



ENERGIAVARASTOT UUSIUTUVIEN ENERGIALÄHTEIDEN EKOSYSTEEMISSÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikan koulutusohjelma diplomityö

2023

Lassi Onne

Tarkastajat: Professori Tero Tynjälä

TkT Eero Inkeri

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Lassi Onne

Energy storages in renewable energy ecosystem

Master's thesis

2023

55 pages, 24 figures and 13 tables

Examiners: Professor, Tero Tynjälä
D.Sc. Eero Inkeri

Keywords: Energy Storage, Energy ecosystem, Windpower, Photovoltaic power, Renewable energy

The master's thesis aims to model the energy use of the Vierumäki industrial area in its current form and a possible energy ecosystem based on renewable energy sources. Potential energy sources that could be installed in the area are wind and solar power.

In the work, four different scenarios are modelled, which deal with different energy storage entities and create a model of current situation. In the model of the current situation, there is nothing but heat production in the area and all electricity is imported from the grid. In the first scenario, 100 % of the region's energy needs are produced with wind and solar power together with energy storages. In the second scenario, the same amount of wind and solar power is utilized, but the ecosystem does not install energy storage. In the third scenario, 100 % of the energy is renewable and methane is also produced. Hydrogen also needs to be produced for methane. In the fourth scenario, methane is produced, but there is no separate energy storage in the ecosystem.

As a result of the study, wind and solar energy production in the area would be very profitable. Covering current consumption with renewables and energy storage would be cheaper than grid electricity in the current situation.

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Lassi Onne

Energiavarastot uusiutuvien energialähteiden ekosysteemissä

Diplomityö

2023

55 sivua, 24 kuvaa ja 13 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Tero Tynjälä
TkT Eero Inkeri

Avainsanat: Energiavarastot, Energiaekosysteemi, Tuulivoima, Aurinkovoima, Uusiutuva Energia

Diplomityön tavoitteena on mallintaa Vierumäen teollisuusalueen energiakäyttö nykyisessä muodossaan ja mahdollisen uusiutuviin energialähteisiin pohjautuvassa energiaekosysteemissä. Mahdollisia energialähteitä, joita alueille voisi asentaa ovat tuuli- ja aurinkovoima.

Työssä mallinnetaan 4 erilaista skenaariota, joissa käsitellään erilaisia energian varastointikonaisuuksia ja muodostetaan verrokkutilanne, jossa ei ole sähköenergialle varastoa. Alkuperäisen tilanteen mallissa ei ole muuta kuin lämmöntuotantoa alueella ja kaikki sähkö tuodaan kantaverkosta. Ensimmäisessä skenaariossa tuuli- ja aurinkovoimalla tuotetaan 100 % alueen energiatarpeesta yhdessä energiavarastojen kanssa. Toisessa skenaariossa on sama määrä tuuli- ja aurinkovoimaa, mutta ekosysteemin ei asenneta energiavarastoja. Kolmannessa skenaariossa 100 % energiasta tuotetaan uusiutuvilla ja tuotetaan lisäksi metaania. Metaania varten tarvitsee tuottaa myös vetyä. Neljännessä skenaariossa tuotetaan metaania, mutta ekosysteemissä ei ole erillistä energian varastointia.

Tutkimuksen tuloksena tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto alueella olisi erittäin kannattavaa. Nykyisen kulutuksen kattaminen uusiutuvilla ja energiavarastoilla olisi halvempaa, kuin verkkosähkö alkuperäisessä tilanteessa. Kuitenkin lämmön tuotanto vain uusiutuvilla ja sähköllä olisi kalliimpaa ilman nykyistä lämpölaitosta, joka ei ole suoraan riippuvainen sähkön hinnasta.

KIITOKSET

”Älä kieltäydy mistään uuden kokeilusta, äläkä sano ei.”Tuolla asenteella aloitin yliopisto-urani lappeen Rannoilla. Aina kaikki ei mennyt suunnitelmien mukaan, ja saatettiin maksaa kovaa hintaa yöunilla. Ikinä ei tiennyt, mihin ilta johtaa, kun astui ovesta ulos Skinnarilassa. Parhaimmat ja hauskimmat tapaukset usein ilmaantuivat eteen yllättäen.

Annoinkin mielestäni kaikkeni tälle yhteisölle ja sain silti moninkertaisesti takaisin. Uusia ystäviä loppuelämäksi, tarinoina, oppeja elämään ja DI-tutkinnon. Jos joku olisi kertonut, millaisia kokemuksia saan opiskeluaikana, en olisi uskonut puoliakaan. Jos yrittäisin kertoa tarinaa kaikesta, tarinaa olisi vaikea uskoa todeksi. Toivottavasti matka jatkuu yhtä mielenkiintoisena kuin tähänkin asti.

Erityiskiitos Tero Tynjälälle ja Eero Inkerille, jotka mahdollistivat minulle itse ideoimani aiheen toteuttamisen. Ensimmäistä kertaa ensimmäisen korona-aallon jälkeen opiskelu oli taas mielekästä ja kiinnostavaa.

Kiitos Skinnarila. Olipahan seikkailu

lappeen Rannoilla

Lassi Onne

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

E	Energia	[MWh]
n	ainemäärä	[kmol]
m	massa	[kg]
M	Moolimassa	[kg/kmol]
P	teho	[MW]

Kreikkalaiset

η	hyötysuhde	[%]
--------	------------	-----

Lyhenteet

A-CAES	Adiabaattinen paineilmaparasto (engl. Adiabatic Compressed Air Energy Storage)
AEC	Alkali elektrolyysi (engl. Alkaline Electrolysis Cell)
CAES	Paineilmavarasto (engl. Compressed Air Energy Storage)
LAES	Nesteytetty paineilmanvarasto (engl. Liquid Air Energy Storage)
OEMOF	engl. Open Energy Modelling Framework
ORC	Orgaaninen Rankine kierto (engl. Organic Rankine Cycle)
P2X	Power-to-X
PEM	Polymeeri elektrolyysi (engl. Polymer Electrolyte Membrane)
SOEC	Kiinteäoksidi elektrolyysi (engl. solid oxide electrolysis cell)

Sisällysluettelo

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	7
2	Energiavarastot	8
2.1	Paineilmavarastot	9
2.2	Sähköakku	11
2.3	Power-to-X- teknologiat	12
2.3.1	Vety	12
2.3.2	Metaani	15
2.4	Lämpöakku	16
2.5	Varastojen yhteenveto	18
3	Mallinnusmenetelmät	19
3.1	Mallinnustyökalut	19
3.2	Aikaisemmat tutkimukset	20
3.3	Mallinnustyökalun valinta	21
4	Kohteen esittely	22
5	Mallinnus	24
5.1	Alkuperäinen tilanne	24
5.2	Skenaarioiden esittely	27
5.3	Skenaario 1. 100 % uusiutuvalla energialla	28
5.4	Skenaario 2. uusiutuvilla mahdollisimman paljon ilman akkuja	34
5.5	Skenaario 3. 100 % uusiutuvilla ja metaanin tuotantoa	36
5.6	Skenaario 4. uusiutuvilla mahdollisimman paljon ja metaanin tuotantoa	41
6	Vertailu	44
7	Johtopäätökset	46
8	Yhteenveto	48
	Lähteet	49

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on jo aiheuttanut jo merkittäviä muutoksia maapallolla. Viikoittain voi lukea YLE:n uutisista ilmastonmuutoksesta aiheutuneista ongelmista. Samalla maat kilpailevat ilmastonmuutosta vastaan yrittämällä vähentää ilmastonmuutosta kiihdyttäviä päästöjä, kuten metaania ja hiilidioksidia. Suomellakin on tavoitteena pysyä IPCC:n (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 1,5 °C tavoitteessa. (Ympäristöministeriö 2022)

Säätövoiman määrä on merkittävästi vähentynyt ja uusiutuvat energialähteet aiheuttavat haasteita niiden tehon vuorokausivaihteluilla. Tuulivoimalat ovat yksi suurimmista uusiutuvista energialähteistä Suomessa. Ainoastaan vesivoiman tuotanto ylittää tuulivoimaloiden tuotannon (Tilastokeskus 2023). Tuulivoiman tuotanto vaihtelee suuresti vuorokausien ja vuodenaikojen välillä, samoin kuin aurinkoenergian tuotanto. Aurinko- ja tuulivoiman tuotannon vaihtelut vaikeuttavat tasapainon ylläpitämistä energiaverkossa.

Yksi mahdollinen ratkaisu uusiutuvien energialähteiden tuotannon vaihteluille olisivat energiavarastot. Tämän diplomityön tavoitteena onkin tutkia erilaisia energiavarastoja ja niiden yhdistämistä tuulivoimalan ja aurinkovoimalan kanssa, tasapainottaa energiantuotanto lopputuotantokäyttäjien kulutuksen kanssa ja taloudellinen kannattavuus. Työssä keskitytään tarkastelemaan lähimpänä tai jo massatuotannossa olevia energiavarastoja. Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan niiden vaikutusta tuulivoimaloiden, aurinkovoimaloiden ja energiavarastojen taloudelliseen kannattavuuteen.

Diplomityön tavoitteena on mallintaa Vierumäen teollisuusalueen nykyinen energiankulutus osana Päijät-Hämeen liiton käsittelemää hanketta ”Siirtymä uusiutuvan energian ja resurssitehokkuuden hiilineutraaleihin ekosysteemeihin”. Diplomityössä myös vertaillaan tilanteeseen, jossa alueelle rakennetaan runsaasti uusiutuvaa energiaa, energiavarastoja ja power-to-X-teknologioita, eli teknologioita, joilla muunnetaan uusiutuvaa energiaa polttoaineiksi, kaasuiksi tai kemikaaleiksi.

Diplomityössä mallinnetaan uusiutuvien energialähteiden ja sen käyttäjien muodostamaa energiaekosysteemiä. Ekosysteemin mallintamista varten selvitetään eri mallinnustyökalujen mahdollisuudet ja heikkoudet. Selvityksen perusteella valitaan työhön parhaiten soveltuva mallinnustyökalu. Ekosysteemiä tarkastellaan sen jälkeen taloudelliselta kannattavuudeltaan. Kannattavuutta tutkitaan kannattavuuslaskelmin, joissa esitellään arvioidut tulot, menot ja laitoksen investointikustannukset.

2 Energiavarastot

Energiaa on varastoitu jo tuhansia vuosia. Ensimmäisiä muutaman voltin paristoja on ollut jo muinaisessa Persiassa. Niissä kuitenkin jännitteet olivat vain 1 – 2 voltin luokkaa (Danila 2010). Ihmiset ovatkin halunneet pitkään saada energiaa varastoitua. Ensin varastoitiin polttoaineita, joita oli helppo siirtää ja kuljettaa, esimerkiksi puuta ja hiiltä, joiden avulla voi tuottaa lämpöä ja sähköä (NV5 2022). Ensimmäiset tieteelliset tutkimukset sähköstä tehtiin vasta 1700-luvulla, jonka jälkeen 1900-luvulla kehiteltiin tapoja varastoida sähköä (Danila 2010).

Nykyään energiaa pyritään varastoimaan, joko sähkönä, polttoaineena, mekaanisena tai lämpöenergiana. Tavoitteena on saada varastoitua energiaa silloin, kun uusiutuvilla energialähteillä saa tuotettua paljon energiaa. Uusiutuvilla energialähteillä aurinko- ja tuulivoimalla on ongelmana niiden jaksottaisuus ja tehon heikko ennustettavuus. On hyvin vaikeaa ennustaa tuuleeko jonain tiettyinä päivinä vai ei, tai paistaako aurinko vai onko pilvistä. Näiden ongelmien takia uusiutuvien energialähteiden yhteyteen olisi houkuttelevaa saada energiavarastojakin, jolloin hyvinä päivinä ylimääräistä energiaa johdettaisiin varastoihin. Näin energiaa olisi käytettävissä myös niinä päivinä, kun uusiutuvilla energialähteillä ei saa tuotettua tarvittavaa määrää energiaa.

Ilmastonmuutoksen hidastamisen ja pysäyttämisen vaatimuksena on energiasektorilla luopua fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Fossiilisia polttoaineita käyttävät laitokset ovat toimineet myös säätövoimana sähköverkoissa (IAEA 2019). Uusiutuvat energialähteet eivät pysty toimimaan yksinään säätövoimana, mikä on lisännyt energiavarastojen houkuttelevuutta. Energiavarastojen ja uusiutuvien energialähteiden yhdistämisen jälkeen ekosysteemi voisi toimia säätövoimana sähköverkossa, joustavana kulutuksena tai energialähteenä prosesseille.

Energiaa voidaan varastoida kaikissa mahdollisissa muodoissa, lämpönä-, mekaanisena ja kemiallisena energiana. Kaikki ovat toimivia vaihtoehtoja ja kaikille on omat tilanteet, milloin ne ovat parhaimpia mihinkin sovellukseen. Useimmiten energiaa varastoidessa sähkö muutetaan varastoitavaksi energiaksi. Lämpövarastoja on myös mahdollista ladata ylimääräisellä lämpöenergialla, jolloin varastoon vain ajetaan ylimääräinen lämpö. (Ibrahim et al. 2008)

Sähkö voidaan varastoida useilla eri tavoilla esimerkiksi akkuihin, jolloin sähkö muutetaan kemialliseksi energiaksi akkukennoihin, mekaaniseksi energiaksi vauhtipyörään tai pumpaamalla vettä takaisin patoaltaaseen. Myös ilmaa voidaan pumpata säilöön ja säilöttyä paineilmaa voidaan käyttää energiavarastona. Näissä järjestelmissä ilmaa pumpataan yleensä suuriin luonnon muovaamiin onkaloihin ja tyhjiin kaivoksiin. Kun varastosta halutaan saada

energiaa ulos, johdetaan paineilma turbiinin lävitse, jolloin saadaan energia takaisin sähköksi. Ilmaa voidaan muutenkin hyödyntää energiavarastoissa. Toinen vaihtoehto on paineistaa ilmaa enemmän ja jäädyttää se nestemäiseen olomuotoon, jolloin ei tarvita yhtä suurta tilavuutta painesäiliöltä. (CTCN 2023)

Energiavarastoja on monia erilaisia ja niitä voidaankin käyttää erilaisissa sovelluksissa. Kevyitä ja energiatiheitä ratkaisuja tarvitaan tieliikenteessä ja tulevaisuudessa ilmailussa. Niissä tavoitteena on saada mahdollisimman paljon energiaa mahdollisimman pieneen ja kevyeen varastoon. Toisesta ääripäästä taas löytyy sähköverkon varastot esimerkiksi pumppuvarasto, jossa alajuoksulta pumpataan vettä takaisin patoaltaaseen (Divya et al. 2009).

Tässä työssä keskitytään tarkemmin sähköakkuihin, paineilma-varastoihin, vetyjärjestelmiin, metaanin tuotantoon ja lämpöakkuihin. Näihin pureudutaan hieman syvällisemmin, koska alustavan kartoituksen pohjalta edellä mainitut vaikuttivat parhaimmilla vaihtoehdoilta yhdistettäväksi uusiutuvien energialähteiden kanssa. Tavoitteena on selvittää, minkälainen energiavarastointijärjestelmä kannattaa yhdistää uusiutuvien energialähteiden muodostamaan energiaekosysteemiin.

2.1 Paineilmavarastot

Paineilmavarastot (engl. compressed air energy storage, CAES) ja nesteytetyn ilman varastot (engl. liquid air energy storage, LAES) ovat mekaanisia varastoja, jotka perustuvat ilman paineistamiseen. Paineilmavarastojen tekniikka perustuu pitkälti jo hyvin tunnettuun kaasuturbiinitekniikkaan. Kaasuturbiineissa kompressori paineistaa ilmaa, joka kuumennetaan ja vapautetaan turbiinin lävitse tuottaen energiaa. Paineilmavarastossa kompressori puristaa ilmaa säiliöön, josta se vapautetaan tarvittaessa. Kaasuturbiinilaitoksissa sekä paineilma-varastoissa molemmissa tehon tuotto perustuu ilman puristukseen ja sen paisumiseen. Paineilmavarastoissa paineistettu ilma pitää lämmittää ennen turbiinia. Lämmitys tapahtuu polttokammiossa, jossa paineistettu ilma reagoi polttoaineen kanssa. Kaasuturbiinilaitoksissa molemmat puristus ja paisunta tapahtuvat yhtä aikaa ja paineilmalaitoksissa puristus ja paisunta ovat erilliset prosessit. Tavallisimmin käytetään maa- tai biokaasua mutta muutkin neste- tai kaasumaiset polttoaineet ovat mahdollisia. Polttamisen lisäksi erityisesti fossiilisten polttamista pitää pyrkiä välttämään, joten biokaasun lisäksi voidaan käyttää muita biopohjaisia tai esim. vedystä johdettuja polttoaineita. (J. Wang et al. 2017) Koska polttamista halutaan vähentää, niin on myös kehitetty adiabaattinen paineilma-varasto (A-CAES, engl. Adiabatic Compressed Air Energy Storage). A-CAES:in tavoitteena on päästä eroon varastojen riippuvaisuudesta suhteesta polttamisen hiilidioksidipäästöihin. A-CAES-järjestelmissä kompressoreiden hukkalämpöä varastoidaan ja palautetaan takaisin, jolloin ei tarvita erillistä polttokammiota. (Jubeh et al. 2012)

LAES järjestelmässä ilmaa paineistetaan ja viilennetään niin paljon, että ilma muuttuu nesteeksi. Kun varastosta halutaan energiaa ulos, nesteytetty ilmaa lämmitetään, jolloin ilma kaasuuntuu. Kuuma paineistettu ilma syötetään turbiinille, jossa paisuminen muutetaan kiineettiseksi energiaksi, jonka generaattori muuttaa lopulta sähköksi.

LAES-järjestelmissä ongelmina ovat kylmävarastot ja niiden hyödyntäminen. Ensimmäinen pilottihanke alkoi 2008 ja se saavutti vain 8 % kokonaishyötysuhteen sähköstä sähköksi. Pilottihankeen tutkimuksissa huomattiin kuitenkin jo merkittäviä puutteita laitoksessa. Merkittävimpinä puutteina olivat kylmäenergian käytön vähyys ja liian alhaiset paineet järjestelmässä. Projektissa kuitenkin tavoitteena oli vain todistaa LAES-järjestelmän toimivuus ja mahdollisuus suuren kokoluokan varastoon. Hankkeen tuloksissa arvioitiin suuren kokoluokan järjestelmän saavuttavan lähes 60 % kokonaishyötysuhteen. (Morgan et al. 2015)

A-CAES ja CAES-järjestelmien hyödyt ovat suhteellisen halpa energian hinta verrattuna muihin energiavarastoihin. Maanalaisen CAES-järjestelmän investointikustannus (92 €/kWh) kilowattituntia kohden on halvempi kuin mikään muu sähköenergian varastointimuoto. Jos CAES-järjestelmää ei voida sijoittaa maan alle, niin veden pumppulaitosten ja muutamien akkutyypin investointikustannukset ovat samaa suuruusluokkaa (Zakeri et al. 2016). Paineilmavarastojen hyötysuhde on noin 40 - 70 % (He et al. 2018). Taulukkoon 1 on listattu paineilmavarastojen keskeisimpiä tunnuslukuja.

Kaupallisia A-CAES ja LAES-järjestelmiä on vasta muutamia valmistunut, mutta monia on pitkällä rakennusvaiheessa ja pitäisi käynnistyä muutamien vuosien sisään. Kiinassa on 200-300 MWh A-CAES-varasto rakenteilla (King et al. 2021) ja 300 MWh LAES-varaston pitäisi käynnistyä Iso-Britanniassa 2025 mennessä. Tutkimuksia on tehty aktiivisesti niiden hiilidioksidivapaan energiavarastoinnin potentiaalin vuoksi. Tutkimuksissa on LAES-järjestelmillä päästy yli 60 % hyötysuhteisiin hyödyntämällä orgaanista Rankine prosessia (ORC) (Peng et al. 2018).

Edellä mainituista tekniikoista keskityn tässä työssä vain A-CAES ja LAES-järjestelmiin, joissa ei tarvita polttokammiota energian tuottamiseen.

