

Kaustisen seutukunta KASE ESSI – TP3 Suuri energiavarasto: Erilaisten casejen esittely konseptitasolla

Loppuraportti

4.9.2025

Vastuhenkilö: Iko Järnberg, iko.jarnberg@despro.fi

Selvitys on osa KASE ESSI hanketta, jonka rahoittajina toimivat 90% Leader Purityiset ja 10% yksityiset yritykset



Euroopan unionin
osarahoittama

Sisältö

1. Johdanto
2. Teknologia katsaus
 - ✓ P2X: Vedyn ja metaanin tuotantoprosessit
 - ✓ Sähkövarastot
3. Case-esimerkit
 - ✓ Case 1: P2X esimerkkilaskelma
 - Aurinkovoimalaitos 50 MW, elektrolyyseri 50 MW, vedyntuotanto, sähkövarasto
 - ✓ Case 2: Pieni standalone-akku
 - Sähkövarasto 1MW/2MWh
 - ✓ Case 3: Suuri standalone-akku
 - Sähkövarasto 50MW/50MWh
 - ✓ Case 4: Suuri co-located akku
 - Sähkövarasto 50MW/50MWh, tuulivoimalaitos 150 MW
4. Yhteenveto

1. Johdanto

TP3 Suuri energiavarasto: Erilaisten casejen
esittely konseptitasolla

TP3 Suuri energiavarasto: Erilaisten casejen esittely konseptitasolla

Tämä selvitys käsittelee Kaustisen seutukunnan KASE ESSI –projektia ja työpakettia 3: Suuren mittakaavan sähkövaraston mahdollisuudet hankealueella: <https://kaustisenseutu.fi/kaustisen-seutukunta/hanketoiminta/omat-hankkeet/kase-essi/>

Selvityksen tavoitteena on tarjota kattava katsaus eri P2X-prosesseihin ja sähkövarastoratkaisuihin sekä niiden käyttötarkoituksiin. Projektin loppuraportti esittelee neljä erilaista case-esimerkkiä, jotka havainnollistavat P2X-prosesseja sekä energiavarastojen potentiaalia ja niiden roolia tulevaisuuden energiajärjestelmissä.

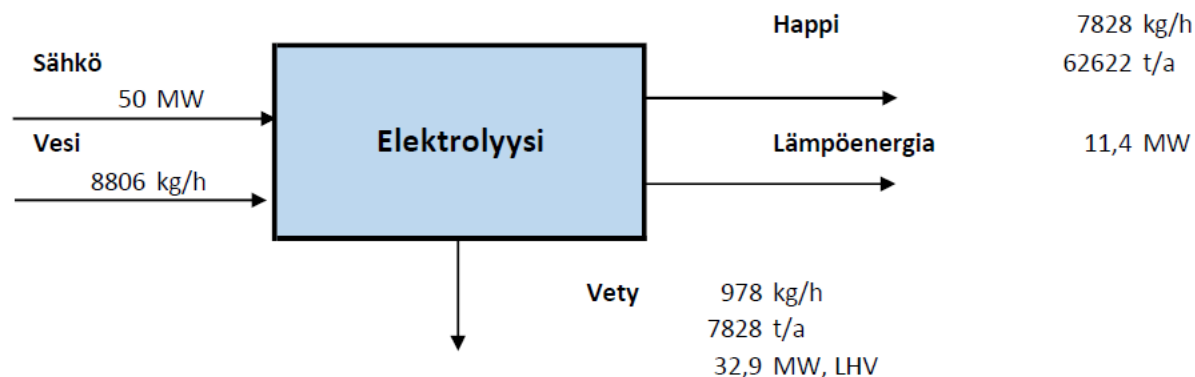
Selvityksen on laatinut Despro Engineering Oy. Työstä vastasi Iko Järnberg ja asiantuntijana toimi lisäksi Harri Enwald (QND Nokia Oy).

