyys.

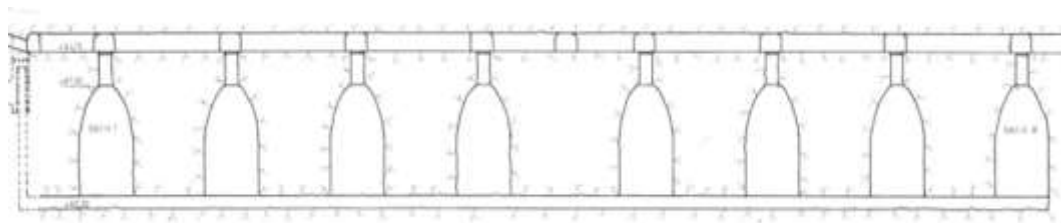
Ilmeisimpänä vaihtoehtona esille nousee Naistenlahden vanhan kallioluolaöljyvaraston muuttaminen lämpövarastoksi. Naistenlahden voimalaitostontilla sijaitsevaan kallioon louhittu luola pitää sisällään suuren öljyvaraston, jota on käytetty Tampereen Energian öljyvarastona ja muuhun öljyn varastointiin. Kuten aikaisemmista kappaleista opinnäytetyössä on selvinnyt, tällaisia luolaöljyvaraston muuttamisia lämpövarastoiksi (CTES) on jo Suomessakin muutamia tehty ja uusia projekteja on suunnitteilla. Tampereen Energian öljyn käytön vähenemisen myötä luolien ajaminen öljystä tyhjiksi on muutenkin agendalla, jolloin luolavarastolle aukeasi tilaisuus uuteen elämään lämpövarastona.

6.1 Toimintakuvaus ja rakenne

1960-luvun kasvavaan öljyn käyttöön liittyvää saatavuus- ja hintariskiä pyrittiin pienentämään ja keinoksi päätettiin rakentaa Naistenlahden tontille Kaupin kallioon syvälle maan alle suuri öljyvarasto. Varaston kapasiteetiksi suunniteltiin yhden talven öljyn kulutusta vastaava kokoluokka ja öljyvarasto valmistui vuonna 1968. (Toiva, 2017, s. 88)

Naistenlahden kallioluolavarasto koostuu 8 varastosäiliöstä, joista jokainen on 35 000m³ tilavuudeltaan. Kokonaistilavuus on siis 35 000m³ * 8 = 280 000m³. Säiliöiden pohjalla on patjavesi, jonka päällä öljy kevyempänä aineena kelluu. Kaikki

8 säiliötä ovat yhteydessä toisiinsa alhaalta juuri tämän patjaveden kautta. Patjaveden pinta elää öljyn käytön, sekä kallion vuotovesien mukaan säiliöissä. Kun öljyä puretaan säiliöstä pois, lisätään patjavettä säiliöön, jolloin nesteen kokonaistilavuus säilyy samana. Öljyvarastoa lastattaessa öljyllä patjaveden pinta laskee ja ylimääräinen vesi ajetaan ylivuoto- ja puskurialtaan kautta kaupungin viemäriverkkoon. Puskurialtaan tehtävänä on erotella mahdolliset öljyjäämät, ettei öljyä pääse puskurialtaasta eteenpäin kaupungin viemäriin. Viemäriverkkoon pumpattavan veden laatua ja öljypitoisuutta seurataan säännöllisellä näytteiden otolla ja analysoinnilla (Heinonen, 2016)



Kuva 13. Naistenlahden kallioluolaöljyvarasto. (Tampereen Energia, 2025).

Kuvassa 13 on luolavarastosäiliöt kuvattuna sivustapäin. Säiliöt ovat maanpinnalta keskimäärin 40 m syvyydellä. Kuvassa oikeanpuoleiset 4 säiliötä ovat jo tyhjenetty öljystä ja täytetty vedellä.

6.2 Paineettoman vs. Paineistetun kallioluolalämpövaraston kapasiteetti

Suunniteltaessa luolaöljyvaraston muuttamista lämpövarastokäyttöön tulee eteen paljon selvitys- ja esisuunnittelutyötä. Kohteen geologisia ominaisuuksia kallioperän suhteen pitää mallintaa ja tutkia, että saadaan selville mahdollisia riskejä hankkeen toteutuksen kannalta.

Yksi suunnitteluvaiheen merkittävimpiä valintoja on se, että tehdäänkö lämpövarastosta paineeton vai paineellinen. Paineettomalla tarkoitetaan sitä, että veden lämpötila kallioluolalämpövarastossa pidetään alle veden kiehumispisteen eli

100°C. Tämä edustaa perinteistä ja tunnettua tekniikkaa, joka on käytössä esim. Oulun ja Vaasan tämänhetkisisä (3/2025) kallioluolalämpövarastoissa.

Paineellisella, tai paineistetulla kallioluolalämpövarastolla tarkoitetaan tekniikkaa, jossa veden lämpötilaa varastossa nostetaan yli kiehumispisteen. Veden lämpötilaa korotettaessa yli 100 asteen, tulee myös paineen nousta varastossa yli kylläisen höyryn kiehumispisteen, että vältetään veden höyrystyminen säiliössä. Paineen tekemiseksi lämpövarastoon voidaan käyttää ainakin kahta keinoa. Kallioluolan fyysinen sijainti kymmenien metrien syvyydessä maan alla luo sille luonnollisen mahdollisuuden hyödyntää staattista painetta korkeuseron myötä. Vantaa Energian Varannossa ylipaine muodostetaan pohjaveden hydrostaattisen paineen avulla. Toinen vaihtoehto olisi sijoittaa kallion päälle riittävän kookas paineistus-säiliö.