Taulukko 1. Paineilmavarastojen tunnuslukuja. (Vecchi et al. 2021, He et al. 2018, Morgan et al. 2015, Zakeri et al. 2016 ja King et al. 2021)

Paineilmavarastot			
	CAES	A-CAES	LAES
Investointikustannukset	48-278 €/kWh	62- 390 €/kWh	300-1000 €/kWh
Hyötysuhde	40-55 %	48-70 %	40-70 %
Energiatiheys	0.5-20 Wh/l	0.5-20 Wh/l	50-200 Wh/l
Asennettu kapasiteetti maailmalla	3440 MWh	10 MWh	15 MWh (300 MWh*)
* Rakenteilla oleva kapasiteetti maailmalla			

2.2 Sähköakku

Sähköakkuja on eri tyyppisiä, esimerkiksi lyijy-, venttiilisäädetyt lyijy-, natriumrikki (NaS), metalli-ilma- ja virtausakkuja. Käytetyin akkutyyppi on litiumioniakku. (Divya et al. 2009) Litiumakut koostuvat aina yksittäisistä kennoista, joita sarjaan kytkemällä saadaan haluttu jännitetaso saavutettua. Näitä moduuleja yhdistämällä rinnan ja sarjaan saadaan luotua haluttu kapasiteetti ja purkuteho. (Hesse et al. 2017)

Suosituimpia akkutyyppisiä on lyijy-, litium-, virtaus- ja NaS-akut. Näistä kuitenkin litiumakuilla on suurin potentiaali tilanteissa, joissa vaaditaan suurta energiatiheyttä. Litiumakuilla on suuri energiatiheys ja energian varastointihyötysuhde erittäin korkea, lähes 100 %. Virtausakut ovat myös mahdollinen vaihtoehto, kun tarvitaan pitkää varastointiaikaa ja suurta tehoa. Suuri teho on kuitenkin saavutettavissa vain kooltaan suurilla säiliöillä ja järjestelmillä (Divya et al. 2009)

NaS akuissa negatiivisena elektrodina toimii nestemäinen natrium ja positiivisena elektrodina nestemäinen rikki. Jotta molemmat pysyisivät nestemäisinä, pitää akkupaketin sisälämpö olla yli 300 °C lämpötilassa. NaS akkujen ongelmana onkin tarvittava lämpötila. Kuitenkin NaS akuilla on erittäin hyvä hyötysuhde, yleensä noin 89 %. NaS akkuja onkin käytössä melkein kahdessa sadassa laitoksessa eripuolilla Japania. Japanissa NaS akkuja käytetään tasapainottamaan maan sähköverkkoa huippukulutuksen aikana. (ESA 2023)

Virtausakkujen toiminta perustuu metallien ionien vaihtoon. Metallit ovat liuotettuina elektrolyytissä ja toisin kuin litiumakuissa, elektrolyytin ja metallien hapettuminen ei ole eksoterminen reaktio. Tästä tulee monia virtausakun hyötyjä. Neste ei ole paloherkkää ja auttaa myös akkujen jäähdyttämisessä.

Tässä diplomityössä mallinnuksessa keskitytään litiumakkuihin, koska niiden hinta, teknologinen valmius ja hyötysuhde ovat vielä parempia kuin muiden verrokkien. Näiden akkujen ominaisluvut löytyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. Sähköakkujen ominaislukuja (Divya et al. 2009)

	Litium	NaS	Virtausakku
Investointikustannus	362 €/kWh	669 €/kWh	650 €/kWh
TRL	9	9	8
Elinkaari	10 a	13.5 a	15 a
Hyötysuhde	86 %	75 %	67.5 %

2.3 Power-to-X- teknologiat

Power-to-X- teknologioiden (P2X) avulla voidaan luoda polttoaineita yksinkertaisten ja tavallisten lähtöaineiden avulla. P2X on yläkäsite kaikille teknologioille, joissa energiaa käyttämällä yksinkertaisesta perusraaka-aineesta saadaan tuotettua polttoainetta, nestettä, kemikaaleja ja kaasua (H2 2019). Vedestä saadaan tuotettua elektrolyysillä vetyä. Vedystä ja hiilidioksidista voidaan valmistaa erilaisia hiilivetyjä, esimerkiksi metaania. Vety ja metaani toimivat sellaisenaan jo joidenkin autojen polttoaineena. Tulevaisuudessa kestävästi valmistetun metaanin ja vedyn käyttö lisääntyy. Euroopan komission tavoitteenakin on tukea vedyn tuotantoa ja saada 6 GW lisää tuotantokapasiteettia uusiutuvilla tuotettuun vetyyn vuoteen 2024 mennessä ja vähintään 40 GW vuoteen 2030 mennessä (European Commission 2020). Uusiutuvalla metaanilla voidaan korvata maakaasulaitoksia ja niiden tuottamia hiilidioksidipäästöjä.

2.3.1 Vety

Vedyn tuottamiseen on useita eri vaihtoehtoja. Kaikki vaihtoehdot voidaan jakaa kolmeen kategoriaan niiden lähtöaineiden perusteella, fossiilisista polttoaineista johdettuihin, vedestä eroteltuihin ja biomassasta johdettuihin prosesseihin. Näistä vaihtoehdoista vedestä erottamisen tekniikka on hyvin tunnettua, mutta kalliimpaa verrattuna biomassasta ja fossiilisista lähteistä erottamiseen. Vuonna 2014 96 % maailman vedystä valmistettiin fossiilisista polttoaineista. (Z. Wang et al. 2014)

Vedyn tuotantomuodoista vain elektrolyysi sisältyy P2X- teknologioihin. Biomassasta ja fossiilisista lähteistä eroteltu vety ei suoraan sisälly P2X:ään, koska niissä sähköllä ei suoraan valmisteta polttoainetta tai muutakaan tuotetta. OTH Regensburg yliopiston professori Michael Sterner määritteli P2X-teknologiat näin: ”Ne keinot, jotka muuntavat sähkön energian kuljettajaksi, lämmöksi, kylmäksi, tuotteeksi tai raaka-aineeksi. Se on yläkäsite erilaisille tavoille tuottaa energiaa, kuten power-to-gas, power-to-liquid, power-to-fuel, power-to-chemical ja power-to-heat.” (H2 2019) Sternerin määritelmä P2X- teknologiosta jättää siis orgaanisista ja fossiilisista lähteistä eroteltavat polttoaineet pois, koska niissä ei suoraan muuteta sähköenergiaa vedyksi.

Elektrolyysissä vesimolekyylit hajotetaan sähkövirran avulla ja vesimolekyylit hajoaa kahdeksi vetyatomiksi ja yhdeksi happiatomiksi. Elektrolyysissä on perinteisesti vedessä positiivisesti varattu anodi ja negatiivisesti varattu katodi. Vetyä ja happea muodostuu anodin ja katodin pintaan. Kuplien kasvaessa ne irtoavat anodin ja katodin pinnasta ja nousevat vedestä, josta ne kaasuna kerätään (Z. Wang et al. 2014). Elektrolyysin etuna muihin vastaaviin on 99 % kaasun puhtaus ilman erillistä kaasun puhdistusta (Megia et al. 2021). Fossiilisista lähteistä saatava vetykaasu on vain noin 70 %:sesti vetyä (Erdem 2021). Elektrolyysin haittapuolena on ollut sen suurempi hinta verrattuna fossiilisista lähteistä saatavaan vetyyn. Jotta

elektrolyysillä valmistettu vety olisi saman hintaista kuin fossiilisista lähteistä saatava, niin tarvitsee maakaasun hinnan nousta tai elektrolyysin tai sähkön hinnan laskea. Vuonna 2022 maakaasun hinta pysyi keskimäärin riittävän korkealla, jotta elektrolyysillä tuotettu vety oli samanhintaista. (Nami et al. 2022). Tuuli- ja aurinkovoimaloiden lisääntyessä energian hinnan hetkelliset vaihtelut lisääntyvät. Kun tuulivoima tuottaa hyvin, niin Suomessa päästään jopa negatiiviseen sähkön hintaan, jolloin energian varastointi olisi erittäin kannattavaa.

Vedyn tuotannossa elektrolyysi voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan niiden tekniikoiden perusteella: alkalielektrolyysi (AEC), polymeeri elektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidi elektrolyysi (SOEC). Taulokossa 3 on esiteltyinä näiden elektrolyysikemien tunnuslukuja.

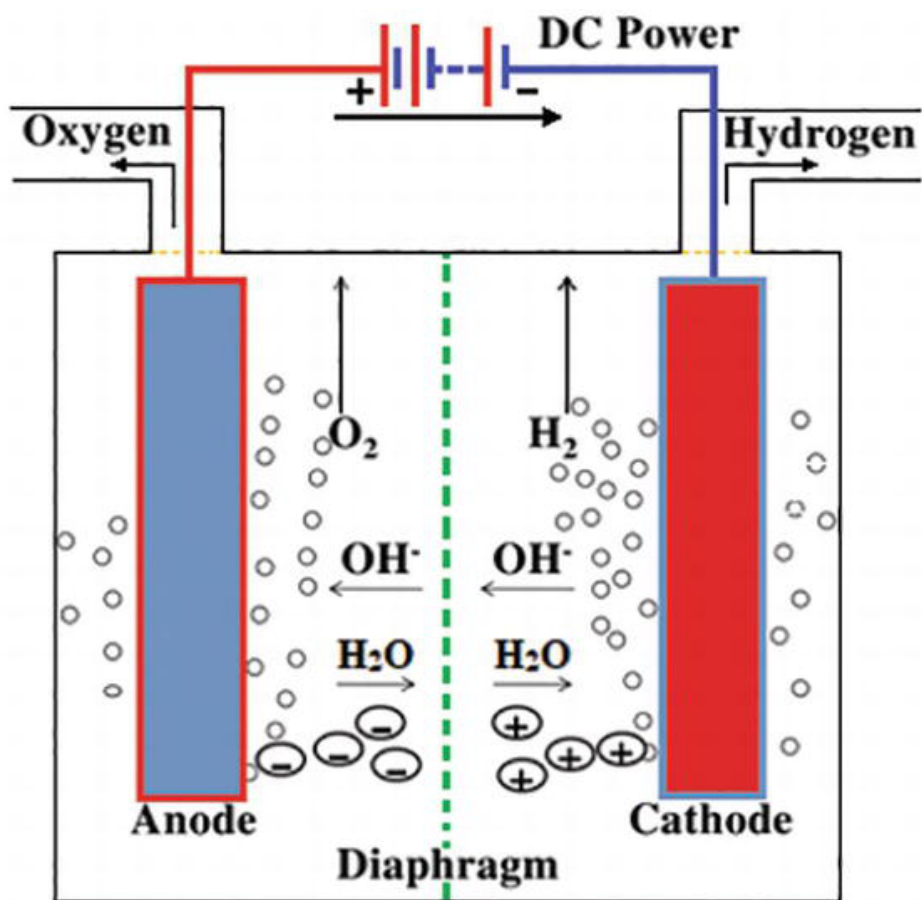
Taulukko 3. Elektrolyysikemien tunnuslukuja. (Zauner et al. 2019, Nasser et al. 2022, Tenhumberg et al. 2020 ja Bui et al. 2023)

Elektrolyysikemien			
	AEC	PEM	SOEC
Investointikustannukset suhteutettuna kemion tehoon	800-1500 €/kW	1400-2100 €/kW	2000-5000 €/kW
Kemion jännite	1,8-2,4 V	1,8-2,4 V	0,95-1,3V
Energiatiheys	0,25-0,45 A/cm ²	0,6-2 A/cm ²	0,3-1 A/cm ²
Minimiteho osakuormalla	>20%	>0 %	0 %
Hyötysuhde	62-82%	67-84%	noin 90%
Lämpötila	70-90°C	65-100°C	650-1000°C
Käyttöpaine	15-30 bar	2-10 bar	<30 bar

AEC:ssä on katodin ja anodin välissä kiinteä huokoinen kalvo, joka päästää elektronit lävitseen ja pitää muodostuneet kaasut erillään. AEC on hyvin tunnettua tekniikkaa. Ensimmäinen elektrolyysikoe tehtiin jo 1789 (Danila 2010). AEC:n heikkoutena on pieni virtatiheys, ositaiskuorman kestävyys ja matala käyttöpaine. Kuvassa 1 on esitettyinä yksinkertainen malli elektrolyysistä. Kuvasta nähdään kuinka happea muodostuu positiiviseen anodin pintaan ja vety negatiivisen katodin pintaan.

PEM:issä huokoinen kalvo päästää protoneita lävitseen. PEM ratkaisee monet AEC:n ongelmista, mutta tuo omat ongelmansa (Carmo et al. 2013). PEM elektrolyysin suurin ongelma on harvinaisten metallien saatavuus. Erityisesti iridiumin saatavuus aiheuttaa rajoitteita suurten mittakaavojen projekteissa, siksi PEM järjestelmät ovatkin alle 100 kW, kun taas AEC järjestelmät ovat teholuokalta huomattavasti suurempia. (Minke et al. 2021)

SOEC on huomattavasti uudempaa teknologiaa. SOEC:ssa katodi ja anodi ovat huokoisia materiaaleja ja ioneita johtava elektrolyytti on kiinteä (Ni et al. 2008). SOEC:in hyötyinä on erittäin korkea hyötysuhde, mahdollisuus hyödyntää prosessien hukkalämpöä ja kemion toiminta myös polttokennossa. Jos on saatavilla ylimääräistä ilmaista prosessihöyryä hukkalämpönä, niin SOEC on halvin tapa tuottaa vetyä. (Nami et al. 2022)



Kuva 1. Havainnekuva elektrolyysistä (Naimi et al. 2018)

2.3.2 Metaani

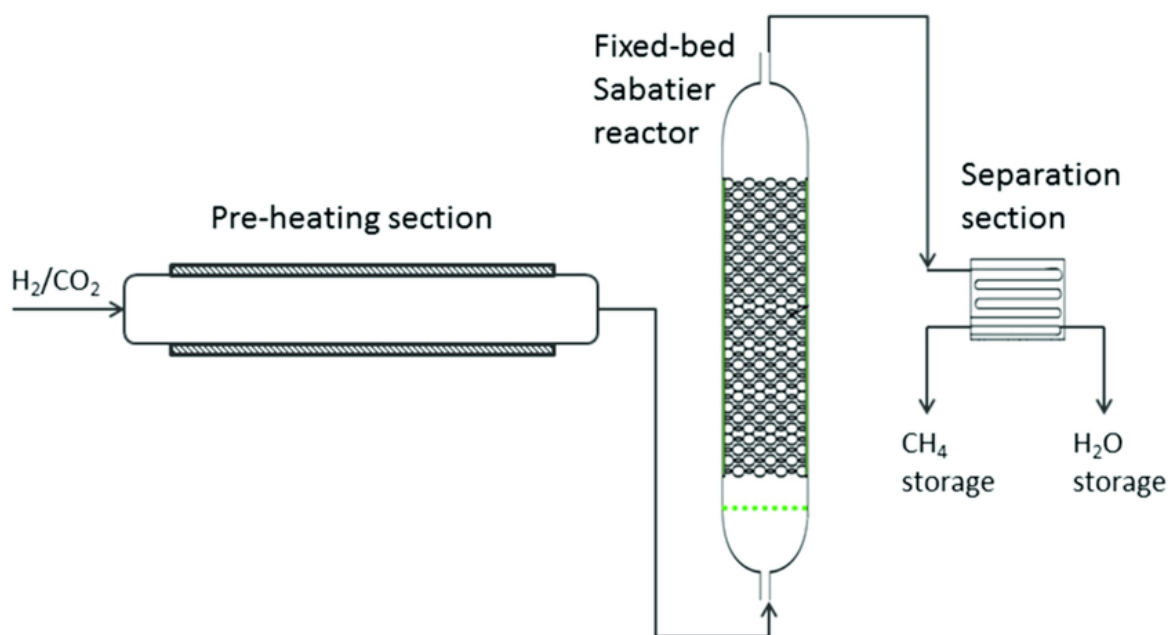
Metaania voidaan teollisessa mittakaavassa valmistaa katalyyttisen metanoinnin, biologisen metanoinnin, biokemiallisten prosessien tai lämpökemiallisten prosessien avulla. Metaanin muodostumista kuvaa Sabatier reaktio, joka on esitetty yhtälössä (1). Näistä katalyyttinen metanointi ja biologinen metanointi kuuluu P2X-teknologioihin, jotka kuuluvat tämän diplomityön aihealueeseen. Metaanin valmistus vedystä on houkuttelevaa sen helpomman varastoinnin vuoksi. (Jiang et al. 2022)



Metaanin syntetisoinnissa onkin päästöjen kannalta merkittävää, kuinka vety valmistetaan, tuotetaanko vety fossiilisista hiilivedyistä vai elektrolyysillä vedestä. Metaanin syntetisoinnin hyötysuhde on noin 70-80 % (Ajanovic et al. 2019). Uusiutuvilla energialähteillä ja elektrolyysillä valmistetulla vedellä on mahdollisuus päästä kokonaisuudessaan hyvin pieniin päästöihin. (Garcia-Garcia et al. 2021)

Metaanin syntetisoinnissa Sabatier-reaktiossa hiilidioksidi ja vety reagoivat keskenään katalyytin avulla. Reaktiossa muodostuu metaania ja vettä. Metaanin syntetisointi tapahtuu korkeassa paineessa ja 300-500 °C asteen lämpötilassa (Rönsch et al. 2016). Katalyytteinä reaktiossa voidaan käyttää nikkeliä, rutheniumia, rodiumia tai kobolttia. Yleisin käytettävä katalyytti on kuitenkin nikkeli sen saatavuuden ja hinnan vuoksi. Metaanin syntetisointi on eksoterminen reaktio, joka tuottaa paljon ylimääräistä lämpöä. Katalyyttisessä metanoinnissa lähtöaineiden on oltava puhtaita. Katalyyttinen metanointi ei siedä juurikaan epäpuhtauksia reaktiossa. (Götz et al. 2016) Kuvassa 2 on esiteltyä metanointi reaktori.

Biologisessa metaanisynteesissä mikro-organismit hajottavat hiilidioksidin ja muodostavat hiilidioksidista ja vedystä metaania. Mikro-organismit muodostavat metaania anaerobisessa ympäristössä. Metaania muodostuu 20-70 °C lämpötilassa (Götz et al. 2016). Optimaalinen lämpötila on kuitenkin 50 - 70 °C (Jiang et al. 2022). Biologisen metanoinnin hyödyt katalyyttiseen reaktioon ovat alhaisempi reaktiolämpötila ja reaktiopaine. Biologinen metanointi tapahtuu vesiliuoksen sisällä, jossa mikro-organismit kuluttavat vetyä ja hiilidioksidia tuottaen metaania. Biologinen metanointi sietää erittäin hyvin epäpuhtauksia reaktiossa. (Götz et al. 2016)



Kuva 2. Havainnekuva metanointireaktorista (Castellani et al. 2017)

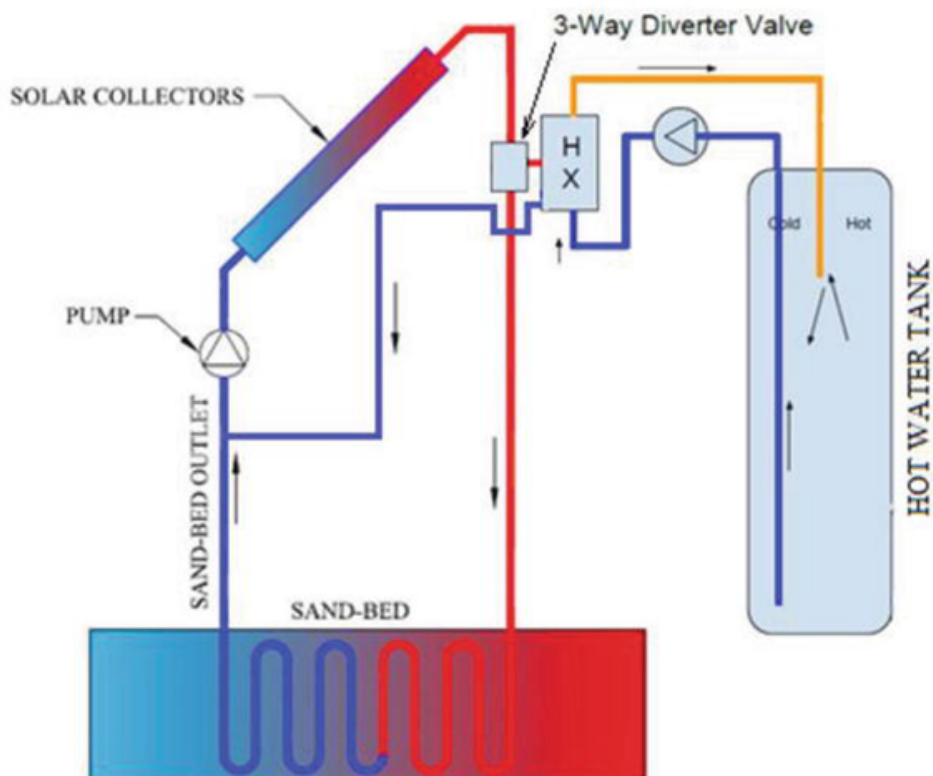
2.4 Lämpöakku

Lämpöakkujen ideana on säilöä ylimääräinen energia suoraan lämpönä, jolloin ei tarvitse muuntaa lämpöenergian muotoa. Tällöin energiavarastosta voidaan käyttää lämpö esimerkiksi suoraan kaukolämpöverkkoon tai tehtaissa prosessien lämmitykseen.