2. Teknologia- katsaus

P2X: Vedyn ja metaanin tuotantoprosessit
Sähkövarastot

P2X - Vedyn tuotanto elektrolyysillä

- ✓ Vesi hajotetaan tasavirralla elektrolyyttiliuoksessa, sivutuotteena syntyy happea
 - ✓ $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
 - ✓ Tasasuuntaajat
- ✓ Tuotetun vedyn energiasisältö on noin 65 % käytetyn sähkön energiasisällöstä, ylijäämäenergia muuttuu lämmöksi
- ✓ Sivutuotteena syntyy happea



Esimerkki elektrolyysin päätaseesta, sähköteho 50 MW, 8400 h/a

P2X – Elektrolyysiprosessit

Alkaalitekhnologia

- ✓ Kypsää teknologiaa
- ✓ Alkaaliliuos elektrolyytinä, tyypillisesti kaliumhydroksidi (KOH)
- ✓ Alhainen CAPEX verrattuna vaihtoehtoisin prosesseihin
- ✓ Prosessilämpötila tyypillisesti 50 – 80 °C
 - ✓ Korkeampi prosessilämpötila mahdollistaa paremmin lämpöenergian talteen oton
- ✓ Paineettomat ja paineelliset prosessit, paine 0-40 barg
 - ✓ Vedyn komprimointitarve pienempi paineellisessa prosessissa

PEM

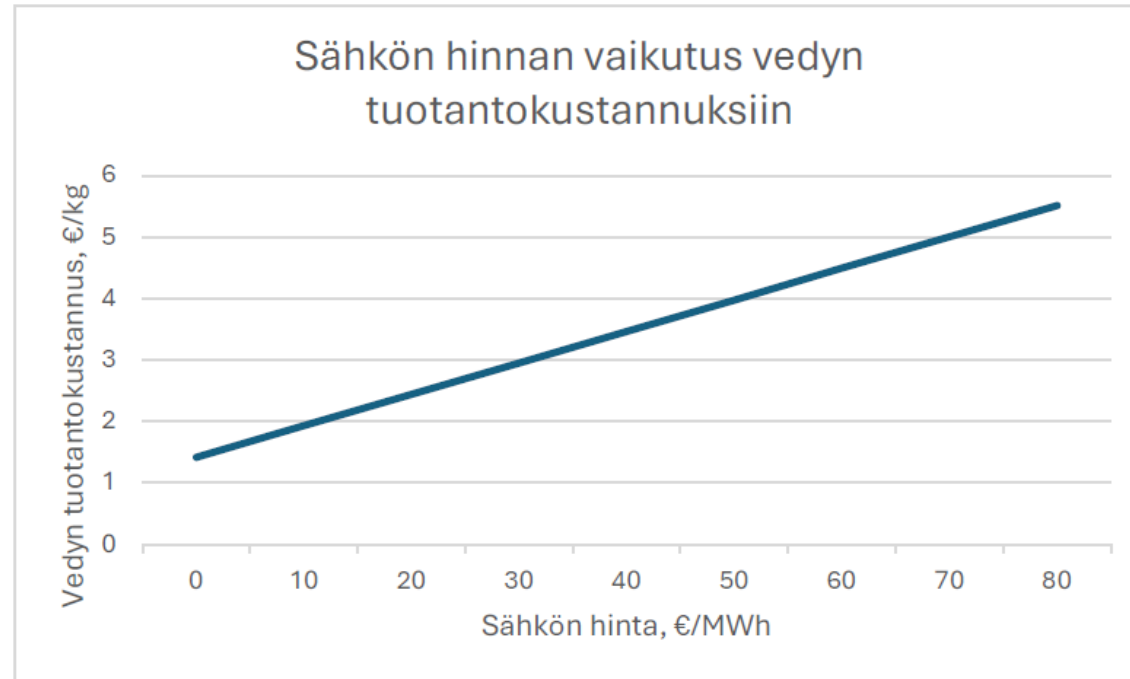
- ✓ Pienempi tilantarve
- ✓ Yleensä korkeampi CAPEX, kuin alkaliprosessilla
 - ✓ Kalliit materiaalit
- ✓ Erittäin nopeat kuormitusvaihtelut mahdollisia
- ✓ Yleensä pienempi saanto
- ✓ Kennostojen käyttöikä usein lyhyempi
 - ✓ Herkkä epäpuhtauksille
- ✓ Prosessilämpötila tyypillisesti 50 – 80 °C
 - ✓ Korkeampi prosessilämpötila mahdollistaa paremmin lämpöenergian talteen oton
- ✓ Paineettomat ja paineelliset prosessit, paine 0-35 barg
 - ✓ Vedyn komprimointitarve pienempi paineellisessa prosessissa