Paineellisen lämpövaraston hyöty liittyy juuri näihin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Paineelliseen varastoon mahtuu enemmän energiaa, koska sinne pystytään ajamaan kuumempaa vettä, jolloin lämpövaraston väliaineen lämpötilaeroa (ΔT) pystytään kasvattamaan. Seuraavalla kaavalla on verrattu paineettoman ja paineellisen lämpövaraston eroa veden lämpötilaeron muuttuessa ja muiden arvojen pysyessä samoina.

$$Q = V * \rho * c * \Delta T \quad (3)$$

Missä: Q varastoitava lämpöenergia (J), V tilavuus (m³), ρ aineen tiheys (kg/m³), c aineen ominaislämpökapasiteetti (J/kg*K), ΔT lämpötilan muutos (K)

Paineettoman kallioluolalämpövaraston ΔT :ksi on tässä arvioitu 45 astetta Kelviniä, jolloin lämpövaraston kapasiteetiksi saataisiin koko 280 000m³ tilavuus hyödyntämällä: $Q = 280\,000\text{m}^3 * 980\text{ kg/m}^3 * 4,19\text{ Kj/kg}^*\text{K} * 45\text{K} / 1000 = 51\,738\,120\text{ MJ} * 0,277777778 = 14\,371\,711\text{ KWh} / 1000 = 14\,371\text{ MWh} / 1000 = 14,37\text{ GWh}$

Paineellisen lämpövaraston korkeamman ΔT :n vaikutus kapasiteettiin havainnollistuu, kun lasketaan paineellisen varaston kapasiteetti ΔT : llä 90°C: $280\,000\text{m}^3 *$

$980 \text{ kg/m}^3 * 4,19 \text{ Kj/kg} * \text{K} * 90\text{K} = 28,74 \text{ GWh}$. Tässä laskennassa ei ole otettu huomioon veden ominaislämpökapasiteetin nousua veden lämpötilan ja paineen noustessa kohti mitoitusta maksimi 135 astetta. Tärkein tieto on se, että lämpötilan nostolla on merkittävän suuri vaikutus kallioluolalämpövaraston kapasiteetin kannalta.

Kumpikin vaihtoehto soveltuisi kokonsa puolesta lämmönvarastointikäyttöön Tampereen kaukolämpöverkossa, kun tiedämme kappaleen 5 myötä, että lämpöä varastointiin kyllä riittää tulevaisuudessa. Tuloksista nähdään myös, että väliaineen, eli tässä tapauksessa veden lämpötilaeron tuplaamisella saadaan myös lämpövaraston kapasiteetti tuplattua. Näin suurella erolla pelkällä lämpötilan nostolla olisi merkittävä vaikutus kallioluolalämpövaraston takaisinmaksuaikaan ja kannattavuuteen, etenkin kun tiedetään lämpöä olevan isommallekin varastolle tarjolla.

Tämän perusteella voisi helposti todeta, että paineellinen kallioluolalämpövarasto on parempi vaihtoehto ja sellainen kannattaa rakentaa. Asia ei ole kuitenkaan näin yksinkertainen, mitä pelkkä energiakapasiteetin maksimointi antaisi ymmärtää.

Valintaa tehdessä paineettoman ja paineellisen luolalämpövaraston välillä tulee ottaa huomioon monia muitakin asioita.

6.3 Paineettoman vs. Paineistetun kallioluolalämpövaraston lataus- ja purkuteho

Toinen tärkeä asia huomioitavaksi luolalämpövaraston tekniikan vertailussa kapasiteetin lisäksi on varaston lataus- ja purkutehot. Latausteholla tarkoitetaan sitä, kuinka nopeasti lämpövarastoon saadaan varattua energiaa. Purkuteho taas määrittää kuinka nopeasti ja kuinka suuri määrä energiaa varastosta saadaan käyttöön kaukolämpöverkkoon. Suomessa käytössä olevilla kaukolämpöakuilla lataus- ja purkutehot ovat keskimäärin 50-60 MW luokassa, suurimpien ollessa päälle 100MW.

Lataus- ja purkutehoilla on suuri merkitys lämpövaraston käytettävyyden kannalta. Lataamisessa isoista tehoista hyödytään etenkin taloudellisessa mielessä silloin, kun sähkömarkkinoilla on halpaa sähköä tarjolla. Purettaessa lämpövarastoa tilanteet ja tehon tarpeet vaihtelevat enemmän. Suuri tehomaksimi tuo kuitenkin paljon lisäarvoa myös purkutilanteissa. Esimerkkejä tästä voi olla mm. tilanteet, jolloin ulkoilma kylmenee nopeasti ja kaukolämpöverkon tehon tarve lisääntyy äkillisesti. Toinen esimerkki voi olla ison tuotantolaitoksen äkillinen suunnitteleman häiriö, jolloin lämpövaraston tehon soisi olevan riittävän suuri, että tipah-taneen laitoksen koko teho saataisiin korvattua.

Paineettoman ja paineellisen kallioluolalämpövaraston eroa tutkittaessa purku- ja lataustehojen suhteen, paineellisen lämpövaraston korkeampi lämpötila nousee arvossaan. Paineellisen varaston korkeampi ΔT auttaa saamaan varastosta ulos suurempia tehoja pienemmillä virtauksilla, koska

$$Q = \dot{m} * c * \Delta T \quad (4)$$

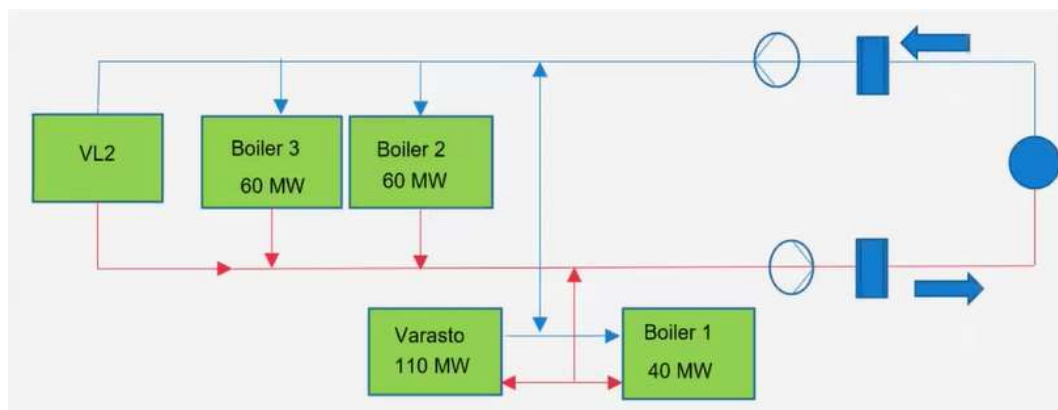
Virtausnopeuksien pitämällä kurissa on hyötyjä lämpövaraston pumppujen mitoituksessa ja etenkin isona hyötynä nähdään kallioluolalämpövaraston kerrostu-neisuuden varmistaminen pienempien virtausten ansiosta. Veden lämpötila kerrostuminen on hyvin tärkeä asia lämpövaraston toiminnan kannalta ja tässä pie-nemmät virtausnopeukset pienentävät riskiä varaston ns. pyörähdykselle.