Akuissa väliaineeseen tuodaan energiaa, joka varastoidaan suoraan tuntuvana lämpönä, kemiallisena lämpönä tai faasimuutoksen avulla latenttina lämpönä. Esimerkiksi Polar Night Energy valmistaa hiekasta lämpövarastoja, jotka varastoivat tuntuvaa lämpöä (Polar Night Energy 2023). (Dincer et al. 2018) Kemiallinen lämpövarasto hyödyntää palautuvia kemiallisia reaktioita, jotka vapauttavat lämpöä reagoidessaan. (Mahon et al. 2022)

Kuva 3 esittää yksinkertaistettua versiota auringolla ladattavasta lämpöakusta. Siinä varastoidaan auringon energiaa tuntuvana energiana hiekkaan. Kuvan tapauksessa energiaa käytetään veden lämmittämiseen kuumavesivaraajassa.

Lämpöä varastoidessa väliaineena on mahdollista käyttää monia eri materiaaleja ja materiaaleilla saadaan säädettyä akun ominaispiirteitä. Materiaalivalinnalla saadaan säädettyä lämpötehoa, painoa ja lämpötilaa. Materiaalivalinnoilla voidaan räätälöidä akku sopimaan mahdollisimman hyvin kaikkiin tilanteisiin. Yleisesti käytössä ovat vesi, jonka hyötyjä on helppo saatavuus, korkea ominaislämpökapasiteetti ja hinta. Vedellä kuitenkin ongelmana on varauslämpötila. Vesi on pidettävä alle 100 °C tai paineistettava, jotta vesi ei höyrystyisi. Koska lämpövarastoista ei voi saada varastoon kuumempaa lämpöä ulos, rajaa veden maksi-



Kuva 3. Aurinkokeräin, joka varastoi energiaa hiekka-akkuun. (Hailu 2018)

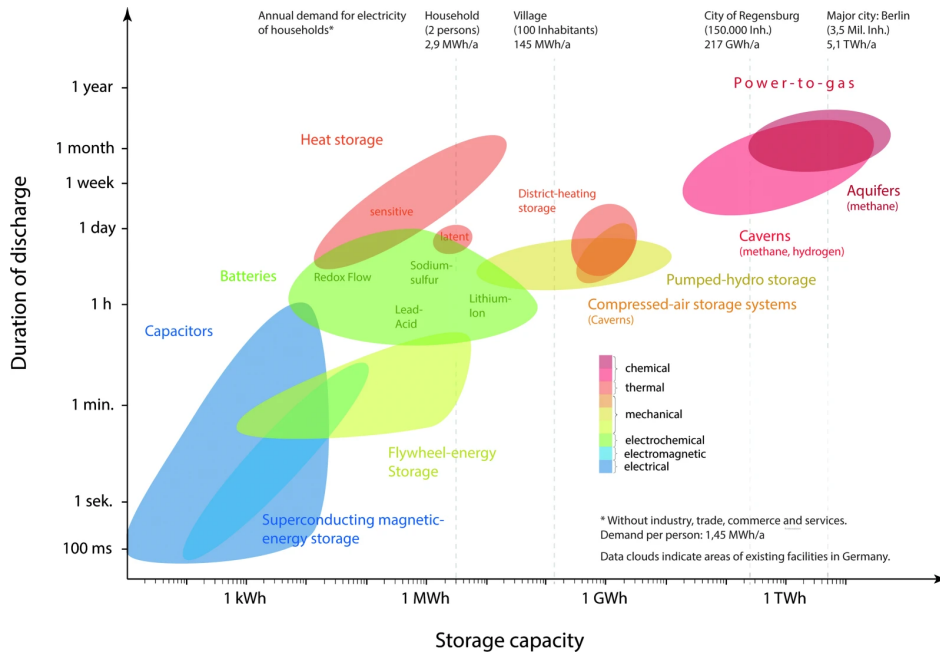
milämpötila monet käyttökohteet pois. Korkeamman lämpötilan avulla samaan tilavuuteen voidaan saada moninkerroin enemmän varastoitua energiaa. Esimerkiksi soraiseen maaperään voidaan varastoida huomattavasti korkeampaan lämpötilaan, jolloin lämpötilan muutos varastossa saadaan moninkertaiseksi veteen verrattuna. (Tiskatine et al. 2017)

Tuntuvan lämmön varastot ovat kaikista yleisimpiä. Tuntuvan energian lämpövarastojen houkuttelevuus johtuu myös osittain tekniikan yksinkertaisuudesta. Latentin lämmön varastoja on hieman vähemmän, mutta ne ovat yleistymässä sulan suolan tekniikan avulla. Kemialliset lämpövarastot eivät ole vielä päässeet kaupallisiksi sovelluksiksi sen korkean hinnan vuoksi. (Opolot et al. 2022)

Tutkimuksessa tullaan keskittymään vain tuntuvan lämmön varastoihin, kemiallisen energian- ja latentin lämpöenergian varastot jäävät tästä tutkimuksesta pois. Kemialliset ja latentin lämmön varastot ovat vasta prototyyppi- ja pilotointivaiheessa ja siksi ne jäävät tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Latentin energian varastot ovat kalliimpia ja sisältävät usein ihmiselle tai ympäristölle haitallisia aineita. Latentin energia varastot olisivat hyviä tilanteissa, joissa tarvittaisiin suurta energiatiheyttä. (Yang et al. 2021)

2.5 Varastojen yhteenveto

Kuvassa 4 on esiteltynä erilaisten varastotyyppien tyypilliset varastointiajat ja varastojen kapasiteetit. Työssä keskitytään tarkastelemaan ja vertailemaan muutamia teknologisesti kehittyneimpiä varastoja ja P2X-teknologioita. Tähän työhön valikoitui A-CAES, litiumakkukkenosto, AEC, tuntuvan lämmön varasto ja power-to-gas.



Kuva 4. Erilaisten energiavarastojen soveltuvuusalueet (Michael Sterner 2019)

3 Mallinnusmenetelmät

Mallinnusmenetelmiä on pääosin kahta eri lähestymistapaa, ylhäältä alas päin ja alhaalta ylös. Tavoissa eroavaisuutena on nimensä mukaisesti ongelman lähestymisuunta. Ylhäältä alaspäin malleissa aloitetaan ensin kokonaisuuden mallista, jota lohkotaan pienemmiksi helposti mallinnettaviksi paloiksi. Alhaalta ylöspäin mallit taas lähtevät yksittäisistä pienistä osista rakentamaan kokonaisuutta. (Engineering 2015)

Ylhäältä alas päin olevat mallit vaativat alussa enemmän tietoja ja ovat muutenkin työlämpiä tehdä, mutta myöhemmässä vaiheessa on helppo korjata tai muuttaa mallin rakennetta. Alhaalta ylös malleissa aloitusarvojen ja mallin luominen on nopeaa, mutta jos on oletettavissa paljon muutoksia itse mallin rakenteeseen käy alhaalta ylös malli työläämmäksi. (Engineering 2015)

Tässä työssä mallinnustavaksti valikoitui alhaalta ylöspäin tarkastelu, koska on oletettavissa, ettei mallin rakenne muutu merkittävästi tulevaisuudessa. Työssä on tärkeämpää saada alustavia malleja joustavasti vaihtelevilla tekniikoilla, jolloin alhaalta ylöspäin oleva malli soveltuu paremmin sen nopeuden vuoksi. (Engineering 2015)

3.1 Mallinnustyökalut

Uusiutuvien energialähteiden kannattavuutta voidaan mitata monilla eri tavoilla. Tärkeintä on vertailla monipuolisesti ja muistaa huomioida myös ympäristönäkökulma. Tutkimuksissa vaihtoehtoina on käyttää valmiita malleja tai luoda mallit itse. Itse tehtävissä malleissa työmäärä kasvaa nopeasti suureksi, koska tyhjästä mallin tekeminen on vaikeampaa kuin valmiiden työkalujen käyttäminen. Valmiissa mallinnustyökalussa ongelmana on sen joustavuus. Aina valmis malli ei välttämättä sovellu suoraan kyseessä olevan ongelman ratkaisuun ja saattaa olla vaikea tai työläs muuttaa. Esimerkiksi, jos malli ei osaa käsitellä ollenkaan energiavarastoja, saattaa olla helpompi tehdä karkea malli itse tai etsiä toinen malli, joka sisältäisi energiavarastot.

Valmiiden mallinnussovellusten avulla voidaan myös tehdä laskentaa ja ne pystyvät ratkaisemaan helpommin monimutkaisia malleja. Mallinnussovellusten soveltuvuutta energijärjestelmien mallinukseen on arvioitu aikaisemmin muutamissa tutkimuksissa. Esimerkiksi Lyden et al. (2018) artikkelissa vertailtiin vastaavaan projektiin 2018 saatavilla olevia mallinnustyökaluja. Artikkelin tuloksena 6 eri sovellusta saivat hyväksytyyn arvosanan. COMPOSE, DER-CAM, Energy-PRO, EnergyPLAN, MERIT ja MARKAL/TIMES. Sovelluksia on vertailtu myös yleisellä tasolla toisiinsa. Ringkjøb et al. (2018) tutkimuksessa esiteltiin arvoste-

lu 75 eri mallinnustyökalusta, joita kategorisoitiin tai jaoteltiin niille parhaimmin soveltuviin mallinnusongelmiin.

Ringkjøb et al. (2018) tutkimuksesta parhaimpina malleina erottuivat OEMOF (SOLPH), Calliope, TIMES, EnergyPLAN, Temoa ja PyPSA. Malleista OEMOF (SOLPH), Calliope, Temoa ja PyPSA ovat avoimen lähdekoodin mallinnustyökaluja ja kaikki ovat myös Python-pohjaisia. Suurimpina eroina kaikilla malleilla ovat niiden avaruudellinen ja ajallinen tarkkuus. Esimerkiksi Calliopessa voi itse määritellä tarkkuudet tarpeiden mukaan, PyPSA:ssa ajallinen tarkkuus on yksi tunti. Avaruudelliset tarkkuudet vaihtelevat yksittäisestä projektista koko maailmaan. Laajimmat vaihtoehdot löytyivät Calliopesta ja OEMOF(SOLPH), joissa alueen pystyy rajaamaan vapaasti. Temoa:ssa on vähiten valinnaisuutta näistä sovelluksista. Sen tarkkuus ei riitä yksittäisiin projekteihin tai mannertenvälisen energiaverkkojen mallintamiseen.

Mallinnustyökalut optimoidessa minimoivat mallin kulut valitsemalla sopivat teknologiat ja niille oikean määrän. Käyttäjän tehtävä on antaa rajat, millä alueella halutaan teknologioiden määrän olevat. Työkalut vertailevat teknologioiden kokonaiskustannuksia ja valitsevat niistä halvimman yhdistelmän, jolla päästään käyttäjän määrittelemiä rajoituksiin.

3.2 Aikaisemmat tutkimukset

Monet yksikertaiset tapaukset ovat aikaisemmissa tutkimuksissa mallinnettu itse. Esimerkki-tapauksissa kyseessä on ollut yksittäisiä laitoksia tai energiavarastoja. (Lee et al. 2023, Patcharavorachot et al. 2023, Xiong et al. 2019, Liu et al. 2022 ja Bashiri Mousavi et al. 2021) Suuremmissa ja monimutkaisempien järjestelmien mallinuksissa on useimmiten käytetty valmiita mallinnustyökaluja laskennassa ja ratkaisuisissa. Esimerkiksi Jesse et al. (2020) tutkimuksessa hyödynnettiin Calliope-mallinnustyökalun ratkaisumalleja, joiden avulla pyrittiin optimoimaan koko Euroopan sähkön tuotantoa.

Yksi esimerkki kuinka mallinuksia on tehty, on mallintaa tuntikohtaisesti vuoden lämmön ja sähkön kulutus ja laskea muutamilla tapauksilla millaisilla tilanteilla saa suurimmat säästöt. Pakere et al. (2018) tutkimuksessa vertaillaan kahdeksaa eri tapausta, joilla erot ovat aurinkopaneelien pinta-ala ja onko asennettuna akkukapasiteettia vai ei. Mallissa ei kiinnitetty huomiota ympäristövaikutuksiin, mutta kaikissa vaihtoehdoissa poissuljettiin fossiiliset polttoaineet, jolloin ympäristövaikutus jää enimmäkseen positiiviseksi.

Calliope-työkalun avulla on tehty monia malleja alueista, joissa on tarkoituksena siirtyä fossiilisista energialähteistä uusiutuviin. Sillä on tehty esimerkiksi Cambridgen yliopistoalueen energiaverkosto ja sen optimointi tietyllä kulutuksella ja Englannin 20 alueen energiaverkostot 20 vuoden tuuli- ja aurinkovoiman historiatiedoilla. (Pfenninger et al. 2018)

3.3 Mallinnustyökalun valinta

Calliope, OEMOF(solph), Matlab ja EnergyPLAN nousivat alustavassa selvityksessä esille mahdollisina työkaluina energiaekosysteemin mallintamiseen. Calliopen ja OEMOF:in houkuttelevuus on suuret määrät akateemisia tutkimuksia ja avoin lähdekoodi. EnergyPLAN:in parhaimmat puolet on sen dokumentaatio ja graafinen käyttöliittymä helpottamaan mallin luomista. Omien mallien luominen Matlabilla tai Excelin avulla mahdollistaa juuri tilanteeseen sopivan tarkkuuden, mutta on samalla myös työläämpää.

OEMOF (solph) ja Calliopen välillä erot ovat pienet, mutta Calliopen dokumentaatio on hieman parempi kuin OEMOF:in. OEMOF ja Calliope ovat myös hyvin saman kaltaisia käytettävyydeltään ja ominaisuuksiltaan. Molemmat ovat Python pohjaisia ja käyttävät ulkoista työkalua ratkaisemaan yhtälöt. Molemmat ovat avoimen lähdekoodin projekteja, joita kehitetään jatkuvasti. OEMOF:in ja Calliopen välille eroja on vaikea löytää. Omien mallien luominen jää sen aikavaatimusten takia ulos vertailusta nopeasti. EnergyPLAN on erittäin kyvykäs työkalu ratkaisemaan monimutkaisia energiaerikkoja, mutta sen käytettävyys ja soveltuvuus mallintamaan nopeasti muuttuvia ja voimakkaasti uusiutuviin energialähteisiin tukeutuvia energiaekosysteemejä jäi epäselväksi alustavassa selvityksessä.

Taulukossa 4 on eriteltynä vertailu soveltuvista mallinnustyökaluista. Tähän työhön valitaan työkaluksi Calliope. Calliope valinnassa painotettiin hieman käyttäjäystävällisyyttä ja dokumentaatiota. Calliope on myös suunniteltu juuri tämän diplomityön kaltaisiin tilanteisiin, jossa uusiutuvien energialähteiden osuus on suuri suhteutettuna muuhun tuotantoon.

Taulukko 4. Mallinnustyökalut asteikolla 0 - 5, jossa 5 paras mahdollinen arvo.

	Dokumentaatio	Käyttäjät- ystävällisyys	Ajantarve mallin luomiseen	Mallin joustavuus	Avoin lähdekoodi
Calliope	5	4	4	5	x
OEMOF (solph)	4	3	3	5	x
EnergyPLAN	5	3	3	3	
Matlab/Excel	0	2	0	1	x

4 Kohteen esittely

Diplomityö on osa LUT-yliopiston ja LAB-ammattikorkeakoulun yhteistä hanketta ”Siirtyvä uusiutuvan energian ja resurssitehokkuuden hiilineutraaleihin ekosysteemeihin”. Hankkeen tavoitteena on lisätä Päijät-Hämeessä uusiutuvaa energiaa ja luoda toimivia energiaekosysteemejä, jotka hyödyntäisivät saumattomasti samoja resursseja tehokkaasti. Pääpaino hankkeella on kasvattaa teollisuuden uusiutuvan energian käyttöä.

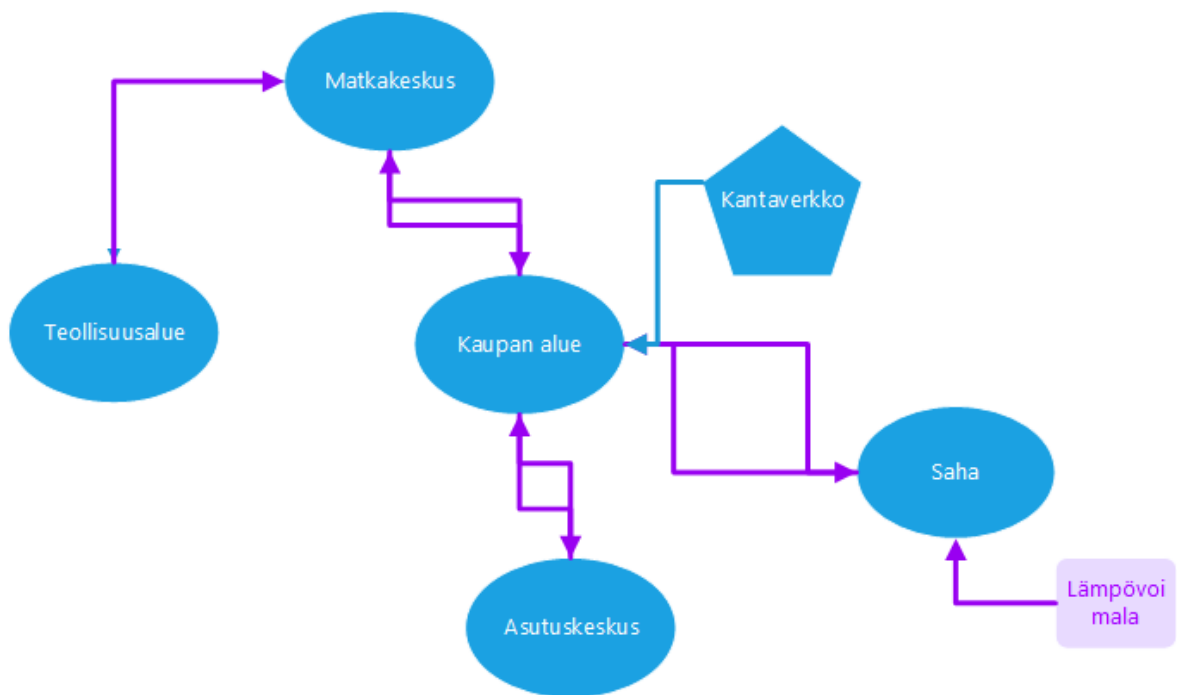
Sopivan kohteen kriteereinä ovat mahdollinen tuulivoiman potentiaali ja monipuolinen energiankulutus alueella. Päijät-Hämen liitto on teettänyt tutkimuksen mahdollisista tuulivoimaloiden alueista Päijät-Hämeessä. Alueiden joukosta valikoitui Vierumäki sen suuren tuulivoimapotentialin ja teollisuuden potentiaalın vuoksi. (FCG 2022)

Diplomityössä on kohteena Vierumäen teollisuusalue. Alueella on useita yrityksiä laaja-alaisesti teollisuuden konepajasta elintarvikekauppaan. Alueen ainoa keskitetty energiantuotantoratkaisu on Versowood OY:n kaukolämpökattila. Tavoitteena on tutkia, mikä olisi halvin tapa tuottaa alueelle energia hiilidioksidivapaasti, hyödyntäen mahdollisimman tehokkaasti alueella olevaa uusiutuvan aurinko- ja tuulisähkön tuotantopotentiaalia. Kuvassa 5 on esiteltynä Vierumäen sähkön ja lämmön siirtolinjat ja energiantuotantolaitokset. Kaaviokuvassa on lilalla värillä kuvattu kaukolämmön ja sähkön siirtolinjat. Sinisellä värillä pelkästään sähkön siirtoa.