SOEC (kiinteään oksidiin perustuva elektrolyysi)

- ✓ Prosessi vielä kehitysasteella
- ✓ Energiatehokas, kun korkealämpöistä lämpöenergiaa saatavilla
- ✓ Prosessilämpötilat korkeita, tyypillisesti 650 – 1000 °C
- ✓ Melko pieni paine, noin 2 barg

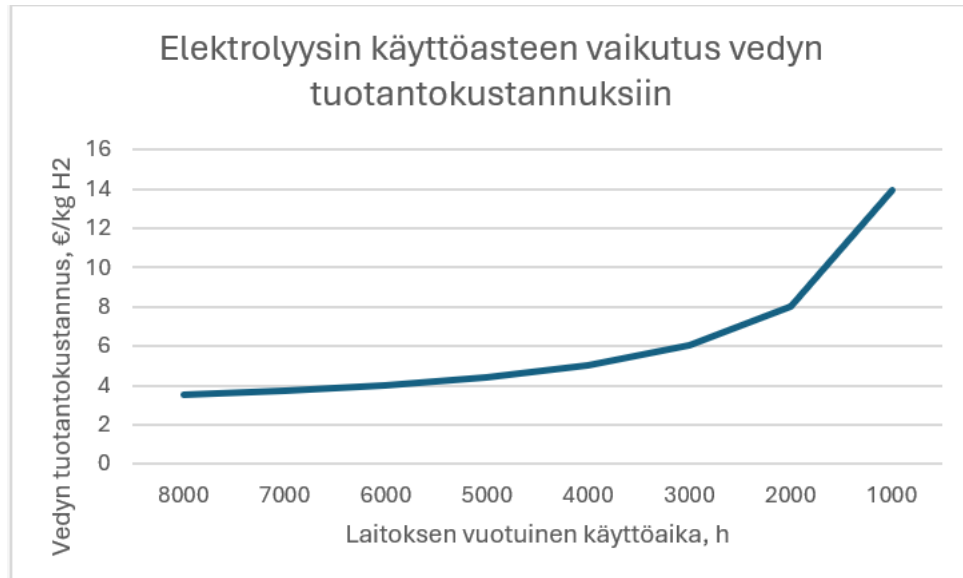
P2X - Vedyn tuotantokustannuksen riippuvuus sähkön hinnasta

- ✓ Vedyn tuotantokustannus on voimakkaasti riippuvainen sähkön hinnasta



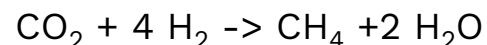
P2X - Vedyn tuotantokustannuksen riippuvuus elektrolyysin käyttöasteesta

- ✓ Elektrolyysiprosessin investointikustannus on niin korkea, että vetytuotannon keskittäminen vain kaikkein halvimmille sähkön hinnoille ei ole kannattavaa. Tuotantoa kalleimpien tuntien aikana voidaan kuitenkin rajoittaa.

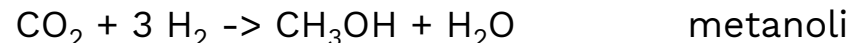


P2X - e-metaani

- ✓ Hiilidioksidista voidaan tuottaa metaania käyttämällä vetyä energian kantajana



- ✓ Tuotetun metaanin energiasisältö on noin 83 % reaktiossa käytetyn vedyn energiasisällöstä
 - ✓ Kun huomioidaan elektrolyysin hyötysuhde vedyn tuotannossa, tuotetun metaanin energiasisältö on noin puolet elektrolyysiin käytetyn sähkön energiasisällöstä
- ✓ Tuotettu metaani sisältää yleensä jonkin verran (1-5%) vetyä
 - ✓ Vety voidaan erottaa ja palauttaa metanointiprosessiin
- ✓ Myös muiden kemikaalien ja polttoaineiden, kuten alkoholien, valmistus hiilidioksidista ja vedystä on mahdollista