6.4 Paineeton vs. Paineellinen kallioluolalämpövarasto case Vaasa

Suomen suurin käytössä oleva lämpövarasto sijaitsee Vaasan Vaskiluodossa, Vaasan Voiman voimalaitoksen yhteydessä ja on kytketty Vaasan Sähkön kaukoläm-pöverkkoon. Vaasan kallioluolavarasto rakennettiin 1970- luvulla alun perin öljyn säilytykseen. 1990- luvun lopulla luolat tyhjennettiin ja puhdistettiin öljystä. Vuonna 2020 vaskiluodon kallioluolat aloittivat uuden tarkoituksensa lämpöva-rasto käytössä.

Kooltaan Vaasan luolalämpövarastot ovat 150 000 m³ ja 60 000 m³ (yhteensä 210 000 m³). Vuoden 2025 alussa lämpöenergian kapasiteetti Vaasan varastossa on 11GWh, joka vertailuna Tampereen lämpövarastojen kapasiteettiin on kymmenkertainen LLT 45 projektin valmistumisen jälkeenkin. Lataus- ja purkutehot Vaskiluodon lämpövarastolla ovat 110MW. (Vaasan Voima, 2020)

Vaskiluodon nykyiseen paineettomaan kallioluolalämpövarastoon kuuluu osana 3kpl sähkökattiloita 2*60MW ja 40MW, eli yhteensä jopa 160MW. Lisäksi vieressä toimii Vaskiluodon CHP- voimalaitos.



Kuva 14. Vaskiluodon luolalämpövaraston prosessikaavio. (Björkman, 2024).

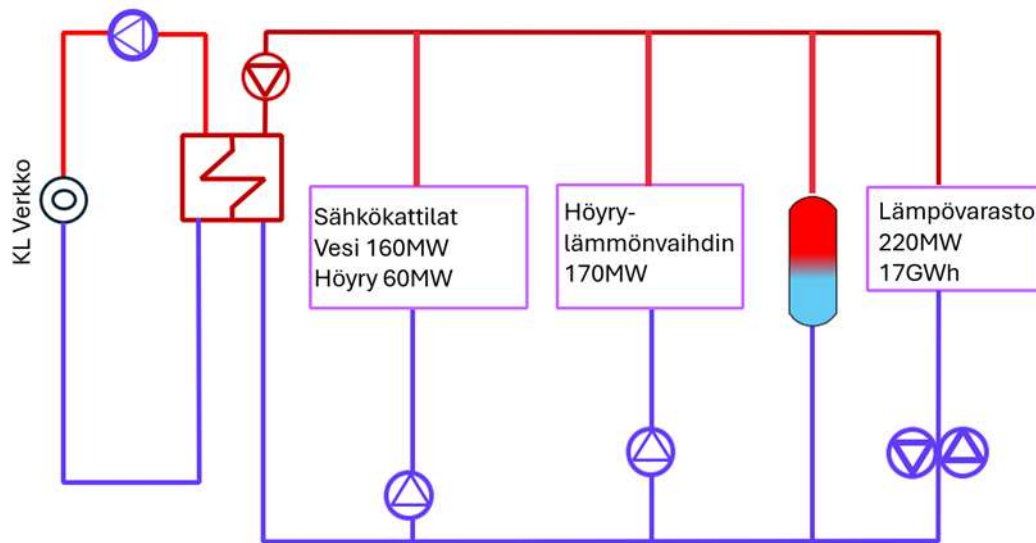
Kuvassa 14 tämänhetkisen lämpövaraston prosessikaavio, jossa VL2 on vaskiluodon voimalaitos ja boilerit sähkökattiloita. Itse lämpövarasto on siis tällä hetkellä paineeton ja veden lämpötila varaston kuumimmassa yläosassa noin 95°C, eli hieman alle veden kiehumispisteen.

Projektin suunnitteluvaiheessa Vaasassa teetettiin tutkimuksia lämpöhäviöistä kallioperään. Simulointien mukaan ensimmäisinä vuosina häviöt ovat luonnollisesti suurimmillaan, mutta vuoden 4 & 5 tienoilla häviöt tasaantuvat. Syklisen, jokatäpäiväisen käytön myötä häviöiden huomaaminen käytännössä on jäänyt vähäiseksi. Vaskiluodon luolalämpövarastoa operoivan EPV:n kehityspäällikkö Simon Björkmanin mukaan Vaskiluodon luolalämpövaraston häviöt ovat olleet 2-10% luokkaa päivästä riippuen. (Björkman, 2025)

Vaasassa luolalämpövarastosta on saatu siinä määrin positiivisia kokemuksia, että Vaskiluodon lämpövarastoa ja sen teknologiaa on päätetty lähteä entisestään kehittämään pidemmälle. Vaskiluodon lämpövaraston kapasiteettia on päätetty nostaa 17 gigawattituntiin ja lataus- ja purkuteho 220 megawattiin. Tehojen ja kapasiteetin nosto saadaan aikaiseksi lämpövaraston lämpötilaa nostamalla nykyisestä 95 asteesta kiehumispisteen yläpuolella olevaan lämpötilaan (n. 135°C) hyödyntämällä vesipatsaan muodostamaa staattista painetta. Lisäksi päivityksen yhteydessä varastoon lisätään yksi sähkökattila (60MW) lisää. Lämpövaraston laajennus valmistuu loppuvuodesta 2025. (Björkman, 2025)

Vaskiluodon lämpövaraston laajentamisella ja tekniikan muutoksella haetaan siis hyötyjä kapasiteetin, tehojen ja myös käytettävyyden osalta. Tämänhetkisen lämpövaraston heikkouksiin on lukeutunut mm. se, että talvella max. 95 asteinen lämpövaraston vesi on jouduttu priimaamaan ylöspäin, kun ajoluku kaukolämmön menopuolella on talvella päälle 95°C. Lisääntyneellä kapasiteetilla ja lataus- ja purkuteholla saadaan entisestään lisättyä polttoon perustumattoman kaukolämmön toimitusosuutta.

Uudessa konseptissa Vaskiluodon luolalämpövarasto irti kytketään kaukolämpöverkosta omaksi piirikseen, joka on kaukolämpöverkkoon yhteydessä lämmönvaihtimella. Lämpövaraston puolella prosessia veden lämpötila tulee olemaan aina minimissään 10 astetta korkeampi kuin kaukolämpöverkon menolämpötila, joka eliminoi tarpeen varaston veden lämpötilan priimaamiseen. Kuvassa 15 esitetty prosessikaavio lämpövaraston päivityksen jälkeen.