Sähköntuotanto tapahtuisi kahdella tuulivoimapuistolla, jotka ovat selvityksen mukaan erittäin kannattavilla alueilla ja Vierumäen läheisyydessä. Alueella olisi myös kolmaskin mahdollinen tuulivoimaloiden sijainti, mutta tuulivoimaselvityksessä sen kannattavuus ei yltänyt yhtä korkealle tasolle kuin kahden muun. Tuulivoimalakohteina työssä ovat Kausanniemen Huukinkorpi ja Vuolenkosken Petäjässuo. Kolmas mahdollinen alue on Vierumäen eteläpuolella Pärnämäen kylän alueella. (FCG 2022)

Mallinnuksen tavoitteena on tuottaa kahdella tuulivoimapuistolla Vierumäen tarvitsema energia. Energia tuotettaisiin tuulivoimaloiden tuottamalla sähköllä ja sitä varastoitaisiin huippu-
tuotantojen aikana ja käytettäisiin varastoista, kun tuulivoimaloiden tuotanto ei riitä kattamaan alueen kulutusta.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää millaisella hinnalla saadaan Vierumäen alue hiilidioksidivapaaksi energiantuotannon osalta ja minkälainen hinta energian käytölle muodostuisi alueella.



Kuva 5. Kaaviokuvassa Vierumäen alueen pisteet ja mitä tuotantoa alueella on.

5 Mallinnus

Vierumäen teollisuusalueen mallinnuksessa käytetään Calliope-työkalua, joka hyödyntää tehokkaasti monia Python- ohjelmointikielen kirjastoja. Calliope on suunniteltu mallintamaan energiaekosysteemejä, joissa on suuri osuus uusiutuvilla ja muilla muuttuvan tuotannon muodoilla (Pfenninger et al. 2018). Calliopen edut muihin vastaaviin työkaluihin ovat sen selkeät mallien rakenteet ja tulosten visualisoinnin valmiit mallit.

Calliopen laskenta perustuu aikasarjojen dynaamiseen laskentaan. Malliin voidaan syöttää aikasarjoina teknologioiden tuotanto, kulutus, kustannukset ja tuotot. Tässä työssä käytetyt aikasarjat on sähkönhinta vuodelta 2022 (ENTSO-e 2023), kaukolämmön- ja sähkönkulutus, tuulivoiman- ja aurinkovoimalan tuotanto. Calliope optimoi systeemin sisäisesti mahdollisimman halvan kokonaisuuden tuottaa tarvittava määrä energiaa. Calliope valitsee vapaasti käytettävistä tekniikoista halvimman mahdollisen tavan täyttää energiankulutukset. Optimoissa ekosysteemiä Calliope ei välttämättä käytä kaikkia tekniikoita, joita olisi saatavilla. Calliope osaa etsiä useista sähkövarastoista halvimman vaihtoehdon tai niiden yhdistelmän.

Calliopen apuna mallinnuksessa käytetään myös OEMOF groupin kirjastoja, joiden avulla mallinnetaan tarvittavia aikasarjoja ja käsitellään avointa ERA5 dataa (OEMOF 2023). Python-ohjelmointikielessä kirjastot ovat ulkoisia ei Python-ohjelmointikielen omia funktioita, joita voidaan asentaa ja käyttää tarpeen tullen. OEMOF group on tehnyt energiajärjestelmien mallinnukseen useita eri kirjastoja, joita tässäkin työssä hyödynnetään. Kirjastojen avulla ei tarvitse itse kehittää kaikkia yhtälöitä, vaan voi hyödyntää jo muiden luomia funktioita ja keräämiä dataa eri tuuli - ja aurinkovoimaloista.

ERA5 on Euroopan keskipitkän sääennustekeskuksen uusin malli, joka antaa tuntikohtaiset arviot ilmastosta. Data jakaa maapallon 30 km ruudukoihin ja tarkastelee ilmakehää 137 eri korkeudella maanpinnasta 80 kilometrin korkeuteen. Työhön liittyvää dataa, jota haetaan ERA5 datasta ovat tuulen nopeudet eri korkeuksilla ja auringosta saapuvan säteilyenergian arvoja. (C3S 2023)

5.1 Alkuperäinen tilanne

Kuvassa 6 on merkattuna Vierumäen kartalle nykyisten teollisuuksien ja yritysten sijainnit. Sijainnit ovat vasemmalta oikealle teollisuusalue, huoltoaseman alue ja päivittäistavara-kaupan alue. Eteläisin piste on asuinalue ja viimeinen piste on sahan alue. Kuvaan pisteet ja energialinjat on piirretty esittämään, kuinka Calliopeessa määritellään siirtolinjat. Sinisellä

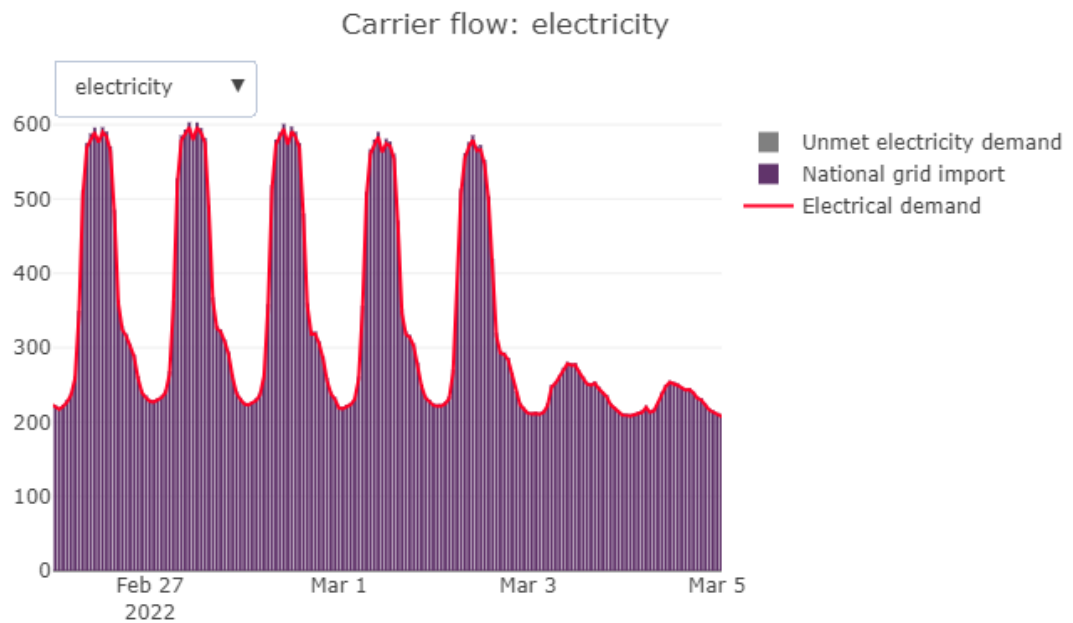
pelkästään sähkölinja ja tummapunaisien viivoilla kuvataan sekä lämmön että sähkönsiirtolinjaa.



Kuva 6. Vierumäen kartta, jossa mallinnettavat kohteet ja niitä yhdistävät sähkö- ja lämpöverkot

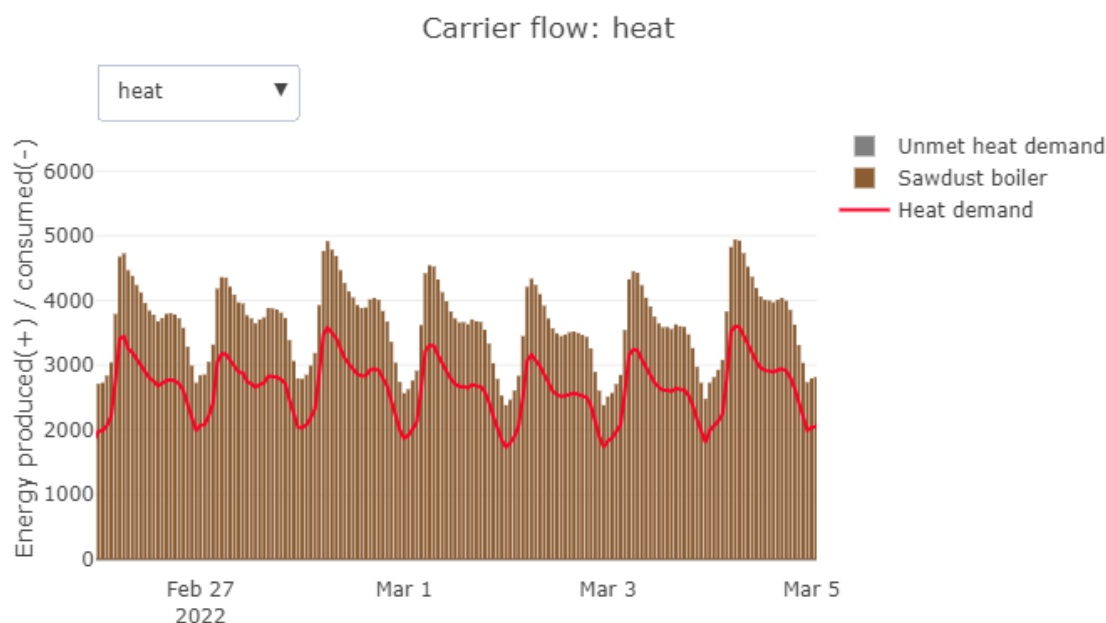
Vierumäen teollisuusalueella sähkönkulutus on 2470 MWh, mikä on arvioitu energiaviraston sähkön tyyppikäyttäjien perusteella. Alueella on kolme eri tyyppikäyttäjää: liike-elämä yrityksiä joilla vuosikulutus 600 000 kWh/vuosi, yhdessä vuorossa tehtävää teollisuutta 1 000 000 kWh/vuosi ja kolmessa vuorossa olevaa teollisuutta, joilla sähkönkäyttö on 6 000 000 kWh/vuosi (Energiavirasto 2018). Muilta osin kunnan energiaverkoista ja energian kulutuksesta on tehty yksinkertaistettu malli. Energiaverkon karkeassa mallissa ei oteta huomioon yksityisasumisen sähkönkulutusta, vaan oletetaan Vierumäen sähkönkulutus alueen yritysten perusteella. Vierumäen sähkönkulutuksen arvoina käytetään energiaviraston tyyppikäyttäjille tehtyä kulutusmallia (Energiavirasto 2018). Kuvassa 7 ovat esitettynä alueen kokonaissähkönkulutus yhden viikon ajalta.

Vierumäen alueella olevan kaukolämpöverkon energiankulutus on vuositasolla noin 13,6 GWh (Energiateollisuus 2022). Tuotannosta suurin osa tulee sahan lämpökattiloista, joissa poltetaan pääosin kuorta ja muuta sahausjätettä. Kaukolämmölle kulutuskäyrä luodaan kokonaiskulutuksen ja ulkolämpötilojen funktiona. Funktion on luonut Mark Hellwig väitöskirjassaan (Hellwig 2003). Ulkolämpötilat on saatavilla ilmatieteenlaitoksen havaintojen la-



Kuva 7. Vierumäen kokonaissähkönkulutus yhden viikon ajalta. Yksiköt kuvassa on kilowatteja.

tauspalvelusta. (Ilmatieteenlaitos 2023). Kulutuskäyrä luotiin demandlib-nimisellä Python-kirjastolla (OEMOF 2023). Esimerkkiviikko kaukolämmön kulutuksesta ja tuotannosta on kuvassa 8. Ylimääräinen teho johtuu vain kattilan omasta hyötusuhteesta.



Kuva 8. Kuva kaukolämmön kulutuksesta ja tuotannosta

5.2 Skenaarioiden esittely

Skenaariot ja aikasarjat on tehty vuodelle 2022. Skenaarioissa 1 ja 3 on oletettu ettei energiae-kosysteemin tuoda ulkopuolelta mitään, mutta sähköä on mahdollista myydä ulos systeemis-tä. Skenaariossa 2 ja 4 on mahdollista tuoda ja myydä ulos systeemistä sähköä. Skenaarioissa 1 ja 3 on energiavarastot käytössä ja 2 ja 4 skenaarioissa ei ole energiavarastoja käytettävissä. Teknologiset erot skenaarioiden välillä näkyvät taulukossa 5 tarkemmin.

Taulukko 5. Skenaarioiden teknologiat

	Tuulivoima	Energiavarastot	Metaanintuotantoa	Kantaverkko
Skenaario 1	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Skenaario 2	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä
Skenaario 3	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Skenaario 4	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä

Taulukossa 6 on esiteltyinä niiden lähtöarvot, joita käytetään mallinnuksessa. Korkokantana kaikissa tapauksissa sama 10%. Kaikissa skenaarioissa käytetään samoja lähtöarvoja tekno-logioissa ja Calliope valitsee itse kuhunkin skenaarion parhaiten soveltuvan kombinaatiot. Sähkövarastoissa varaston kapasiteetti on sidottu tehoon, jolloin Calliope optimoi vain te-hoa. Koska varastojen hinta on määritelty tietyissä suhteissa (Mongird 2019).

Taulukko 6. Teknologioiden lähtöarvot

Teknologiat	Investointikustannukset	Varaston maksimi kapasiteetti	Elinkaari	Hyötysuhde
A-CAES	200 €/kW ^{8, 16}	16 x teho ⁸	40 ³⁵	70 % ^{3, 5}
LAES	500 €/kW ⁹	16 x teho ⁸	25 ^{7, 14}	75 % ^{8, 14}
Litium akut	362 €/kW ⁸	4 x teho ⁷	10 ⁸	86 % ⁸
Lämpövarasto	9 €/kWh ¹⁸	5 000 MWh ^{6, 17}	25 ¹⁸	95 % ⁶
Tuulivoima	1900 €/kW ¹⁶		20 ¹⁶	45 % ¹⁵
Aurinkovoima	716 €/kW ²		20 ²	11
Sähkökattila	700 €/kW ⁴		25 ⁴	95 % ⁴
Elektrolyysi	1000 €/kW ^{14, 19}		15 ¹⁸	65 % ^{10, 20}
Metaanin synteesi	800 €/kW ¹²		25 ¹²	80 % ¹

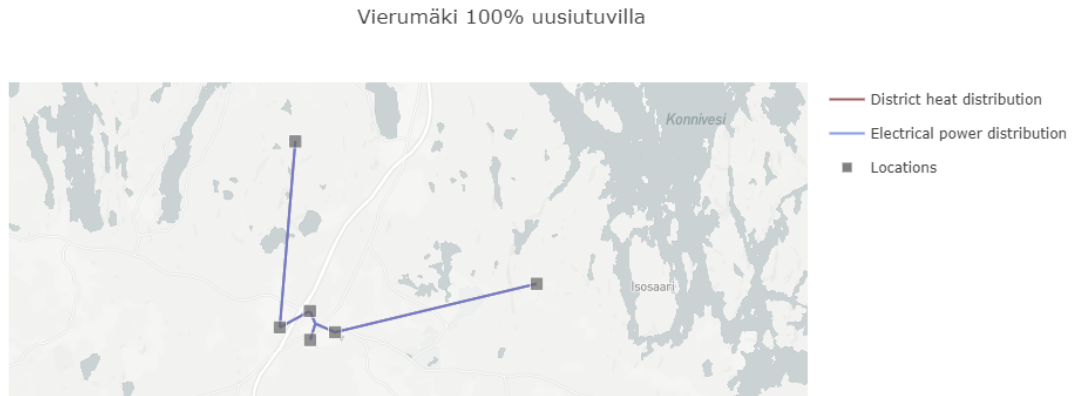
Ajanovic et al. 2019¹, Eroaverkosta 2023², He et al. 2018³, Hietala 2021⁴, King et al. 2021⁵, Mahon et al. 2022⁶, Michael Sterner 2019⁷, Mongird 2019⁸, Morgan et al. 2015⁹, Nasser et al. 2022¹⁰, Euroopan komissio 2023¹¹, Rönsch et al. 2016¹², Tyler Steehly 2022¹³, Tenhumberg et al. 2020¹⁴, Mikkonen 2020¹⁵, TWI 2020¹⁶, Vecchi et al. 2021¹⁷, Yang et al. 2021¹⁸, Zakeri et al. 2016¹⁹ ja Zauner et al. 2019²⁰

5.3 Skenaario 1. 100 % uusiutuvalla energialla

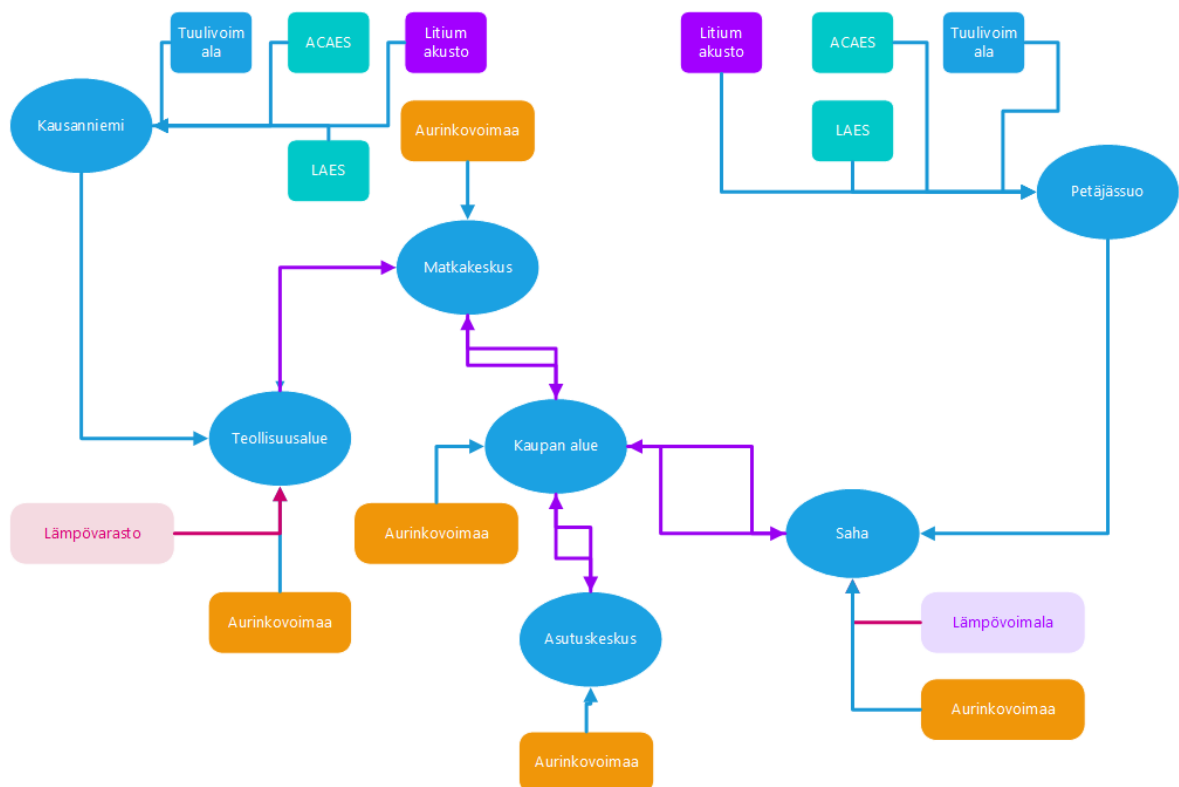
Skenaariossa 1 kaikki energia tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä. Vierumäen teollisuusalueelta vain viedään sähköä sähköverkkoon ja kaukolämpöverkkoon, jolloin kunta olisi energian osalta alueellisesti täysin omavarainen. Alueella tuotettu ylimääräinen sähkö viedään valtakunnan verkkoon, mutta valtakunnan verkosta ei tuoda sähköä ekosysteemiin. Uusiutuvia energialähteitä mallinnettaessa tarvitaan tuuli- ja aurinkovoimaloiden tuotantokäyrät. Tuotantokäyrien avulla saadaan mallinnettua uusiutuvien energialähteiden mahdollinen tuotanto. Tuotantokäyrät voidaan laskea ERA5 datasta (Hersbach et al. 2023). Tuulivoiman datan lataus ja käsittely suoritetaan OEMOF Groupin Python kirjastoilla, jotka lataavat ja käsittelevät datan käytettävään muotoon, jossa tuloksena on teho aikasarjana valitussa pisteessä. (OEMOF 2023) Aurinkovoiman tuotanto pinta-alaa kohden saadaan Euroopan komission tuottamasta aurinkovoimatilastoista. (Euroopan komissio 2023)

Kuvassa 9 on esitettyä tarkasteltavat pisteet ja lisätty tuulivoimapuistojen sijainnit. Kuvassa 10 on esitettyä kaaviona mallinnettavien pisteiden tuotannot. Mallinnuspisteet ja tekniikat on kuvassa hahmoteltu tavalla, jolla Calliopeen määritellään energiaekosysteemi. Kuvassa 10 violettit nuolien mukaan liikkuu lämpöä ja sähköä. Siniset nuolet kuljettavat vain sähköä ja punaiset nuolet kuljettavat vain lämpöä. Huukinkorpi sijaitsee Vierumäen pohjoispuolella ja Petäjässuo itäpuolella. Petäjässuon Isoharjun alueelle on suunniteltu yhteensä 30 MW tuulivoimapuistoa ja Kausanniemen Huukinkorpeen 25 MW tuulivoimalapuistoa.