P2X - e-metaanin tuotantoteknologiat

✓ Katalyyttiset prosessit

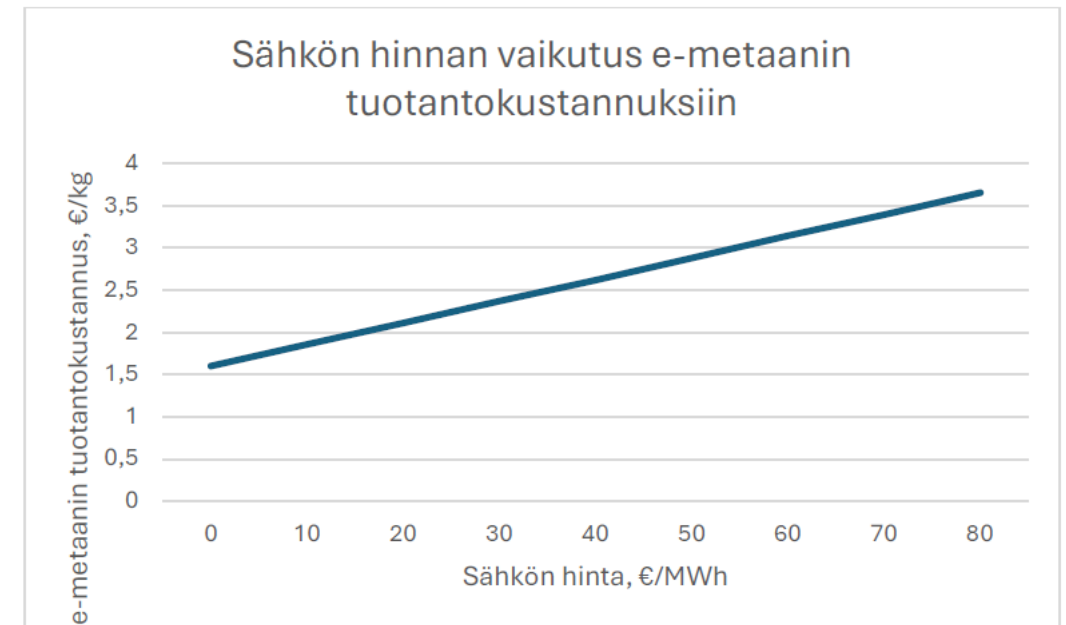
- ✓ Vaatii syötteenksi varsin puhtaan vedyn ja hiilidioksidin
- ✓ Korkea lämpötila ja paine
 - ✓ Ylijäämälämpö talteen otettavissa korkeassa lämpötilassa esim. höyrynä
- ✓ Jätevesi varsin puhdasta, jopa kierrätys elektrolyysin syöttövedeksi mahdollista

✓ Biologiset prosessit

- ✓ Kestävät varsin hyvin epäpuhtauksia syötössä
 - ✓ Lopputuotteen puhdistus voi olla vaativaa
- ✓ Alhainen prosessilämpötila, noin 65 °C
 - ✓ Syntyvän lämpöenergian hyödyntäminen vaatii yleensä lämpöpumppuja
- ✓ Jätevesi sisältää jonkin verran orgaanisia aineita

P2X - E-metaanin tuotantokustannuksen riippuvuus sähkön hinnasta

- ✓ E-metaanin tuotantokustannus on voimakkaasti riippuvainen sähkön hinnasta
- ✓ Vedyn tuotanto on lähtökohtaisesti aina riittävä metanointiin, jolloin käyttöaste aina korkea
 - ✓ Mahdollisen vedyn varastoinnin kannattavuus tulee selvittää tapauskohtaisesti