Kuva 15. Vaskiluodon korkeapaineinen kallioluolalämpövarasto. (Björkman, 2025).

Prosessikaaviosta nähdään, että lämpövarastokokonaisuus on kuvassa suurimman lämmönvaihtimen oikealla puolella ja vaihtimen vasemmalla puolella on kauko-
lämpöverkko, sekä vaskiluodon voimalaitoksen lämmönvaihtimet. Yksi höyryläm-
mönvaihdin (LV3) Vaskiluodon voimalaitokselta on kytketty myös lämpövarasto-
piiriin. LV3:lla pystytään lataamaan varastoa silloin, kuin sähkön hinta on korkea ja
sähkökattiloiden ajaminen kannattamatonta. (Björkman, 2025)

6.5 Naistenlahden Luolalämpövaraston tyyppin valinta

Vaasan Vaskiluodon kallioluolalämpövaraston tutkiminen on antoisaa Naistenlah-
den luolavarastoa suunnitellessa, koska molemmissa on paljon yhteisiä tekijöitä.
Molemmat varastot ovat alun perin öljyn varastointiin kallion sisään louhittuja luo-
lia. Kokoluokka tilavuuden suhteen on myös suunnilleen samaa luokkaa. Erojakin
on, kuten esimerkiksi Vaskiluodossa varastosäiliöitä on 2kpl, jotka ovat toisiinsa

nähden erikokoisia, kun taas Naistenlahdessa säiliöitä on 8 kpl samankokoisia. Toisaalta voidaan ajatella, että Naistenlahden säiliöt ovat yhtä kokonaisuutta, koska ne ovat alhaalta toisiinsa yhteydessä.

Naistenlahden öljyvarastoa lähdettäessä muuntamaan lämpövarastoksi voidaan valita periaatteessa kahden tekniikan väliltä. Lämpötilan pitämisellä 95°C tai alle voidaan valita jossain määrin turvallisempi, testattu tekniikka. Tämän opinnäytetyön tiedonhaun aikana ei ole ilmennyt mitään seikkaa, mikä estäisi Naistenlahden öljyvaraston muuntamisen paineettomaksi kallioluolalämpövarastoksi.

Itse kallioluolavaraston teknisten ominaisuuksien lisäksi pitää varaston tulevaa käyttöä tutkia tarkasti. Lämpövaraston hyödyt kasvavat mitä tiheämpi syklistä käyttöä varaston käyttö on. 95 asteisella varastolla käyttöaste olisi varmemmalla pohjalla kuin suuremmalla paineistetulla varastolla. Toisaalta on todennäköistä, että 95 asteisen varaston kapasiteetti jäisi alle optimaalisesta tasosta sen suhteen, kuinka paljon Tampereen Energialla todennäköisesti varastoitavaa lämpöä tulevaisuudessa tulee olemaan.

Paineistamalla tuleva luolalämpövarasto saataisiin merkittävästi lisäkapasiteettia lämmönvarastointiin. Varastosta ulos priimaamisen tarve poistuisi ja riski varaston kerrostumisen poistumiseen pienenesi, koska voitaisiin käyttää pienempiä virtausnopeuksia korkeamman lämpötilan myötä. Suurimmat hyödyt, jotka ovat merkittäviä hyötyjä, liittyvät siis kapasiteetin ja lataus- ja purkutehojen nousuun verrattuna 95 asteinen tekniikka.

Tekniikkana ylipaineinen ja korkealämpötilainen kallioluolalämpövarasto on kuitenkin enemmän tuntemattomia tekijöitä sisältävä. Pitäisi selvittää pohjaveden taso Naistenlahden öljyvaraston päällä ja miettiä riittääkö se paineistamaan korkean lämpötilan veden. Geologiset riskit kallioperän säröistä ja mahdolliset vuodot varastosta paineistuksen ja lämmittämisen seurauksena ovat riskejä, jotka on tiedostettava. Paineistetun luolalämpövaraston kanssa lataaminen täyteen olisi kaukolämpöverkosta saatavan lämpötilan jälkeen aina sähkökattilan perässä ja täten sähkön hinnan armoilla. Yhtenä vaihtoehtona olisi rakentaa lisäksi höyryputki

Naistenlahti 3 voimalaitokselta, jolla voitaisiin ladata luolavarastoa kalliin sähkön aikana.

Tiivistettynä voidaan ajatella, että mikäli korkealämpötilainen luolalämpövarasto onnistuttaisiin rakentamaan kohtuullisilla kuluilla ja se saataisiin toimimaan halutusti, olisi sillä enemmän potentiaalia Tampereen Energian kaukolämpöjärjestelmän tasapainottajana ja optimaalisen ajon mahdollistajana.

7 HIEKKA-AKKU

Toisena vaihtoehtona Lämpöenergian varastointiin Tampereen kaukolämpöverkossa tutkittiin hiekka-akku teknologiaa ja etenkin Tamperelaisyhtiö Polar Night Energyn kehittämää sellaista. Massiiviseen kallioluolaöljyvarastoon nähden hiekka-akku edustaa tyypiltään tyystin erilaista ratkaisua. Siinä missä Kallioluolalämpövarasto olisi luokkaa 10-20GWh, olisi hiekka-akku kooltaan 1GWh luokkaa. Hiekka-akulla olisi kuitenkin maantieteellisen sijoittelun kannalta huomattavasti enemmän mahdollisuuksia. Hiekka-akkuja voisi teoriassa sijoitella useampiakin, tärkeisiin paikkoihin ympäri kaukolämpöverkkoa. Teräslieriö vesiakkuihin ja kallioluolalämpövarastoon verrattuna toinen merkityksellinen ero on latausteknologiassa, jossa hiekka-akku ei voida ladata kaukolämpöverkon ylimäärälämmöillä, vaan hiekka-akun lataus tapahtuu aina suoraan sähköllä.