ERA5 datasta saadaan kerättyä hetkellinen tuulen nopeus alueella. Kuvassa 11 on maaliskuun 2022 hetkelliset tuulen nopeudet. Tuulen nopeuden funktiona Python kirjasto luo tuotanto-

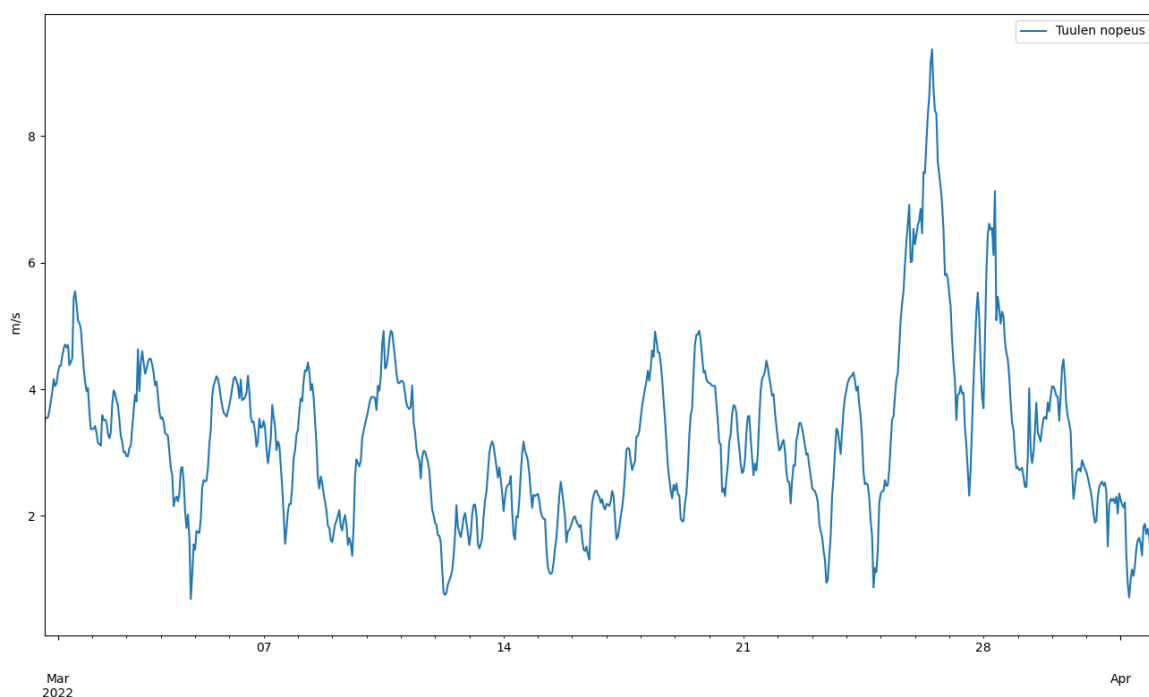


Kuva 9. Tuulivoimaloiden ja Vierumäen pisteet kartalla.



Kuva 10. Vierumäen alueen kaaviokuva, jossa mallinnettavat pisteet ja pisteissä olevat energian tuotantolaitosten vaihtoehdot ennen mallinnusta.

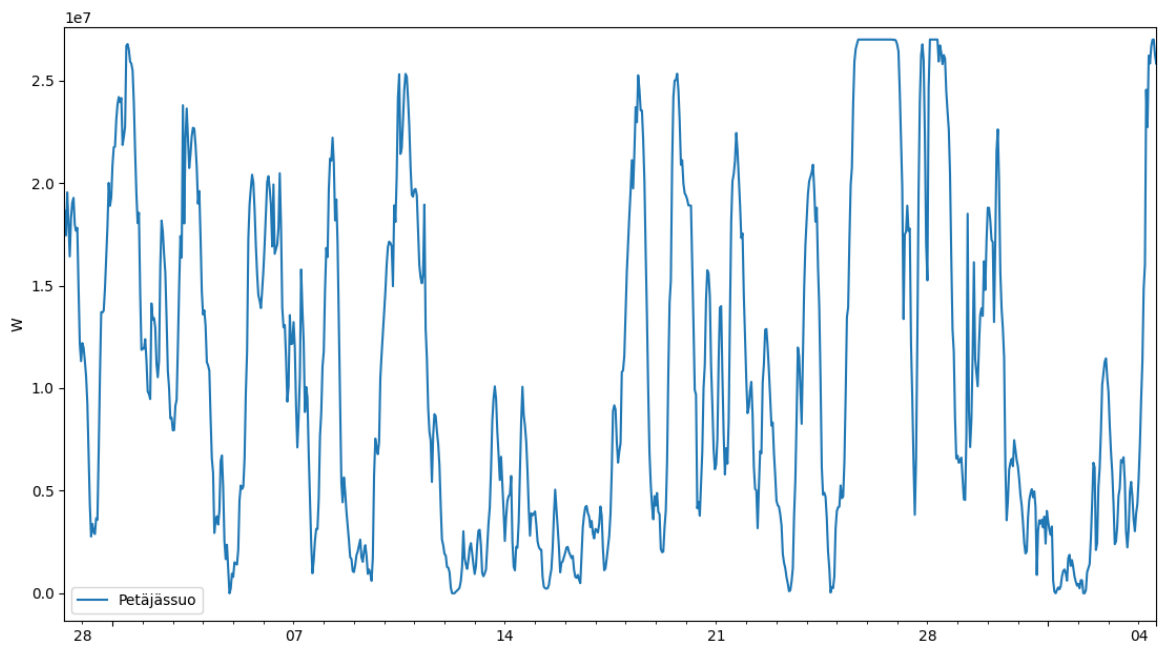
käyrän tuulivoimapuistolle alueella. Toisen tuulivoimapuiston tuotantokäyrä on kuvassa 12, jossa on esiteltyä maaliskuun tuulivoiman tuotanto Petäjässuon alueella. Tuulivoiman tuotantokäyrät saadaan ERA5 datasta OEMOF groupin kirjastoja hyödyntämällä. Lähtöarvoina tarvitsee tuulen nopeudet ERA5 datasta ja tuulivoimalan tiedot, jotka kirjasto pitää sisällään. Tuuliturbiinina käytetään Enercon E-147/5000. Turbiinin roottorin halkaisija on 147 m ja torninkorkeus on 135 m. Hyötysuhteena tuulivoimaloille käytetään 45 %. Kuvassa 13 on esitettyä yksittäisen tuulivoimalan tehokäyrä, jossa on tuulennopeus turbiinin tehon funktiona megawatteina. Tuulivoimalle ja aurinkovoimalle sähkön myyntihinnaksi laitetaan 0 €/MW, jotta Calliope loisi tuulivoiman soveltumaan Vierumäen alueelle paremmin. Tavoitteena optimoida tuulivoiman tuotanto vastaamaan Vierumäen energian tarvetta, eikä tuottamaan myyntiin sähköä.



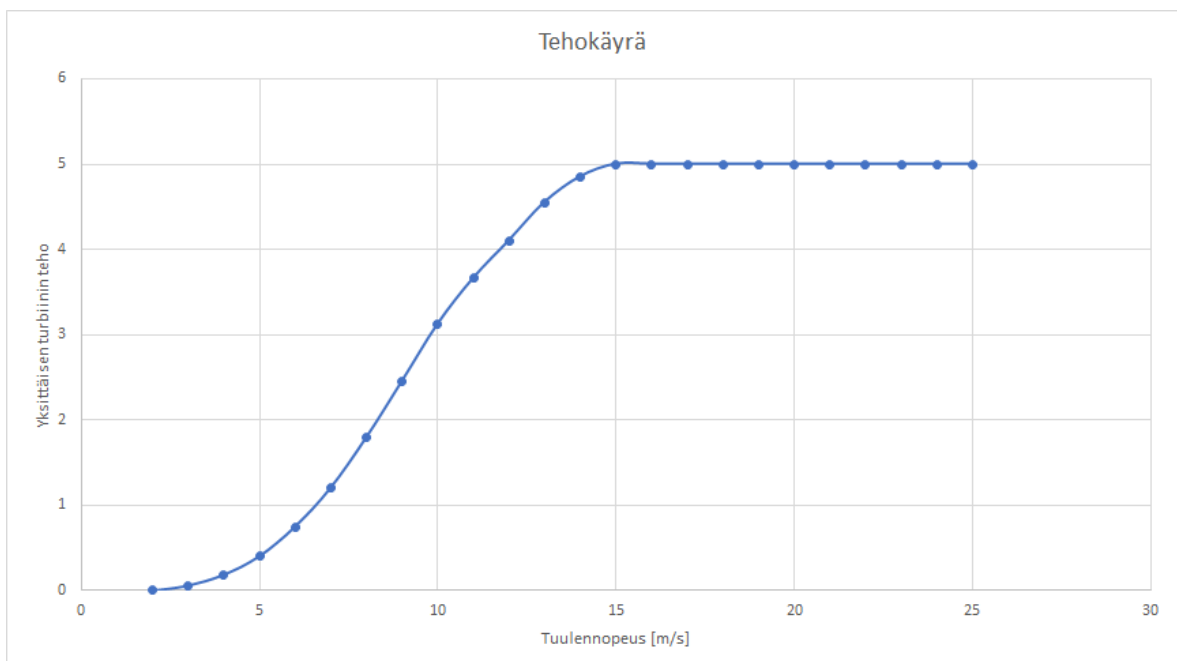
Kuva 11. Kuva tuulen nopeudesta tuulivoimalan alueella.

Aurinkoenergian tuotanto alueella voidaan laskea aurinkoenergian potentiaalin ja mahdollisten kattopinta-alojen avulla. Maanmittauslaitoksen palvelusta Vierumäellä teollisuus ja kaupan alojen kattopinta-alaa on noin 150 000 m². Koska katoille usein sijoitetaan ilmastointilaitteita ja siellä on mahdollista tehdä huoltotöitä, niin tässä työssä oletetaan, että kaikista katoista olisi 60 % käytettävissä energiantuotantoon, jolloin käytettävää pinta-alaa on noin 90 000 m². Calliope optimoi, kuinka paljon auringon energiasta kannattaa hyödyntää sähköinä ja kuinka paljon lämpönä.

Jotta alueelle olisi koko ajan käytettävissä riittävästi energiaa, tarvitsee alueelle sijoittaa energiavarastoja. Mallissa energiaekosysteemistä voidaan viedä energiaa ulos, mutta malliin ei



Kuva 12. Kuva tuulivoiman tuotannosta Petäjässuon Iso Harjun alueella maaliskussa 2022.



Kuva 13. Tuulivoimalan tehokäyrä. Y-akselilla tuulivoimalan teho megawatteina ja x-akselilla tuulenoisuus.

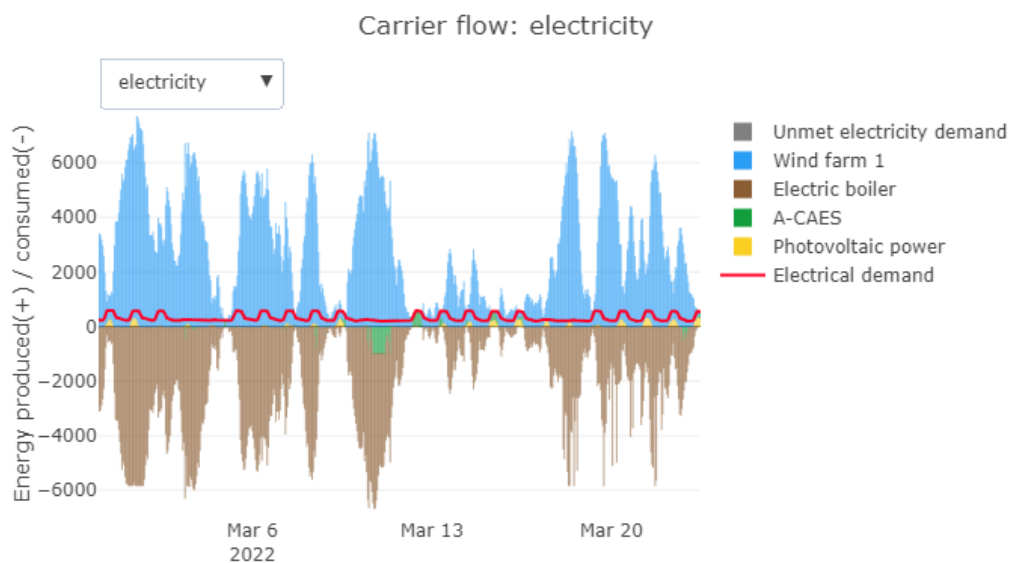
voi tulla sisään lisää energiaa. Mallissa energiavarastot on sijoitettu tuulivoimaloiden läheisyyteen. Mallissa energiavarastoina käytetään paineilmaparastoja ja litium-ioni akkuja. Calliope optimoi itse asennettavien akkujen määrän ja tyyppin tavoitteena minimoida kokonaisysteemin hinta ja käyttökustannukset. Lämpövaraston mallina toimii tuntuvan energian vesivarasto.

Calliopen mallista tuloksena saadaan taulukon 7 mukaiset arvot skenaariolle 1. Taulukosta nähdään asennettu teho ja varaston kapasiteetti. Calliopen optimointiarvoina on ekosysteemin hinnan minimointi. Kuvissa 14 ja 15 on ote lämmön ja sähkön tuotannosta ekosysteemissä tarkasteluajanjaksolta. Positiivisella akselilla on kuvissa tuotettu energia ja negatiivisella akselilla kulutettu teho ja tehon vienti ulos ekosysteemistä. Kuvassa 15 ruskealla on sähkökattilan tuottama lämpöteho, oranssilla värillä on lämpövaraston teho ja punainen käyrä on kaukolämpöverkon tarvitsema lämpöteho kullakin ajanhetkellä. Negatiivisella alueella olevat teho on lämpövarastoon syötettävä teho, jolla ladataan lämpövarastoa.

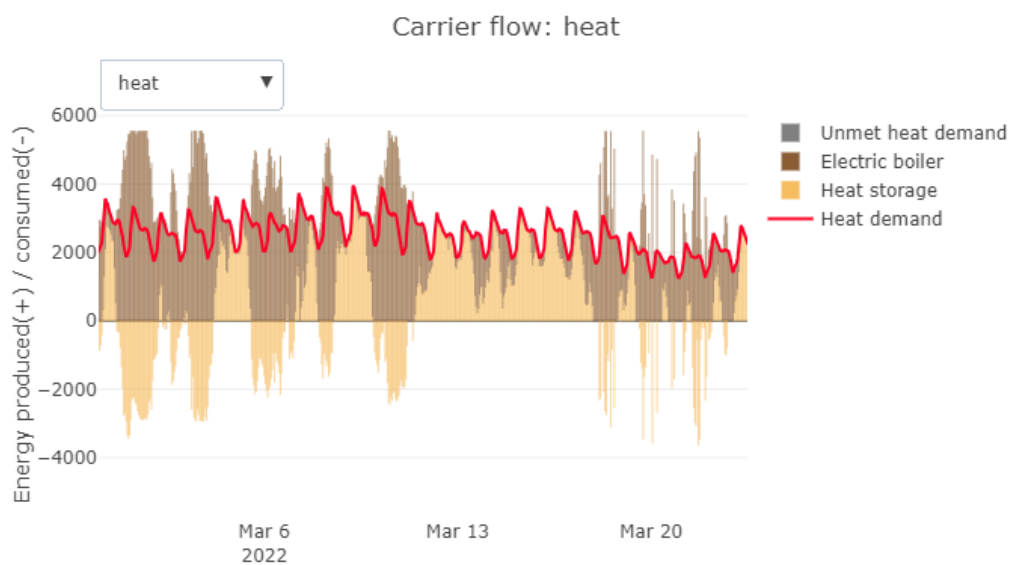
Vihreällä värillä olevaa A-CAES ja lämpöakku järjestelmiä ajetaan säätövoimana ylläpitämään ekosysteemin energiatasapainoa. Tuulivoimalan huipputeholla ladataan varastot täyteen ja kun tuulivoimaa ei ole saatavilla puretaan akuista energiaa verkkoon. Tuulivoimaa alueella tuotetaan 30 000 MWh/a, aurinkovoimaa 440 MWh ja paineilmaparastoilla 143 MWh.