P2X – Hiilidioksidin lähteet

- ✔ Fossiilisperäiset lähteet
 - ✔ Voimalaitokset
 - ✔ Maakaasun höyryreformointi vedyn tuotannossa
- ✔ Bioetanolilaitokset
 - ✔ Varsin puhdas hiilidioksidi etanolikäymisen sivutuotteena
- ✔ Biokaasulaitokset
 - ✔ Biokaasusta noin 60% on metaania ja noin 40 % hiilidioksidia
 - ✔ Biokaasu soveltuu metanointiprosessin syötteeksi, metaani inerttinä prosessin läpi
 - ✔ Erillistä hiilidioksidin erotusprosessia ei tarvita
- ✔ Biomassaa polttavat laitokset
 - ✔ Selluteollisuus, soodakattilat, meesauuni
 - ✔ Tasainen jatkuva tuotanto, meesauunista korkeahko (yli 20 %) hiilidioksidipitoisuus savukaasussa
 - ✔ Lämmön ja sähkön tuotanto
 - ✔ Yleensä kausiluontoinen tuotanto
 - ✔ Kaukolämmön tuotanto sähköllä, kun sähkö on edullista
 - ✔ Jätevoimalat
 - ✔ Tasainen jatkuva tuotanto
 - ✔ Merkittävä osa syntyvästä hiilidioksidista ei biogeenistä
- ✔ Hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmasta
 - ✔ Toistaiseksi varsin kallis prosessi

P2X - Hiilidioksidin talteenottoteknologiat

- ✓ Amiinipesu
 - ✓ Kypsä teknologia
 - ✓ Vähäiset amiinipäästöt mahdollisia
 - ✓ Korkea lämpöenergian kulutus
 - ✓ Ylijäämälämpö pääosin varsin alhaisessa lämpötilassa, hyödyntäminen vaatii lämpöpumppuja
- ✓ Karbonaattiprosessi
 - ✓ Ei höyryn tarvetta sidotun hiilidioksidin vapauttamisessa, energiatehokas
 - ✓ Hyvä potentiaali ylijäämälämmön hyödyntämiseen
 - ✓ Vain vähän päästöjä ympäristöön
 - ✓ Saanto yleensä alempi kuin amiiniprosessilla
- ✓ Kryogeeniset prosessit
 - ✓ Soveltuvat parhaiten, kun syötön hiilidioksidipitoisuus on korkea (yli 15 %)
- ✓ Membraaniprosessit
 - ✓ Toistaiseksi korkea investointikustannus ja alhainen tuotepuhtaus
- ✓ Vesipesu
 - ✓ Korkea sähkönkulutus, korkeahko investointikustannus

P2X - Hiilidioksidin talteenoton tase-esimerkki, amiinipesu

- ✓ Syöttö savukaasu, 15 000 t/a CO₂, CO₂ -pitoisuus 10 vol -%
 - ✓ Noin 1790 kg/h CO₂, kun 8400 h/a
- ✓ Lämpöenergian tarve (höyry, 140 °C) noin 1 600 kW, noin 13 400 MWh/a
- ✓ Jäähdytysvesi sisään 30 °C, ulos 50 °C, noin 65 m³/h
 - ✓ Noin 500 kW lämpöenergiaa talteen otettavissa korkeammassa lämpötilassa (noin 80 °C), vaatii prosessin räätälöintiä
- ✓ Sähkön kulutus noin 60 kW, ei sisällä savukaasun tai hiilidioksidin paineistusta
- ✓ Talteen otettu CO₂ noin 1680 kg/h, noin 14 100 t/a
 - ✓ Talteenottoaste noin 94%
 - ✓ Kylläinen veden suhteen
- ✓ Taseluvut voivat poiketa huomattavasti esitetystä riippuen laitostoimittajasta ja prosessille asetetuista vaatimuksista

P2X – Hiilidioksidin talteenoton kustannus

✓ Syöttö savukaasu, 15 000 t/a CO₂, CO₂ –pitoisuus 10 vol -%

✓ Talteen otettu hiilidioksidi noin 14 100 t/a

✓ Pääomakustannus 963 k€/a 68,3 €/t CO₂

✓ CAPEX –arvio 10 M€ (suuruusluokka)