7.1 Polar Night Energy ja hiekka-akun rakenne

Polar Night Energy on Tampereella vuonna 2018 perustettu yritys, joka on erikoistunut korkealämpötilaisten lämpöenergiavarastojen suunnitteluun ja valmistamiseen. PNE:n tärkeimpiä arvoja ovat polttoon perustuvan energiantuotannon vähentäminen ja tuuli- ja aurinkoenergian käytön kiihdyttäminen. Polar Nightin visioon kuuluu hyödyntää nykyisen sähkömarkkinan volatilitteettia, jossa sähkön hinta heiluu ja ennen kaikkea hyödyntää halpoja tunteja tehokkaasti, sekä osallistua sähkön reservi- ja kapasiteettimarkkinoille. (Polar Night Energy, 2025)

Polar Night Energyn toiminnan keskiössä on sen kehittämä teollisen mittaluokan, korkean lämpötilan (600°) lämpövarasto, joka käyttää väliaineenaan hiekkaa tai hiekan kaltaisia aineita. Hiekka-akussa terässäiliö on täytetty hiekalla, tai muulla kiinteällä väliaineella, esimerkiksi vuolukivipohjainen väliaine on kehitteillä. Säiliön sisällä kiertävät ilmaputket, jotka lämmittävät säiliössä olevan väliaineen. Ilmakierron lämpö tehdään sähkövastuksilla, joiden läpi ilma ajetaan puhaltimilla. Lämpö puretaan säiliöstä lämmönvaihtimen kautta kuumana vetenä, höyrynä, tai kuumana ilmaa. Myös lämmöstä takaisin sähköksi teknologia on kehitystyön alla.



Kuva 16. Polar Night Energyn hiekka-akun rakenne. (Polar Night Energy, 2025).

Kuva 1 näyttää hiekka-akun suhteellisen yksinkertaisen konfiguraation, jossa pääkomponentteja ovat ilmapuhallin, sähkövastukset, ilmakiertoputkisto ja lämmönvaihdin. Lisäkomponentteja, kuten ohituspeltejä, lämpötila- ja värinämittauksia on kohteen mukaan luonnollisesti aina oma määränsä. Prosessin toimintaa hallitaan automaation avulla. Automaation algoritmit ohjaavat sekä lämmöntuotantoa, että latausta.

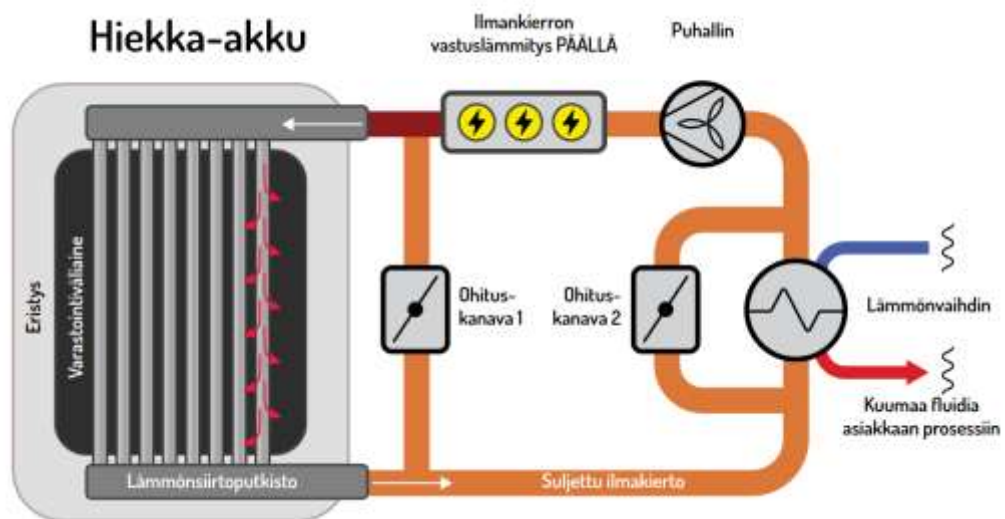
Korkeamman energiatiheyden takia, hiekka-akku tarvitsee huomattavasti vähemmän tilaa saman energiakapasiteetin varastointiin perinteiseen vesiakkuun verrattuna. 10 MW ja 1000MWh lieriön muotoisen hiekka-akun fyysiset mitat ovat 12m * 30m, missä 100°C perinteinen vesiakku vie tilaa 1000MWh luokassa suunnilleen 37m * 76m. PNE:n teknologia mahdollistaa erilaisia teholuokkia aina voimalaitos-

mittakaavaan saakka. Vakiotuotteiden kokoluokka on 2-10 MW lataus- ja purkutehon osalta. Suurempien tehojen osalta tehdään erillinen suunnittelu tarpeen mukaisesti.

Elinkaari hiekka-akulla on pitkä, puhutaan jopa kymmenistä vuosista. Pitkään elinkaareen vaikuttaa muun muassa komponenttien vähyys ja hiekan erinomainen säilyvyys. Painelaitteettomuus tekee hiekka-akun kunnossapidosta yksinkertaisempaa ja laskee elinkaarikustannuksia. (Polar Night Energy, 2025)

7.2 Hiekka-akun toimintakuvaus, lataaminen

Hiekka-akun lataaminen tapahtuu, kun joku kolmesta sille asetetuista ehdoista täyttyy. Tärkein toiminta akun lataamisessa on hyödyntää sähkömarkkinoiden halpoja Spot- hintoja. Toinen toiminta lataamiseen on sähkön reservimarkkinoille osallistuminen ja kolmantena sähköverkon taajuudentuenta.



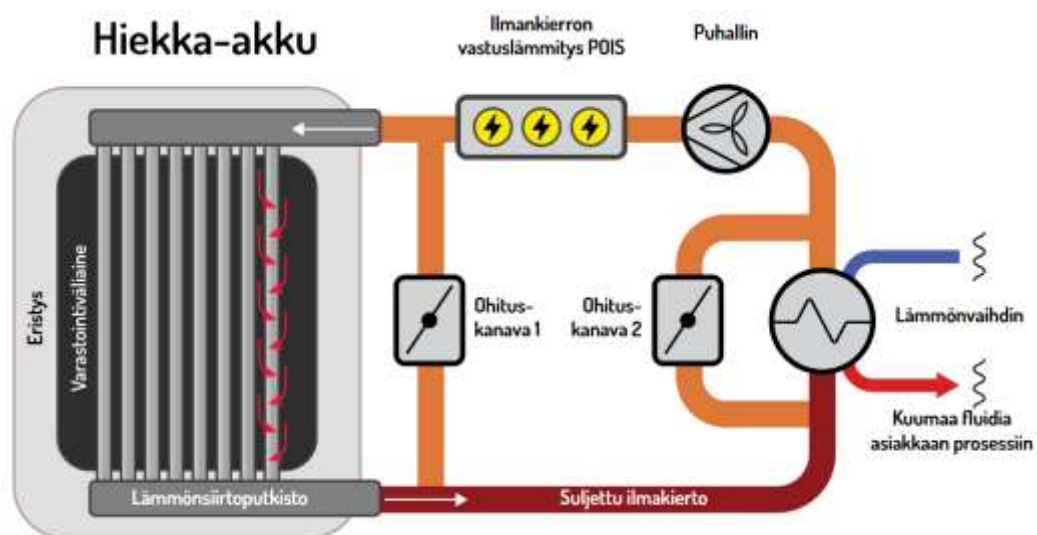
Kuva 17. Hiekka-akun lataaminen (Polar Night Energy, 2025).