Taulukko 7. Systeemin ominaisarvot

	Teho	Varaston kapasiteetti
Tuulivoima	9 MW	
Aurinkovoima (sähkö)	0,3 MW	
Sähkökattila	6 MW	
Lämpövarasto	6 MW	540 MWh
A-CAES	1 MW	13 MWh



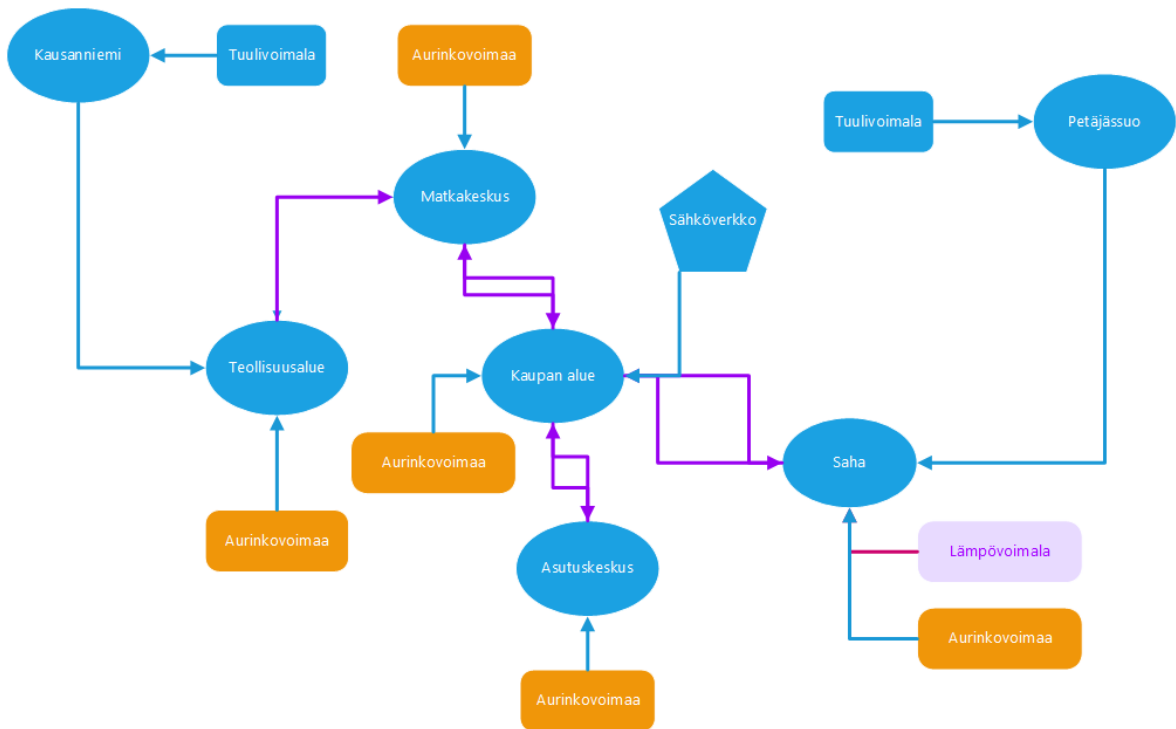
Kuva 14. Sähköntuotanto esimerkkiajanksolta. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)



Kuva 15. Lämmöntuotanto esimerkkiajanksolta. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

5.4 Skenaario 2. uusiutuvilla mahdollisimman paljon ilman akkuja

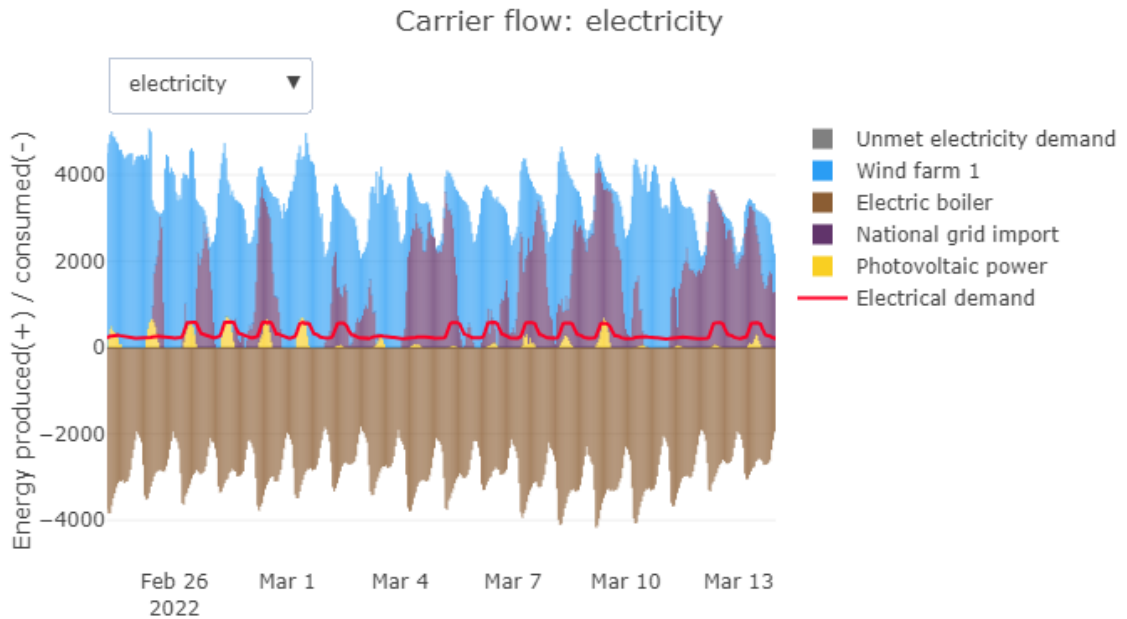
Skenaariossa 2. ekosysteemi on muuten identtinen ensimmäisen skenaarion kanssa, mutta ekosysteemissä ei ole energian varastointia, mutta on mahdollisuus tuoda sähköä energiaekosysteemin ulkopuolelta. Kuvassa 10 on esiteltynä ekosysteemin kaaviokuva. Mallinnuspisteet ja tekniikat on kuvassa hahmoteltu tavalla, jolla Calliopeen määrittellään energiaekosysteemi. Kuvassa on esiteltynä sijainnit soikioilla ja niissä pisteissä sijaitsevat järjestelmät pyöristetyillä nelikulmioilla. Kuvassa violettit nuolien mukaan liikkuu molempia lämpöä ja sähköä. Siniset nuolet kuljettavat vain sähköä ja punaiset nuolet kuljettavat vain lämpöä. Läh- töarvot ja uusiutuvien maksimithehon arvot ovat 2. skenaariossa samat kuin 1. skenaariossa, jotka löytyvät taulukosta 6.



Kuva 16. Vierumäen alueen kaaviokuva, jossa mallinnettavat pisteet ja pisteissä olevat energiantuotantolaitokset.

Kuvissa 17 ja 18 on kuvattu muutaman päivän sähköntuotantoa, josta näkyy energiantuotannon ja energian viennin määrät. Kuvassa 17 sinisellä ja vaaleansinisellä on esitetty tuulivoiman tehot tunneittain. Positiivisella akselilla on kuvissa tuotettu energia ja negatiivisella akselilla kulutettu teho ja tehon vienti ulos ekosysteemistä. Sinisellä oleva on tuulivoiman kokonaisteho ja vaaleansinisellä oleva negatiivinen teho kuvastaa energiaekosysteemistä ulos vietävää sähkötehoa. Keltaisella ja vaaleankeltaisella on aurinkovoiman kokonaisteho ja vaaleankeltaiset palkit negatiivisella alueella kuvaavat ekosysteemistä ulos vietävä tehon määrää.

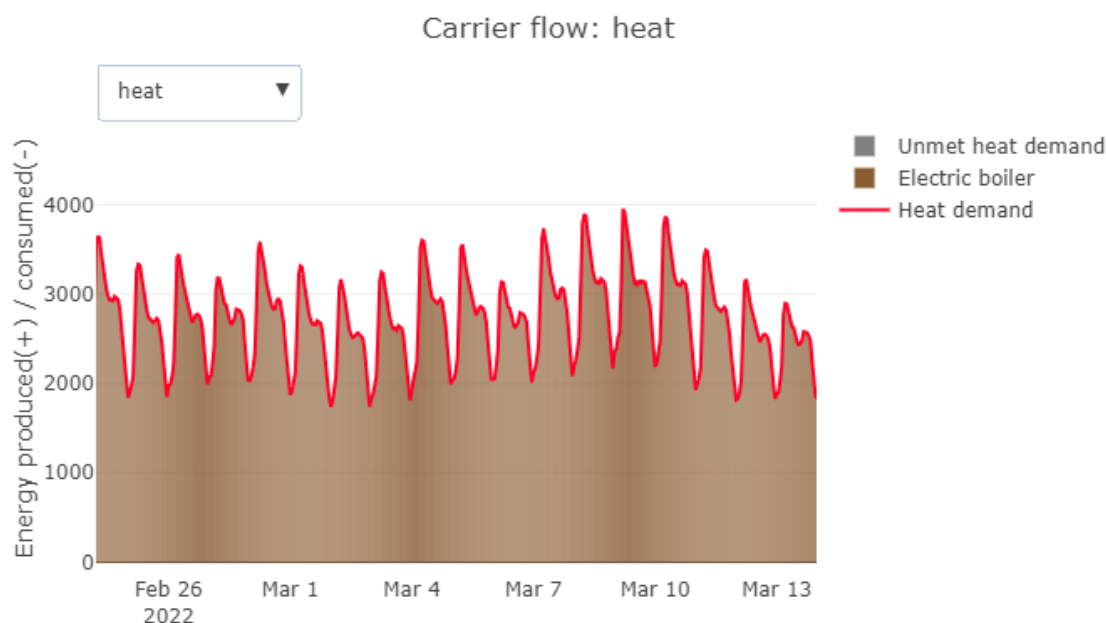
Taulukossa 8 on listattu Calliopen optimoidut tehot kaikille tuotantolaitoksille. Skenaariosta 1 poiketen skenaariossa 2 on sähkön tuontia, joka näkyy kuvassa 17 lilalla värillä. Suurin osa sähkön tuotannosta tapahtuu tuulivoimaloilla 17 500 MWh/a ja sähkön tuonti alueelle on 6 000 MWh/a. Yhdellä 5 MW tuuliturbiinilla tuotetaisiin noin 60 % alueen sähkön tarpeesta.



Kuva 17. Skenaarion 2 sähköntuotanto. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

Taulukko 8. Skenaarion 2. tuotantolaitosten tehot

	Teho
Tuulivoima	5 MW
Aurinkosähkö	0,8 MW
Sähkökattila	5 MW
Sähköverkon huipputeho	5 MW

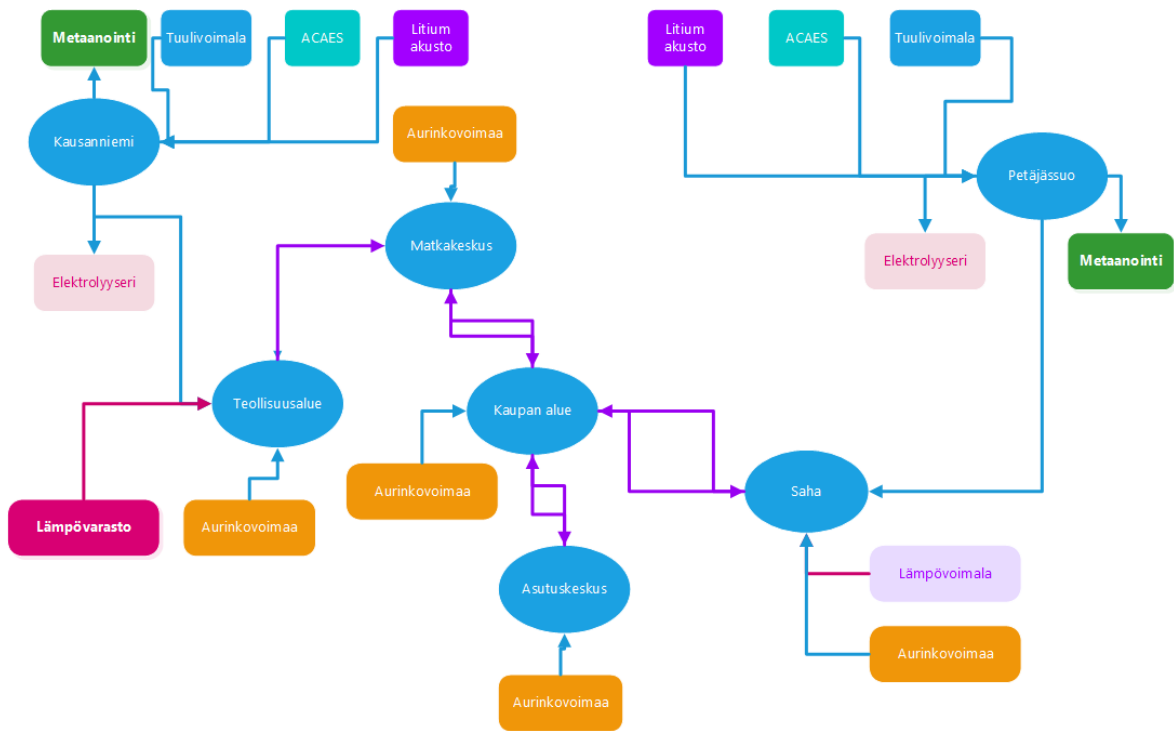


Kuva 18. Skenaarion 2 lämmöntuotanto. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

5.5 Skenaario 3. 100 % uusiutuvilla ja metaanin tuotantoa

Skenaariossa 3. energia tuotetaan kokonaan uusiutuvilla energiamuodoilla ja lisäksi alueella on myös vedyn ja metaanin tuotantoa. Kuvassa 19 on esitettyä tekniikat, jotka annetaan lähtöarvoina Calliopelle optimointiin. Calliope valitsee vapaasti käytettävistä tekniikoista halvimman mahdollisen tavan täyttää energiankulutukset. Kuvassa violettien nuolien mukaan liikkuu molempia lämpöä ja sähköä. Siniset nuolet kuljettavat vain sähköä ja punaiset nuolet kuljettavat vain lämpöä. Optimoidessa ekosysteemiä Calliope ei välttämättä käytä kaikkia tekniikoita, joita olisi saatavilla. Calliope osaa etsiä useista sähkövarastoista halvimman vaihtoehdon tai niiden yhdistelmän. Energian varastointiin on käytettävissä lämpövarasto, A-CAES, litiumakut ja LAES. Metaanin tuotanto alueella vaatii aina vedyn tuotantoa ja hiilidioksidin lähteen. Vierumäen alueella olevassa sahassa on käytössä lämpövoimalaitos. Tässä työssä oletetaan, että kaikki lämpövoimalaitoksen hiilidioksidipäästöt kerätään ja hyödynnetään metaanin tuotannossa. Hiilidioksidipäästöistä muodostuu tuotannon rajat vedyn ja metaanin tuotantoon.

$$m = nM \quad (2)$$



Kuva 19. Vierumen alueen kaaviokuva, jossa mallinnettavat pisteet ja pisteissä olevat energiantuotantolaitokset.

$$n_{H_2} = 4n_{CO_2} \quad (3)$$

$$m_{H_2} = n_{H_2} M_{H_2} \quad (4)$$

$$n_{CO_2} = n_{CH_4} \quad (5)$$

Metaanin tuotannon maksimi arvo alueelta saadaan, kun oletetaan lämpölaitoksen lämpöteho n. 35 MW. Lämpötehon avulla saadaan Forest Research (2023) artikkelista hiilidioksin määrä. Hiilidioksidin massan avulla voidaan laskea tarvittava vedyn ja metaanin määrä yhtälöiden (1) - (5) avulla. Yhtälöiden (3) ja (5) kertoimet saadaan yhtälöstä (1). Yhtälöillä (1) - (5) lasketaan vedyn ja metaanin tarve, kun tiedetään että hiilidioksidia alueella olisi saatavilla 1960 kg/h,(Forest Research 2023) kun oletetaan ympärivuotisessa käytössä olevan 35 MW lämpötehoa (Energiateollisuus 2022). Metaanin tuotannon maksimiksi saadaan 712 kg/h. Yhtälöissä (2) - (5) n on ainemäärä [$kmol$], m on massa [kg] ja M moolimassa [$\frac{kg}{kmol}$].

$$n_{CO_2} = \frac{1960kg}{(12kg/kmol + 2 \cdot 16kg/kmol)} = 44.5kmol$$

$$n_{H_2} = 178kmol$$

$$m_{H_2} = 178 \text{ kmol} \cdot 2 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 356 \text{ kg}$$

$$n_{CH_4} = 44.5 \text{ kmol}$$

$$m_{CH_4} = 44.5 \cdot (12 + 4 \cdot 1) = 712 \text{ kg}$$

Calliope ei pystynyt luomaan toimivaa energiaekosysteemiä tuolla määrällä metaanin määrällä. 712 kg/h metaanin tuottamiseen kuluva energiamäärä on siis suurempi kuin mitä alueella oleva ylimääräinen energia on. Alueella on siis riittävä hiilidioksidin lähde metaanin tuotantoon. Jotta saadaan luotua oikea määrä metaania lasketaan teoreettinen maksimimäärä ylituotantoa alueella ja sen avulla lasketaan metaanin tuotanto ja vedyn tuotanto.

$$E_{tot} = E_{tuuli} + E_{pv} - E_{KL_kulutus} - E_{S_kulutus} \quad (6)$$

$$P_{CH_4} = (E_{tot} \cdot 0.7 \cdot \eta_{AEC} \cdot \eta_{CH_4\text{synteesi}}) / a \quad (7)$$

Yhtälöillä (6) ja (7) lasketaan raja metaanin tuotannolle megawateissa, joka toimii rajoitteena metaanin ja vedyn tuotannoille. Yhtälöissä (6) ja (7) yksikkönä on E energiaa [MWh], P tehoa [MW] ja 0,7 on prosenttiosuuden arvio, mitä energiamäärästä saadaan hyödynnettyä. Yhtälössä (7) oletetaan, että kaikesta ylimääräisestä energiasta saadaan 70 % hyödynnettyä. Yhtälöissä metaanin teho lasketaan wateissa, koska Calliopen malli on määritelty metaanin energiamäärän pohjalta. Yhtälöillä saadaan metaanin tuotantorajaksi 7 MWh metaania tunnissa. Malleissa metaanin tuotannon joustavuutta simuloidaan suurella metaanin varastolla. Tunnissa metaanin tuotantomääräksi tulee noin 530 kg, kun metaanin energiatiheys on 13,9 kg/kWh (Wan 2004).

$$192530 \text{ MWh}/a = 190000 \text{ MWh}/a + 19000 \text{ MWh}/a - 14000 \text{ MWh}/a - 2470 \text{ MWh}/a$$

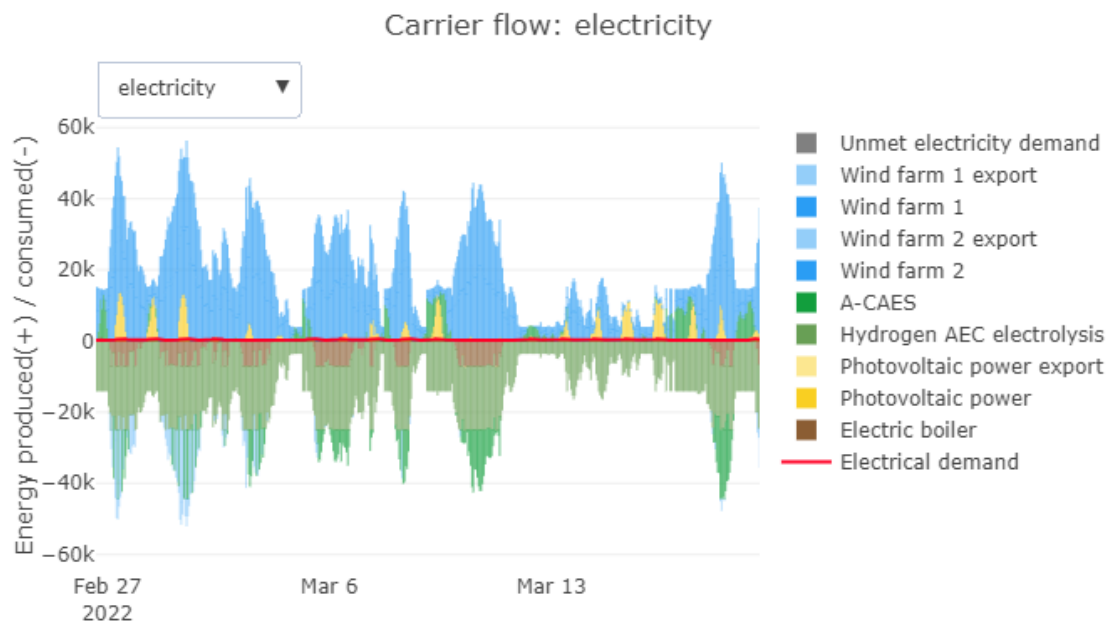
$$7 \text{ MW} = (192530 \text{ MWh}/a \cdot 0.7 \cdot 0.6 \cdot 0.8) / 8760 \text{ h}/a$$

Kuvissa 20 ja 21 on esiteltyä sähkön ja lämmön tuotanto maaliskuun alusta. Kuvassa 20 kirkkaan vihreällä värillä on merkattu paineilmaravastojen sähköteho ajanhetkittäin. Sinisellä ja vaaleansinisellä värillä kuvassa on merkattuna tuulivoiman tuotanto ja tuulivoiman vienti ulos energiaekosysteemistä. Negatiivisella alueella oleva on akun varaamista ja positiivisella alueella oleva väri on akun purkamisteho. Keltaisella ja vaaleankeltaisella värillä on

esitettyinä aurinkovoiman tuotanto ja vienti ulos ekosysteemistä. Ruskealla värillä on markattu sähkökattilan käyttämää sähkötehoa. Vaalean vihreällä värillä esitetään vedyn tuotannon käyttämää sähköenergiaa.

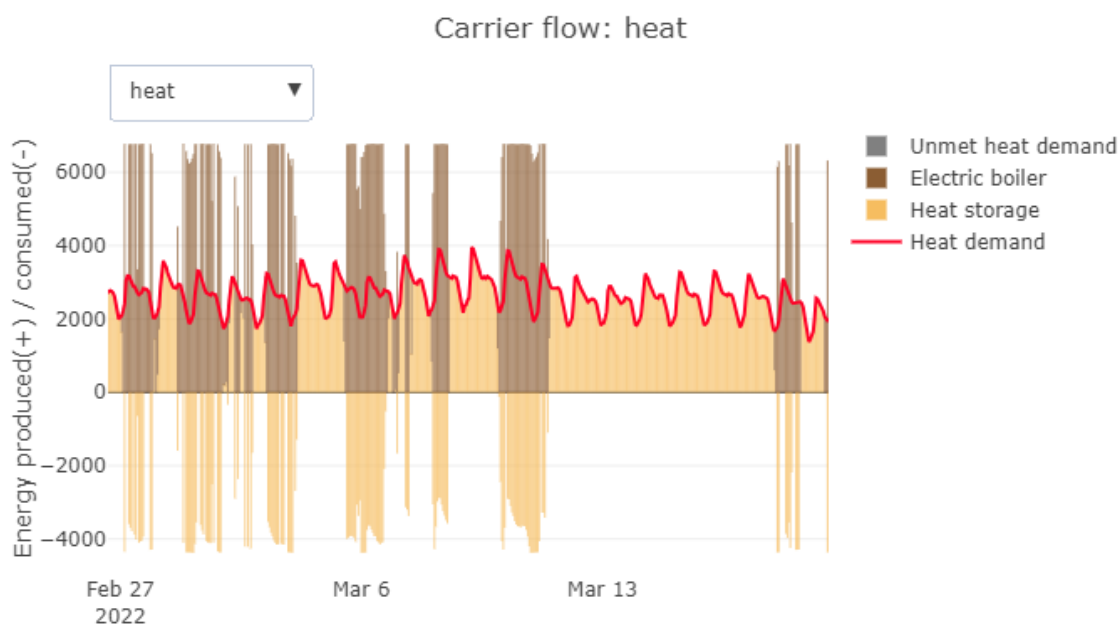
Kuvassa 20 A-CAES-järjestelmää ajetaan tyynillä keleillä, jolloin ei ole tuulivoiman tuotantoa. A-CAES-järjestelmä toimii säätövoimana alueella ja sillä ylläpidetään riittävä energian tarve elektrolyysereissä. Sähkön kulutuksesta yli 80 % tuotetaan tuulivoimalla ja aurinkovoimalla tuotetaan vain 9 %. Tuulivoiman kokonaistuotanto on 181 000 MWh/a, aurinkovoimalla 18 000 MWh/a ja paineilmavarastolla 10 500 MWh/a.

Kuvassa 21 oranssilla ruskealla värillä on esitetty lämpövaraston käyttöä ja sähkökattilan käyttöä. Punainen käyrä kuvastaa alueella olevan kaukolämpöverkon kysyntää. Negatiivisella aluella oleva lämpövaraston teho kuvaa lataukseen käytettävää tehoa. Positiivisella puolella akun varausta puretaan.



Kuva 20. Skenaarion 3. sähköntuotanto ja kulutus. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

Taulukossa 9 on listattuna Calliopen optimoimat tehoarvot eri teknologioille. Optimoiduista varastotyypeista A-CAES toimii ekosysteemissä sähkönvarastona. Ekosysteemissä A-CAES korvaa tuulettomina päivinä tuulivoiman puuttuvan tuotannon.



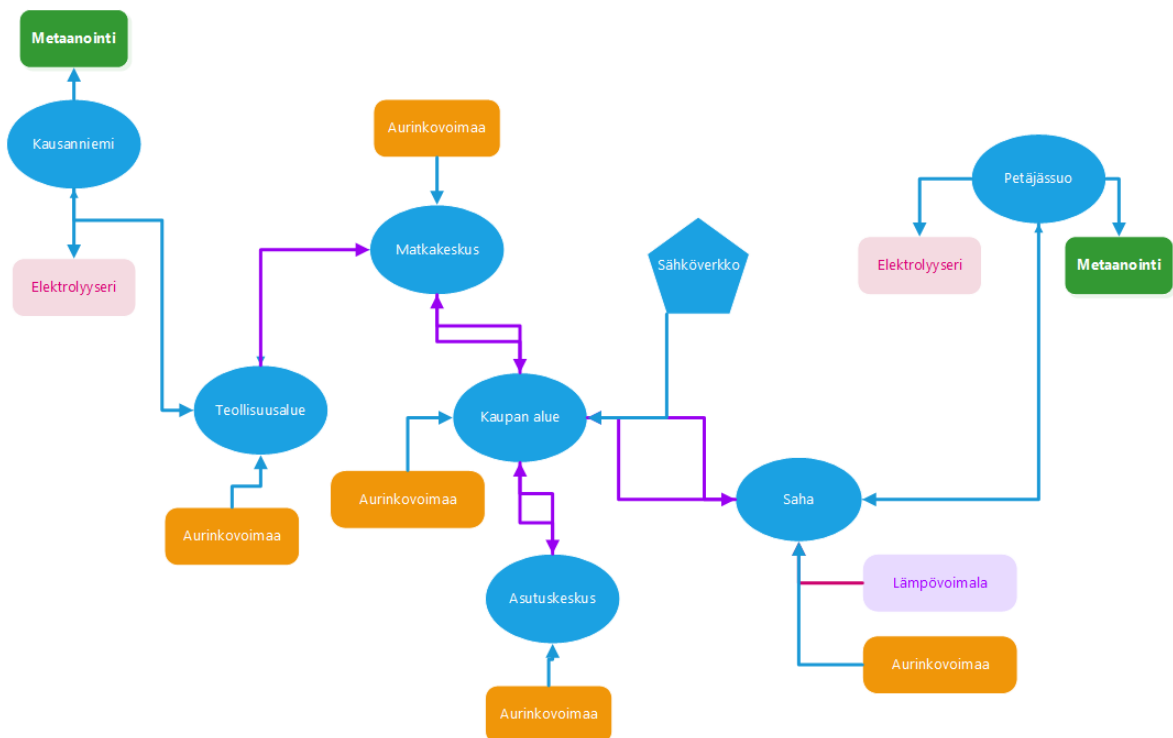
Kuva 21. Skenaarion 3. lämmöntuotanto. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

Taulukko 9. Skenaarion 3. tuotantolaitosten maksimi tehot

	Teho	Varaston kapasiteetti
Tuulivoima	53 MW	
Aurinkosähkö	15 MW	
A-CAES	19 MW	310 MWh
Lämpövarasto	7 MW	700 MWh
Sähkökattila	7 MW	
Elektrolyysiteho	12 MW	
Metaanin tuotantoa	7 MW	

5.6 Skenaario 4. uusiutuvilla mahdollisimman paljon ja metaanin tuotantoa

Skenaariossa 4. tavoitteena on tuottaa sama määrä metaania kuin skenaariossa 3, mutta skenaariossa 4 ei ole energiavarastoja. Metaanin ja vedyn tuotannossa on samat rajoitteet kuin edellisessä skenaariossa, eli alueen tuotantoa vaaditaan tuottaamaan 7 MW:n teholla metaania. Kuvassa 22 on esiteltyä energiaekosysteemin tuotantopisteet ja niissä olevat tuotantolaitokset. Mallinnuspisteet ja tekniikat on kuvassa hahmoteltu tavalla, jolla Calliopeen määrittellään energiaekosysteemi. Kuvassa violettien nuolien mukaan liikkuu molempia lämpöä ja sähköä. Siniset nuolet kuljettavat vain sähköä ja punaiset nuolet kuljettavat vain lämpöä. Calliopelle mahdollisina teknologioina annetaan aurinkolämpölaitos, aurinkosähköpaneelit, tuulivoima ja verkon tuontisähkö.

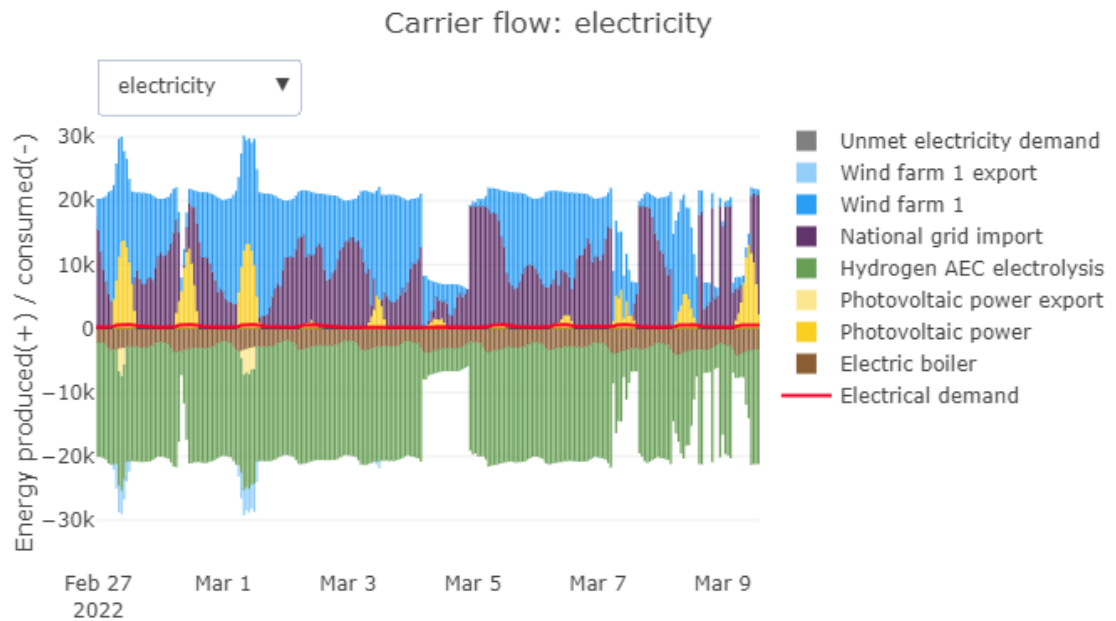


Kuva 22. Vierumäen alueen kaaviokuva, jossa mallinnettavat pisteet ja pisteissä olevat energiantuotantolaitokset.

Kuvissa 23 ja 24 on esiteltyä skenaarion 4 sähkön- ja lämmöntuotanto esimerkkiajanksolta. Kuvaajista nähdään kuinka esimerkkiajanjaksolla energiantuotanto vaihtelee tunneittain. Tuntikohtaiset tehon vaihtelut pohjautuvat halvimpaan tapaan tuottaa tarvittava määrä energiaa kullakin ajanhetkellä.

Kuvassa 23 näkyy eriteltyä kaikkien käytettyjen teknologioiden kulutus- ja tuotantokäyrät esimerkkiajankohdalta. Kuvassa violetilla värillä on esitetty energiaekosysteemin ulkopuolelta tuleva sähköteho kullakin ajanhetkellä. Sininen ja vaaleansiniset värit kuvastavat

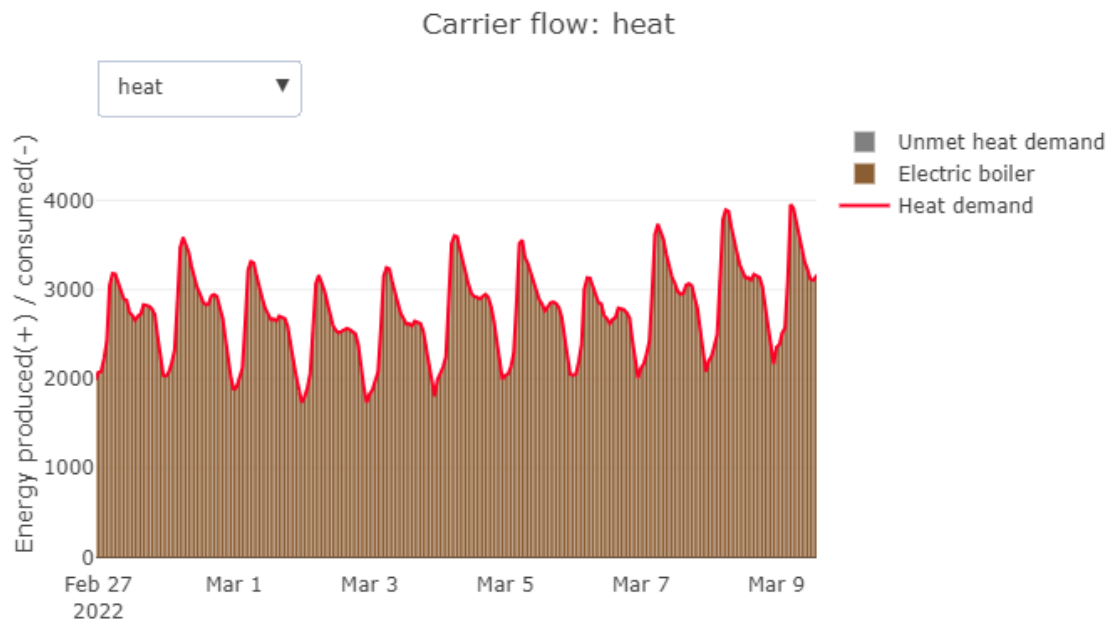
tuulivoiman tuotantoa ja tuulivoiman vientiä ulos energiaekosysteemistä. Keltaisella ja vaaleankeltaisella kuvataan aurinkovoiman tuotantoa ja sen vientiä ulos ekosysteemistä. Vihreällä vedyn elektrolyysiin kuluva sähköteho. Ruskella värillä näkyy sähkökattilan sähköteho ja kuvassa 24 on lämpöteho.



Kuva 23. Skenaarion 4. sähköntuotannon kuvaaja. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

Kuvassa 23 olevista sähkön tuotannosta tuulivoimalla tuotetaan 75 800 MWh/a, sähköä tuodaan alueelle 49 700 MWh/a ja aurinkoenergiaa tuotetaan 18 400 MWh/a. Tuulivoimalla tuotetaan noin puolet alueen tarvitsemasta energiasta ja sähkön tuonti on noin kolmas osa alueen tarvitsemasta energiasta.

Calliopen optimoimat tuotantolaitosten tehot on esiteltynä taulukossa 10. Taulukosta voi huomata ettei aurinkolämpövoimala ole kannattavaa. Tässä neljännessä skenaariossakin on kannattavampaa tuottaa sähköä ja lämmittää sähkökattilalla, kuin aurinkolämpövoimalalla lämmön tuottaminen.



Kuva 24. Skenaarion 4. lämmöntuotannon kuvaaja. (Y-akselilla yksikkönä kW ja x-akselilla yhden palkin leveys on yksi tunti)

Taulukko 10. Skenaarion 4. tuotantolaitosten tehot

	Teho
Tuulivoima	22 MW
Aurinkosähkö	15 MW
Sähköverkon huipputeho	19 MW
Sähkökattila	5 MW
Elektrolyysiteho	11 MW
Metaanin tuotantoa	7 MW

6 Vertailu

Skenaarioiden välisiä tarkasteluita varten käytetään Calliopen systeemin sisäistä elinkaaren ajalle tasoitettua kustannusta. Calliope laskee siihen arvoon teknologioiden kokonaiskustannukset ja kokonaistuoton koko elinkaaren ajalta, jolloin saadaan vertailukelpoinen hinta kilowattituntia kohden.

Taulukossa 11 on esitettynä kaikkien skenaarioiden ekosysteemin sisäinen hintavertailu niiden elinkaaren ajalle. Tuulivoimaloilla ja aurinkovoimaloilla on hieman korkean arvo, koska niiden myydyistä energiasta ei makseta. Myynnin hinnan rajoite mallissa on valittu sen takia, että saataisiin malleihin Calliope optimoimaan ekosysteemit tasapainoisiksi ilman massiivista sähkön vientiä.

Taulukko 11. Ekosysteemin sisäinen energiateknologioiden elinkaaren hintavertailu

€/MWh	Alkuperäinen	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4
Tuulivoima		69,1	69,1	69,1	69,1
Aurinkovoima		69,2	69,2	69,2	69,2
Verkkosähkö	151,3		168,5		95,1
Litiumakku					
A-CAES		2003		610,3	
Lämpövarasto		142,9		49,6	
Sähkökattila		35,3	31,2	44,2	31,2
Elektrolyysi				23,1	23,1
Metaanin synteesi				16,8	16,8

Lämmöntuotannossa Calliopen optimointi ei hyödyntänyt aurinkolämpöenergiaa yhdessäkään skenaariossa. Calliopen saavuttamissa ratkaisuissa aurinkoenergia kannattaa hyödyntää aina kokonaan sähköntuotantoon. Vaikka lämpöenergiaa olisi mahdollista tuottaa auringon energiasta, niin on kannattavampaa tuottaa energia sähköksi ja tuottaa lämpöä sähkökattilalla.

Taulukossa 12 on esiteltynä kaikkien skenaarioiden energian elinkaarikustannukset. Sähkön hinta on kaikissa skenaarioissa pienempi kuin nykytilanteessa, mutta lämmön hinta on merkittävästi korkeampi. Erityisesti skenaariossa 3, jossa varastoja on käytetty säätövoimana. Skenaariossa 3 on suuren varaston ja sähkövaraston heikomman hyötysuhteen takia merkittävästi korkeampi lämmön hinta. Skenaariossa 4 lämmön hinnan korkeaan arvoon liittyy riippuvuus sähkön hinnan vaihteluihin. Tuulettomina aikoina sähkön hinta on korkealla, jolloin sähkön hinta on korkeimmillaa ja alueen kulutus on hyvin vakio vuoden ympäri.

Taulukko 12. Energian elinkaaren hintavertailu ekosysteemissä

€/MWh	Alkuperäinen	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4
Lämpö	52,9	242,9	199,2	1823,3	1207,5
Sähkö	185,7	113,4	110,7	128,8	110,5
Vety				318,2	200,7
Metaani				397,8	250,9

Skenaarioiden vuotuiset investointikustannukset ovat taulukossa 13. Taulukossa on yksikkönä miljoonaa euroa per vuosi. Investoinneista huomataan selkeästi metaanin tuotannon aiheuttamat lisäkustannukset. Skenaarioilla 1 ja 2 ei investointikustannuksissa ole merkittävää eroa. Skenaarioilla 3 ja 4 on investointikustannuksilla ero noin 10 m€ vuodessa. Skenaarioiden 3 ja 4 välillä suurimman eron investointikustannuksiin tuo paineilmapavarasto ja tuulivoiman suurempi määrä.

Taulukko 13. Systemien investointien vuosikustannukset

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4
Tuulivoima	1,8 m€/a	1 m€/a	11 m€/a	4,9 m€/a
Aurinkovoima	28 000 €/a	62 000 €/a	1,2 m€/a	1,2 m€/a
A-CAES	69 000€/a		6 m€/a	
Lämpöakku	0,5 m€/a		0,28 m€/a	
Sähkökattila	0,39 m€/a	0,33 m€/a	0,5 m€/a	0,33 m€/a
Elektrolyyseri			1,4 m€/a	1,4 m€/a
Metanointilaitos			0,8 m€/a	0,8 m€/a

7 Johtopäätökset

Vierumäen alueelle suunnitellut tuulivoimalat ja aurinkovoimalat riittävät korvaamaan suurimman osan alueen energiantarpeesta ja niiden teho riittää hyvin energian varastointiin ja Vierumäen alueen kehittämiseen. Jos alueelle halutaan kehittää myös P2X-teknologioita, ei ole kannattavaa pyrkiä tuottamaan alueen sisällä kaikkea tarvittavaa energiaa tai kannattaa rajoittaa metaanin tuotantoa, jotta tuulivoimalat pystyvät vastaamaan paremmin vedyn ja metaanin tuotannon tarvitsemaa sähkön tarvetta.

Aurinkovoimalat ovat erityisen houkutteleva uusiutuvan energialähteen muoto suurille laitoille ja rakennuksille, koska usein suurten tehtaiden ja rakennusten katoilla on paljon ylimääräistä tilaa ja vuositasolla Suomen leveyspiireillä auringosta saa noin 800–1000 kWh per neliometri. Tuulivoimalat puolestaan ovat siitä houkuttelevia, etteivät ne tarvitse yhtä suurta pinta-alaa tuottamaan energiaa (MOTIVA 2022). On olemassa myös muita vähäpäästöisiä energian tuotantomuotoja, mutta tässä työssä keskitytään pääasiallisesti tuuli- ja aurinkovoimaloihin.