Hiekka-akun latausekvenssi laittaa ilmakierron vastuslämmityksen päälle ja käynnistää ilmapuhaltimen. Ilmapuhallin puhalttaa vastusten kuumentamaa ilmaa lämmönsiirtoputkistoon, joka lämmittää säiliön väliaineen asetettuun lämpötilaan.

Ohituskanavien kautta säädellään lämpövaraston lämpötilaa ja optimoidaan hyötysuhdetta. Ohituskanavien ollessa auki ilmaa kierrätetään prosessissa sisäisellä kierrolla.

7.3 Hiekka-akun toimintakuvaus, purkaminen

Hiekka-akun lämpöä puretaan lämmöntarpeen mukaan asiakkaan lämmönvaihtimeen.



Kuva 18. Hiekka-akun purkaminen (Polar Night Energy, 2025).

Hiekka-akkua purettaessa ohituskanava 2 on suljettuna ja ilmakierto ajetaan lämmönvaihtimeen, jossa akusta puhallettava kuuma ilma luovuttaa lämpöenergiansa asiakkaan prosessiin. Viilennyt ilma ajetaan takaisin puhaltimeen ja kierto alkaa alusta. Akkua purettaessa lämmitysvastukset voivat olla joko päällä tai pois. Lämmitysvastusten ollessa pois päältä akun varaus laskee tyhjiin purkumoodissa.

7.4 Hiekka-akun käyttö

Käytössä olevia valmiita kohteita Polar Night Energyllä on yksi kappale, joka on Vatajankosken hiekka-akku Kankaanpäässä. Kankaanpään pilottihankkeena toteutetun hiekka-akun teho on 100kW ja kapasiteetti 8MWh. (Vatajankoski, 2025)

Seuraavaksi valmistuva projekti sijaitsee Loviisan Lämmön kaukolämpöverkossa Pornaisissa ja se luovutetaan asiakkaalle kesään 2025 mennessä. Kankaanpään verrattuna Pornaisten lämpövaraston teho ja kapasiteetti ovat huomattavasti suurempaa luokkaa. Pornaisten hiekka-akun teho on 1MW ja varastointikapasiteetti 100MWh, eli sama kuin esimerkiksi Tammervoiman vesiakun kapasiteetti.

Polar Night Energyn toimittamassa, Loviisan Lämmön Pornaisten hiekka-akun ope-roinnissa ja optimoinnissa tulee olemaan merkittävä rooli Elisan kehittämällä tekoälyllä. Suurimmalle osalle ihmisiä teleoperaattorina tutuksi tulleen Elisa:n kehittämä optimointitekniologia on ollut pitkään käytössä Elisan omassa verkossa Suomessa. Sähkömarkkinaan osallistuminen on Elisalla lähtenyt liikkeelle mobiiliverkon tukiasemien vara-akkujen optimoinnista ja niiden kapasiteetin tarjoamisesta kantaverkkoyhtiö Fingridille. (Elisa, 2025)

Pornaisten hiekka-akun käytössä on Elisan tekoälyoptimoinnilla siis keskeinen osa. Loviisan Lämmön toimitusjohtaja Mikko Paajasen mukaan reservimarkkinoille osallistuminen oli kriittisen tärkeä asia hiekka-akku investoinnin kannalta Pornaisiin. Reservimarkkinoille osallistuminen Elisan tekoälyoptimoinnin kanssa käänsi investoinnin hiekka-akun puolelle vertailussa uuteen hakelämpölaitokseen. (Paajanen, 2025)

Sähkön Tukumarkkinoiden Day-ahead ja Intra-day kaupankäynnin lisäksi Elisan optimointi hoitaa kaikkia reservimarkkinoilta löytyviä tuotteita, kuten FCR, aFRR ja mFRR. (Väre, 2025)

7.5 Hiekka-akun mahdollisuudet Tampereen Energialla

Tampereen Energian kaukolämpötuotannon ja tulevaisuuden hukkalämpöjen varastoimisessa sähköön perustuva hiekka-akku ei pysty auttamaan. Muita käyttökohteita taasen voisi tulevaisuudessa löytyä. Uusien tai vanhojen latvakattiloiden mahdollisissa investoinneissa hiekka-akkua voisi tutkia yhtenä mielenkiintoisena vaihtoehtona. Toinen käyttökohde voisi olla Tampereen Energian kaukolämpöverkkoon mahdollisesti liittyvien datasalien matalalämpötilaisen jäähdytysveden priimaaminen hiekka-akulla kaukolämpöverkkoon sopivaksi. P2H2P (Power-to-Heat-to-Power) teknologian kehittyessä voi silläkin saralla syntyä houkuttelevia mahdollisuuksia yhteistyöhön Polar Night Energyn kanssa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön aiheena oli Lämpöenergian varastointi Tampereen Energialla. Opinnäytetyössä pyrittiin saamaan näkemys lämpöenergian varastoinnin tarpeesta ja hyötykäytön potentiaalista lähitulevaisuuden kaukolämpöverkossa Tampereella.

Työn toimeksiantajan pyynnöstä selvitettiin toisena tutkimuskysymyksenä sitä, miten hyvin muiden kaukolämpöyhtiöiden olemassa olevat lämpövarastot ovat olleet yrityksille hyödyksi ja miten muissa alan yrityksissä Suomessa nähdään lämpöenergian varastoinnin tärkeys nykyisessä sähköistyvässä maailmassa.

Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli selvittää mitä vaihtoehtoja lämpövarastoiksi Tampereen Energialle olisi. Työn alussa tutkiminen rajattiin 2 potentiaaliin lämpövarastotekniikkaan. Uusiksi lämpövarastoiksi tutkittiin Naistenlahden kallioluolaöljyvaraston muuntamista lämpövarastoksi, sekä Polar Night Energyn hiekka-akku teknologiaa.

Kappaleessa 4 teetettiin kyselytutkimus 10 Suomalaiselle kaukolämpöyhtiölle. Kyselytutkimuksen tuloksista voidaan yhteenvetona sanoa, että olemassa oleviin lämpövarastoihin oli oltu tyytyväisiä. Uusia lämpövarastoja oli vastanneiden 10 yhtiön välillä tulossa jopa 13 kappaletta. Erityisen kiinnostavaa vastauksissa oli voimakas kiinnostus kallioluolalämpövarastoihin. Kysymykseen, jossa kysyttiin kuinka tärkeänä kaukolämpöyhtiöt näkevät lämpöenergian pitkäaikaisen varastoinnin, tulokseksi tuli 8,40/10. Kyselytutkimus vahvisti näkemystä energian varastoinnin tärkeydestä ja pinnalla olosta Suomalaisessa kaukolämpökentässä.

5 Kappaleessa selvitettiin lämpöenergian varastoinnin tarvetta Tampereen Energialla uudessa tuotantopaletissa vuoden 2025 lopulta alkaen. Vertailemalla kaukolämmön kulutushistoriaa ja uuden tuotantopaletin laitostehoja, sekä todennäköisiä hukkalämpövirtoja, saatiin kuvaa lämmönvarastoinnin lisätarpeesta.

Tämän lisäksi kappaleessa 5 mallinnettiin tulevaisuuden kaukolämpötuotantoa vuonna 2028 Tampereen Energian käytössä olevan Energy Optima 3 ohjelmiston avulla. Skenaarioissa verrattiin 20 GWh lämpövaraston lisäämisen vaikutusta tuotantopalettiin. Tuloksista nähtiin, että 20 GWh:n lämpövarastolle tulisi keskimääräisenä vuotena noin 9 lataus ja purkaus sykliä. Tällä noin 200GWh energiamäärällä saataisiin fossiilisten polttoaineiden käyttöä vähennettyä merkittävästi, jonka jälkeen sen tarve Tampereella olisi enää hyvin marginaalista vuositasolla.

Lämmön varastoinnin tarpeen osoittamisen jälkeen nousee esille kysymys, miten ja minne tätä lämpöä saataisiin kustannustehokkaimmin varastoitua. Tähän kysymykseen tutkittiin kahta vaihtoehtoa, joista soveltuvammaksi Tampereen Energialle osoittautui Naistenlahden kallioluolaöljyvaraston muuttaminen uuteen käyttötarkoitukseen lämpövarastona.

Olemassa olevaan infrastruktuuriin Kaupin kalliossa olisi tilaa rakentaa 10-20GWh luolalämpövarasto. Opinnäytetyössä Naistenlahden öljyvarastoa tutkittaessa käytettiin referenssinä mm. Vaasan Vaskiluodon samankaltaiseen vanhaan kallioluolaöljyvarastoon rakennettua kallioluolalämpövarastoa. Vaasassa on onnistuttu rakentamaan toimiva 11GWh luolalämpövarasto, jota ollaan päivittämässä 17GWh tasolle 2025 vuoden lopussa.

Tampereen Energian tuotantolaitosten luonteen ja koon, sekä tulevien hukkalämpömäärien perusteella Naistenlahden öljyluolavarastosta kannattaisi tehdä mahdollisimman suuri kapasiteetiltaan ja tehoiltaan.

Opinnäytetyön aikana ei ilmennyt syitä, jotka estäisivät Naistenlahden öljyvaraston muuttamista lämpövarastoksi. Riskit kallioperän säröjen ja lämpöhäviöiden ym. suhteen tulee luonnollisesti selvittää mahdollisen lämpövaraston rakentamisen suhteen tarkasti. Tulevissa päättötöissä voisi olla omana aiheenaan pelkästään Naistenlahden öljyluolavaraston tutkiminen, tai lämpövaraston toiminta sähkömarkkinoilla.

LÄHTEET

- Afry. (2021) Tampereen Sähkölaitos Oy. NSL3-projekti. Yleis- ja prosessikoulutus materiaali.
- Björkman, S. (2025). Development Manager. EPV Energia Oy. Haastattelu 14.02.2025
- Bärbel, E. (2019) Seasonal pit heat storage: Cost benchmark of 30 EUR/m³, Noudettu 17.1.2025 osoitteesta: <https://solarthermal-world.org/news/seasonal-pit-heat-storage-cost-benchmark-30-eurm3/>
- Dincer, I. & Ezan, M. A., (2018) Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems, Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91893-8>
- Elisa. (2025). Energiawebinaari- Päästötöntä ja kannattavaa kaukolämpöä sähköllä ja sähkömarkkinoilla. Katsottavissa osoitteessa: <https://yrietyksille.elisa.fi/energiawebinaari-tallenne>
- Elisa. (2025). Noudettu 02.02.2025 osoitteesta: <https://yrietyksille.elisa.fi/ideat/elisa-optimoi-maailman-suurinta-hiekka-akkua-puh- taampaa-kaukolampoa-ja-taloudellisia-hyotyja/>
- Energiateollisuus. (2024) Kaukolämpötilastot 2023. Noudettu 2.12.2024 osoit- teesta <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>
- Energiateollisuus. (2024) Kaukolämpötilastot 2023. Noudettu 16.1.2024 osoit- teesta <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>
- EPV Vaasan Voima. (2020). Noudettu 12.3.2025 osoitteesta: <https://www.vaa- sanvoima.fi/tulevaisuuden-lampoenergiavarasto-otettiin-kayttoon-va- sassa/>