Alueelle kaavailut tuulivoimapuistot tuottaisivat alueelle merkittäviä määriä ylimääräistä energiaa, joka on myytävä verkkoon tai käytettävä alueella. Metaanin- ja vedyn tuotannot pystyisivät tasaamaan tuotannon piikkejä, mutta vaativat samalla myös pienen tuotannon ajalle sähköä. Metaanin tuotantoon alueella tarvitaan myös hiilidioksidin lähde. Alueella on saha, jossa on 40 MW edestä lämpökattiloita. Kattiloiden savukaasuvirrasta olisi mahdollista saada hiilidioksidia metaanin tuotantoon riittävästi.

Energianvarastoinnin avulla alueen on mahdollista päästä hiilidioksidivapaaseen energiaan. Varastoilla on myös suuret investointikustannukset. Rahalliset vaikutukset energiavarastoilla alueella on selkeästi hintoja nostava malleissa. Jos alueelle kehitetään myös metaanin tuotantoa, kannattaa alueelle asentaa huomattavasti suurempi määrä tuulivoimaa, kuin ilman metaanin tuotantoa. Malleissa tuulivoiman ylituotannon myyntihinta oli laitettu 0 €, jolloin alueelle ei tehty ylimääräisiä tuulivoimaloita. Kuitenkin reaali maailmassa tuulivoimalat voivat myydä sähköään ja se kasvattaa todennäköisesti asennettavaa kapasiteettia.

Skenaarioiden yhtenä heikkoutena on sähkön hinnan aikasarja, jota laskennassa käytetään. Laskennassa käytetään 2022 vuoden sähkön hintaa, joka vaihtelee ja on normaalia vuotta hieman korkeampi. Parempia tuloksia olisi saatavilla, jos samat skenaarioa tehtäisiin useilta vuosilta. Useat vuodet poistaisivat merkitystä yhden vuoden korkealle tai matalalle sähkön hinnalle. Kaikissa skenaarioissa taulukon 12 arvoissa hieman hintoja nostaa alueella käytetyn sähkön hinta. Useasti tuulivoimaa myydään pitkäaikaisilla sähkösopimuksilla, joissa hinta pysyy vakiona. Malleissa sähkön hinta on tuntikohtainen pörssihinta.

Mallien perusteella optimaalisin ratkaisu alueelle löytynee skenaarioiden 1 ja 2, jos alueella ei olla valmiita investoimaan heti suuria määriä metaanin valmistukseen. Kuitenkin investoinneissa suurin kuluerä on tuulivoimapuistot. Metaanin tuotanto vaatii toimiakseen hiilidioksidin talteenoton, vedyn tuotantoa ja itse metaanin tuotannon. Jos alueella ollaan valmiita investoimaan myös metaanin tuotantoon, niin optimaalinen ratkaisu 3 ja 4 skenaarioiden väliltä, jossa metaanin tuotannon määrä on optimoitu paremmin. Optimaalinen tila tarvitsee vedyn tuotannolle toimivan automatiikan ajamaan tuotantolaitosta vain kun tuulivoimaa on saatavilla ja systeemin on oltava valtakunnallisessa sähköverkossa kiinni. Ennen investointi päätöstä kannattaa tehdä tarkempi tutkimus, jossa huomioitaisiin myös sähkönmyynti ja sahalla olevat lämmistyskattilat mallissa.

Vedyn ja metaanin tuotanto alueella toisi myös ylimääräistä lämpöä, jota olis mahdollista käyttää kaukolämpönä. Hukkalämpö tiputtaisi näin ollen skenaarioiden 3 ja 4 lämmönhintaa. Tarkempaa tutkimusta voisi tehdä kaukolämpövaraston ja A-CAES järjestelmän yhdistelmästä. Kuinka paineilmaparaston lämpövarastoa voisi hyödyntää kaukolämmön varastoinnissa? Lämpövarastojen yhdistämisellä saattaisi olla molempia järjestelmiä tukevia yhteisvaikutuksia.

8 Yhteenveto

Teoriaosuudessa käsiteltiin yleisesti Vierumäelle soveltuvia energiavarastoja, P2X teknologioita ja erilaisia mallinnusmenetelmiä ja niihin soveltuvia työkaluja. Mallinnusmenelmissä selviteetiin työhön parhaiten soveltuva mallinnusmenetelmä ja työkalu. Mallinnustyökaluksi valikoitui Calliope. Jatkossa mallia ja sen teknologioita kehitetään projektin tietojen tarkentuessa, jolloin mallista saatavien arvojen tarkkuus paranee.

Tutkimuksen tavoitteena oli mallintaa ja havainnollistaa Vierumäen teollisuusalueen energiankulutus ja mahdollisuudet luoda uusiutuviin energialähteisiin tukeutuva energiaekosysteemi. Tuloksena saatiin nykytilalle ja neljälle eri uusiutuviin energialähteisiin pohjautuvat mallit. Mallien tarkkuuden parantaminen vaatisi seuraavaksi lisätutkimusta ja tarkempaa dataa, minkälaista projektia alueelle on oikeasti tulossa ja mitkä tahot ovat mukana järjestelmissä. Mallien tuotto- ja kustannuslaskelmat olisi hyvä tehdä myös pidemmälle aikavälille, jolloin yhden vuoden sähkönhinnan poikkeukset eivät vaikuttaisi lopputuloksiin suuresti.

Jatkotutkimuksena kannattaisi perehtyä tarkemmin energiavarastojen ja metaanin ja vedyn tuotannon synergioihin ja kaukolämpövaraston ja paineilmaparaston yhdistämiseen. Noiden teknologioiden yhdistämisestä olisi mahdollisia hyötyjä uusiutuviissa energiaekosysteemeissä.

Lähteet

- Ajanovic, Amela ja Reinhard Haas (2019). “On the long-term prospects of power-to-gas technologies”. *WIREs Energy and Environment* 8.1, e318. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.318>. eprint: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wene.318>. URL: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.318>.
- Bashiri Mousavi, Shadi et al. (2021). “Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials”. *Energy Conversion and Management* 243, s. 114379. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114379>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421005550>.
- Bui, Tuananh et al. (2023). “Techno-economic analysis of high-power solid oxide electrolysis cell system”. eng. *Energy conversion and management* 278, s. 116704–. ISSN: 0196-8904.
- C3S, Copernicus Climate Change Service (2023). *ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)*. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (viitattu 05.06.2023).
- Carmo, Marcelo et al. (2013). “A comprehensive review on PEM water electrolysis”. eng. *International journal of hydrogen energy* 38.12, s. 4901–4934. ISSN: 0360-3199.
- Castellani, Beatrice et al. (kesäkuu 2017). “Experimental Investigation on CO₂ Methanation Process for Solar Energy Storage Compared to CO₂-Based Methanol Synthesis”. *Energies* 10, s. 855. DOI: 10.3390/en10070855.
- CTCN (2023). *Compressed Air Energy Storage (CAES)*. URL: <https://www.ctc-n.org/technologies/compressed-air-energy-storage-caes> (viitattu 25.09.2023).
- Danila, Elena (lokakuu 2010). “HISTORY OF THE FIRST ENERGY STORAGE SYSTEMS”. Teoksessa: DOI: 10.13140/2.1.1564.7040.
- Dincer, Ibrahim ja Mehmet Ezan (lokakuu 2018). *Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems*. ISBN: 978-3-319-91893-8. DOI: 10.1007/978-3-319-91893-8.
- Divya, K.C. ja Jacob Østergaard (huhtikuu 2009). “Battery Energy Storage Technology for power systems-An overview”. *Electric Power Systems Research* 79, s. 511–520. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.09.017.
- Energiateollisuus (2022). *Kaukolämpötilasto*. URL: https://energia.fi/files/7475/Vuositaulukot_21_FI_paivitetty_30012023.xlsx (viitattu 01.06.2023).
- Energiavirasto (2018). *Kuormitusprofiilit*. URL: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Kuormitusprofiilit.xlsx/3fbf06a5-7126-2ddd-5c13-e777bcc81405> (viitattu 16.06.2023).

- Engineering, Fast (2015). *Top Down vs Bottom Up Engineering*. URL: http://www.fastengineering.com.au/single_post.php?id=Top%20Down%20vs%20Bottom%20Up%20Engineering (viitattu 06.07.2023).
- ENTSO-e (2023). *Central collection and publication of electricity generation, transportation and consumption data and information for the pan-European market*. URL: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show> (viitattu 17.08.2023).
- Erdem, Emre (2021). “Why P2X must be the part of the energy solution?” eng. *Environmental progress & sustainable energy* 40.3. ISSN: 1944-7442.
- Eroaverkosta (2023). *Eroa verkosta*. URL: <https://eroaverkosta.com/> (viitattu 16.05.2023).
- ESA (2023). *Why Energy Storage, technologies, Batteries*. URL: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/solid-electrode-batteries/> (viitattu 16.05.2023).
- Euroopan komissio, EC (2023). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (viitattu 26.06.2023).
- European Commission, EC (2020). *A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU_Hydrogen_Strategy.pdf.pdf (viitattu 29.05.2023).
- FCG, Finnish Consulting Group OY (2022). *Päijät-Hämeen tuulivoimaseelvitys*. URL: https://paijat-hame.fi/wp-content/uploads/2022/12/Raporttiluonnos_19122022.pdf (viitattu 16.06.2023).
- Forest Research, s (2023). *Carbon emissions of different fuels*. URL: <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/carbon-emissions-of-different-fuels/> (viitattu 18.08.2023).
- Garcia-Garcia, Guillermo et al. (2021). “Analytical Review of Life-Cycle Environmental Impacts of Carbon Capture and Utilization Technologies”. *ChemSusChem* 14.4, s. 995–1015. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202002126>. eprint: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cssc.202002126>. URL: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.202002126>.
- Götz, Manuel et al. (2016). “Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review”. *Renewable Energy* 85, s. 1371–1390. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301610>.
- H2 (2019). *What exactly is power-to-X?* URL: <https://h2-international.com/2019/06/03/what-exactly-is-power-to-x/> (viitattu 31.05.2023).
- Hailu, Getu (marraskuu 2018). “Seasonal Solar Thermal Energy Storage”. Teoksessa: ISBN: 978-1-78985-417-6. DOI: 10.5772/intechopen.79576.

- He, Wei ja Jihong Wang (2018). “Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 87, s. 77–95. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300170>.
- Hellwig, Mark (2003). “Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile”. LEHRSTUHL IM INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK, TU MÜNCHEN.
- Hersbach, H et al. (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (viitattu 05.06.2023).
- Hesse, Holger et al. (joulukuu 2017). “Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids”. *Energies* 10. DOI: 10.3390/en10122107.
- Hietala, Riku (2021). “SÄHKÖKÄYTTÖINEN KAUKOLÄMPÖLAITOS”. Oulun ammattikorkeakoulu.
- IAEA (2019). *Adapting the Energy Sector to Climate Change*. Non-serial Publications. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ISBN: 978-92-0-100919-7. URL: <https://www.iaea.org/publications/12338/adapting-the-energy-sector-to-climate-change>.
- Ibrahim, H., A. Ilinca ja J. Perron (2008). “Energy storage systems—Characteristics and comparisons”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12.5, s. 1221–1250. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>.
- Ilmatieteenlaitos (2023). *Havaintojen lataus-palvelu*. URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (viitattu 17.08.2023).
- Jesse, Bernhard-Johannes et al. (2020). “Potential for Optimization in European Power Plant Fleet Operation”. eng. *Energies (Basel)* 13.3, s. 718–. ISSN: 1996-1073.
- Jiang, Hao et al. (2022). “Biological methanation of H₂ and CO₂ in a continuous stirred tank reactor”. *Journal of Cleaner Production* 370, s. 133518. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133518>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622030980>.
- Jubeh, Naser M. ja Yousef S.H. Najjar (2012). “Green solution for power generation by adoption of adiabatic CAES system”. *Applied Thermal Engineering* 44, s. 85–89. ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112002360>.
- King, Marcus et al. (2021). “Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, s. 110705. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110705>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121000022>.

- Lee, Seockyong, Ung Jin Na ja HangJin Jo (2023). “Techno-economic assessment of green hydrogen production via two-step thermochemical water splitting using microwave”. *International Journal of Hydrogen Energy* 48.29, s. 10706–10723. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.119>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922058359>.
- Liu, Gang et al. (2022). “Thermo-Economic Assessments on a Heat Storage Tank Filled with Graded Metal Foam”. English. *Energies* 15.19, s. 7213. URL: <https://ezproxy.cc.lut.fi/scholarly-journals/thermo-economic-assessments-on-heat-storage-tank/docview/2724242388/se-2>.
- Lyden, Andrew, Russell Pepper ja Paul Tuohy (helmikuu 2018). “A modelling tool selection process for planning of community scale energy systems including storage and demand side management”. *Sustainable Cities and Society* 39. DOI: 10.1016/j.scs.2018.02.003.
- Mahon, Harry et al. (2022). “A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops”. eng. *Energy (Oxford)* 239, s. 122207–. ISSN: 0360-5442.
- Megia, Pedro J et al. (syyskuu 2021). “Hydrogen Production technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review”. *Energy & Fuels* 35. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02501.
- Michael Sterner, Ingo Stadler (2019). *Handbook of Energy Storage Demand, Technologies, Integration*. eng. 1st ed. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783662555040.
- Mikkonen, Anni (2020). *Suomen tuottavimmat tuulivoimalat tuottivat lähes 50 % hyötysuhteella*. URL: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/suomen-tuottavimmat-tuulivoimalat-tuottivat-lahes-50-hyotysuhteella> (viitattu 16.05.2023).
- Minke, Christine et al. (2021). “Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis?” *International Journal of Hydrogen Energy* 46.46, s. 23581–23590. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.174>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921016219>.
- Mongird, K Fotedar V Viswa Nathan V Koritarov V Balducci P Hadjerioua B Alam J (2019). “Energy Storage Technology and Cost Characterization Report”. *Hydrowires*.
- Morgan, Robert et al. (2015). “Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant”. *Applied Energy* 137, s. 845–853. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.109>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914008009>.
- MOTIVA (2022). *Auringonsäteilyn määrä Suomessa*. URL: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa (viitattu 16.05.2023).

- Naimi, Youssef ja Amal Antar (2018). “Hydrogen Generation by Water Electrolysis”. Teok-
sessa: *Advances In Hydrogen Generation Technologies*. Toim. Murat Eyvaz. Rijeka: In-
techOpen. Luku 1. DOI: 10.5772/intechopen.76814. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76814>.
- Nami, Hossein et al. (2022). “Techno-economic analysis of current and emerging electro-
lysis technologies for green hydrogen production”. *Energy Conversion and Management*
269, s. 116162. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116162>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422009438>.
- Nasser, Mohamed et al. (2022). “A review of water electrolysis-based systems for hydro-
gen production using hybrid/solar/wind energy systems”. eng. *Environmental science and
pollution research international* 29.58, s. 86994–87018. ISSN: 0944-1344.
- Ni, Meng, Michael K.H. Leung ja Dennis Y.C. Leung (2008). “Technological development of
hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)”. eng. *International journal
of hydrogen energy* 33.9, s. 2337–2354. ISSN: 0360-3199.
- NV5 (2022). *A Brief History of Energy Storage?* URL: <https://www.nv5.com/news/a-brief-history-of-energy-storage/> (viitattu 01.06.2023).
- OEMOF, Group (2023). *Open Energy Modelling Framework (oemof)*. URL: <https://github.com/oemof/oemof> (viitattu 05.06.2023).
- Opolot, Michael et al. (2022). “A review of high temperature (≥ 500 °C) latent heat thermal
energy storage”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 160, s. 112293. ISSN: 1364-
0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112293>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122002118>.
- Pakere, Ieva, Dace Lauka ja Dagnija Blumberga (huhtikuu 2018). “Solar power and heat
production via photovoltaic thermal panels for district heating and industrial plant”. *Energy*
154. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.138.
- Patcharavorachot, Yaneeporn et al. (2023). “Comparative energy, economic, and environ-
mental analyses of power-to-gas systems integrating SOECs in steam-electrolysis and co-
electrolysis and methanation”. *Thermal Science and Engineering Progress* 42, s. 101873.
ISSN: 2451-9049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101873>. URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904923002263>.
- Peng, Xiaodong et al. (2018). “Thermodynamic study on the effect of cold and heat recovery
on performance of liquid air energy storage”. *Applied Energy* 221, s. 86–99. ISSN: 0306-
2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.151>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304963>.
- Pfenninger, Stefan ja Bryn Pickering (2018). “Calliope: a multi-scale energy systems model-
ling framework”. *Journal of Open Source Software* 3.29, s. 825. DOI: 10.21105/joss.
00825. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.00825>.

- Polar Night Energy, PLE (2023). *Store Wind and Solar Power as Heat in Sand*. URL: <https://polarnightenergy.fi/technology> (viitattu 16. 08. 2023).
- Ringkjøb, Hans-Kristian, Peter M. Haugan ja Ida Marie Solbrekke (2018). “A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96, s. 440–459. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305690>.
- Rönsch, Stefan et al. (2016). “Review on methanation – From fundamentals to current projects”. *Fuel* 166, s. 276–296. ISSN: 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.111>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236115011254>.
- Tenhumberg, Nils ja Karsten Büker (2020). “Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies”. eng. *Chemie ingenieur technik* 92.10, s. 1586–1595. ISSN: 0009-286X.
- Tilastokeskus (2023). *energian hankinta ja kulutus*. URL: <https://stat.fi/tilasto/ehk> (viitattu 29. 05. 2023).
- Tiskatine, R. et al. (2017). “Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants”. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 169, s. 245–257. ISSN: 0927-0248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.033>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024817302520>.
- TWI (2020). *How Long do Wind Turbines Last?* URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/how-long-do-wind-turbines-last> (viitattu 16. 05. 2023).
- Tyler Steehly, Patrick Duffy (2022). *2021 Cost of Wind Energy Review*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84774.pdf> (viitattu 16. 05. 2023).
- Vecchi, Andrea et al. (2021). “Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives”. *Advances in Applied Energy* 3, s. 100047. ISSN: 2666-7924. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100047>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792421000391>.
- Wan, Billy (2004). *Energy density of methane*. URL: <https://hypertextbook.com/facts/2004/BillyWan.shtml> (viitattu 17. 08. 2023).
- Wang, Jidai et al. (heinäkuu 2017). “Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development”. English. *Energies* 10.7.
- Wang, Zhi, Gong Gong ja Zhan-Cheng Guo (elokuu 2014). “The Intensification Technologies to Water Electrolysis for Hydrogen Production — A Review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, s. 573–588. DOI: 10.1002/chin.201433287.
- Xiong, Lue ja Mutasim Nour (helmikuu 2019). “Techno-Economic Analysis of a Residential PV-Storage Model in a Distribution Network”. English. *Energies* 12.16. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1965845019300000>.

//ezproxy.cc.lut.fi/scholarly-journals/techno-economic-analysis-residential-pv-storage/docview/2317017655/se-2.

- Yang, Tianrun et al. (2021). “Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, s. 110732. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110732>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121000290>.
- Ympäristöministeriö (2022). *IPCC:n raportti: Nykyiset toimet eivät riitä ilmaston lämpenemisen rajaamiseen 1,5 asteeseen – tehokkaat päästövähennykset välttämättömiä jo seuraavan vuosikymmenen aikana*. URL: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/ipcc-n-raportti-nykyiset-toimet-eivat-riita-ilmaston-lampenemisen-rajaamiseen-1-5-asteeseen-tehokkaat-paastovahennykset-valttamattomia-jo-seuraavan-vuosikymmenen-aikana> (viitattu 30.05.2023).
- Zakeri, Behnam ja Sanna Syri (2016). “Corrigendum to “Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis” [Renew. Sustain. Energy Rev. 42 (2015) 569–596]”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, s. 1634–1635. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.095>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010655>.
- Zauner, Andreas et al. (2019). “Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimization, Analysis on future technology options and on techno-economic optimization”. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c58ae3ff&appId=PPGMS>.