- Fingrid. (2025) Ylös- ja alassäädön hinta. Noudettu 7.2.2025 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/ylos--ja-alas-saadon-hinta/>
- Hagström, M., (10.10.2024) GTK Geoenergiapäivät. GTK: HE INTERSTORES project – GTK activities.
- Heinonen, T. (2016). Omaisuudenhallintapäällikkö. Tampereen Energia. NSL Turvallisuus selvitys 2016 pdf.
- Hoff, M.C, (2022) Energy Storage Technologies and Applications. Viitattu 12.12.2024 <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.puv.fi/lib/vamklibrary-ebooks/detail.action?docID=29703391>
- Honkapuro, S., Sihvonen, V., Partanen, J., Harsia, P., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Järventausta, P., Repo, S., Remes, L., & Ketomäki, J.(2020) Jousto 2035 visio – Energiajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035, <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161812/Jousto%202035%20visio%20-%20Energiaj%c3%a4rjestelm%c3%a4n%20jouston%20tarpeet%20ja%20toteutuspotentiaali%202035.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Karhu, J., (2010) Diplomityö. Kaukolämpöakun koon optimointi ja taloudellinen kannattavuus
- Kingelin, O., (2024) GTK Geoenergiapäivät: Hyvinkään lämpövoima Oy, Kulomäen PTES- lämpövarasto
- Korpisaari, S., (2024) Kandidaatintyö. Levelized cost- mittari ja sen vertailu elinkaarilaskenta menetelmiin.
- Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. (2006) S. 386&393. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus.
- Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. (2006) S. 387. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus

- Laine, M., Bamberg, J., & Jokinen, P. (2007) Tapaustutkimuksen taito. Helsinki: Gaudeamus. Piekkari, Rebecca & Catherine Welch (2020) Oodi yksittäistapaustutkimukselle ja vertailun monenlaiset mahdollisuudet. Teoksessa Anu Puusa & Pauli Juuti (toim.) Laadullisen tutkimuksen näkökulmat ja menetelmät. Helsinki: Gaudeamus, 207–215.
- Lindroos, T., (10.10.2024) GTK Geoenergiapäivät. VTT: Lämmönvarastointi tulevaisuuden kaukolämpöverkossa.
- Meriläinen, A., Kosonen, A., Jokisalo, J., Kosonen, R., Kauranen, P., & Ahola, J. (2024). Techno-economic evaluation of waste heat recovery from an off-grid alkaline water electrolyzer plant and its application in a district heating network in Finland. *Energy*, 306, 132181. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132181>
- Meriläinen, A., Kosonen, A., Jokisalo, J., Kosonen, R., Kauranen, P., & Ahola, J. (2024). Techno-economic evaluation of waste heat recovery from an off-grid alkaline water electrolyzer plant and its application in a district heating network in Finland. *Energy*, 306, 132181. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132181>
- Parat. (2022) Tampereen Sähkölaitos. Asennus käyttö ja kunnossapito 45MW Elektrodikattilalaitos. Dok. nro: 421765
- Polar Night Energy. (2025). Noudettu 24.02.2025 osoitteesta: <https://polarnightenergy.com/about-us/>
- Renewable Energy Agency, I. (2020) S. 53. *INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY STORAGE About IRENA*. www.irena.org
- Renewable Energy Agency, I. (2020) S. 75. *INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY STORAGE About IRENA*. www.irena.org
- Salhoja, P. (2025). Business Intelligence Expert. Tampereen Energia. Haastattelu 06.02.2025

Swante W.M & Åberg. M., (2023) Potential to balance load variability, induced by renewable power, using rock cavern thermal energy storage, heat pumps, and combined heat and power in Sweden.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121210>

Tammervoima. Hyötyvoimalaitos. Noudettu 19.12.2024 osoitteesta <https://tammervoima.fi/voimalaitos/>

Toiva, O. (2017) Tampereen Sähkölaitos 130 vuotta kaarilampusta lämmitysmarkkinoille. Tampereen sähkölaitos Oy. ISBN 978-952-93-8728-1

Trygg, P. (2025). Sales Manager. Polar Night Energy. Haastattelu 21.02.2025

Vatajankoski. (2025). Noudettu 01.03.2025 osoitteesta: <https://www.vatajankoski.fi/innovaatiot/hiekka-akku/>

Veli-Petteri Liedes, D. (2023). *Kaukolämmön kysynnän mallinnus Suomessa*.

Xiang, Y., Xie, Z., Furbo, S., Wang, D., Gao, M., & Fan, J. (2022). A comprehensive review on pit thermal energy storage: Technical elements, numerical approaches and recent applications. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 55). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105716>

LIITTEET

LIITE 1 Kyselytutkimus

1. Mikä on nimesi?

Kirjoita vastaus

2. Mitä yhtiötä edustat ja mikä on tittelisi yhtiössäsi?

Kirjoita vastaus

3. Paljonko kaukolämpöverkkonne huipputehon (MW) mitoitusarve on?

Kirjoita vastaus

4. Minkälaisia lämpöenergiavarastoja yrityksellänne on käytössä?

- Kaukolämpöakku (terässäiliö)
- Kallioluolalämpövarasto (entinen öljyvarasto)
- Kallioluolalämpövarasto (uusi projekti)
- Hiekka-akku (terässäiliö)
- Hiekkakuoppavarasto (PIT TES)
- Porakaivolämpöakku (BTES)
- Muu, mikä?
- Ei lämpövarastoa käytössä

5. Kuinka hyvin lämpövarasto on vastannut odotuksia? Vastaa suurimman varaston mukaan, mikäli käytössä useampia.

	0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	80-100%
Tavoitemitoituksen saavuttaminen energiamäärän suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Hankinnan kustannusten suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lataus ja purkutehon suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lämpöhäviöiden suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
CO ₂ päästöjen vähentämisen suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Yleisesti ottaen käytön kannattavuuden suhteen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. Millainen haarukka lataus- ja purkutehoille lämpövarastosta teidän järjestelmässänne on?

Kirjoita vastaus

7. Oletteko aikeissa hankkia lämpöenergiavarastoja/lisää varastoja, jos niin minkä tyyppisiä?

- Kaukolämpöakku (terässäiliö)
- Kallioluolalämpövarasto (entinen öljyvarasto)
- Kallioluolalämpövarasto (uusi projekti)
- Hiekka-akku (terässäiliö)
- Hiekkakuoppavarasto (PIT TES)
- Porakaivolämpöakku (BTES)
- Muu, mikä?
- Ei aikeita hankkia

8. Kuinka suuri lämpövarastoinnin kapasiteetin pitäisi omassa järjestelmässänne mielestänne olla?

	0,1 GWh	1 GWh	5 GWh	10 GWh	50 GWh	75 GWh	+100 GWh
Kapasiteetti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

...

9. Kuinka tärkeänä näette lämmön pitkäaikaisen varastoinnin modernissa kaukolämpöjärjestelmässä? (Viikotason tai yli)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

10. Vapaa sana. Kerro halutessasi ajatuksistasi lämpöenergian varastointiin liittyen kaukolämpöverkoissa.

Kirjoita vastaus