✓ Kuoletusaika 15 a

✓ Korko 5 %

✓ Lämpöenergia (höyry) 13 400MWh/a, 50 €/MWh 670 k€/a 47,5 €/t CO₂

Muut kulut (kunnossapito, vesi, työvoima ym.) 500 k€/a 35,5 €/t CO₂

Yhteensä 2 133 k€/a 151,3 €/t CO₂

✓ Mahdollisia ylijäämälämmön tuotannosta saatavia tuloja ei huomioitu

✓ Talteenoton kustannus voi olla huomattavasti alempi isommalla laitospasiteetilla ja jos edullista lämpöenergiaa on saatavilla

P2X - E-metaanituotannon ympäristövaikutukset

- ✓ Metaani- ja vetypäästöt ilmaan
 - ✓ Lähtökohtaisesti suljetut prosessit, satunnaispäästöt mahdollisia
 - ✓ Vety ei ole myrkyllistä, eikä pilaa maaperää tai ilmaa
 - ✓ Metaani on merkittävä kasvihuonekaasu, myös vety on reaktiotuotteittensa takia ns. epäsuora kasvihuonekaasu
- ✓ Päästöt hiilidioksidin talteenotosta
 - ✓ Amiinipäästöt
- ✓ Jätevedet
 - ✓ Jätevesikuormitus varsin pieni
 - ✓ Veden puhdistus elektrolyysiin, varsin puhdas jätevesi
 - ✓ Vesi metanoinnista
 - ✓ Mahdolliset katalyyttijäämät katalyyttisestä metanoinnista
 - ✓ Metabioliatuotteet biologisesta metanoinnista

P2X - e-metaanituotannon riskit

✓ Poliittiset riskit

- ✓ Tuotantokustannus ylittää selvästi maakaasun hinnan ->riippuvuus regulaatiosta
 - ✓ Regulaatio voi muuttua laitoksen käyttöaikana
- ✓ Maariski, merkittävä osa elektrolyysilaitteistojen tuotannosta Kiinassa

✓ Tuotantokustannuksen voimakas riippuvuus sähkön hinnasta

✓ Markkinariski

- ✓ Laitteistojen kasvava kysyntä voi johtaa korkeisiin hintoihin ja pitkiin toimitusaikoihin
- ✓ Laitteistohintojen lasku tulevaisuudessa voi syödä kannattavuutta kilpailijoihin verrattuna
- ✓ Vaihtoehtoiset polttoaineet ja energialähteet voivat jatkossa osoittautua kilpailukykyisimmiksi
 - ✓ Sähkö, metanoli

✓ Tekniset riskit

- ✓ Syttyvien kaasujen käsittely
 - ✓ vety, metaani, palo- ja räjähdysvaara
 - ✓ happi voi kiihdyttää tulipaloja
- ✓ Uudet teknologiat, teknologiariski

P2X – Vedyn varastointi ja kuljetus

- ✓ Vedyn varastointi ja kuljetus ovat teknisesti vaativia ja kalliita prosesseja
 - ✓ Vedyn suuri ominaistilavuus, vety on kevein kaikista aineista
 - ✓ Tarve paineistaa vety varastotilavuuden ja putkikoon pienentämiseksi
 - ✓ Vedyn pieni molekyylikoko, vuotaa helposti
 - ✓ Syttyy helposti vuotaessaan, vaikeasti havaittavissa oleva näkymätön liekki
 - ✓ Vedyn aiheuttama materiaalien haurastuminen
- ✓ Suurien vetymäärien varastointiin on esitetty esimerkiksi vanhoja suolakaivoksia, Suomessa laajamittainen vedyn varastointi voisi tapahtua vuoratuissa kallioluolissa
 - ✓ Myös korkeapaineiset putkivarastot mahdollisia, mutta kalliita
- ✓ Pienessä mittakaavassa vetyä voidaan varastoida paineellisissa terässäiliöissä tai korkeapaineisissa komposiittipulloissa, paine jopa 700 bara
- ✓ Suuresta ominaistilavuudesta huolimatta vedyn putkikuljetuksella voidaan siirtää valtavia energiamääriä
- ✓ Vedyn varastointi ja kuljetus nestemäisenä on teknisesti mahdollista, mutta kallista
 - ✓ Vedyn kiehumispiste -253 °C -> kallis ja energiatappioita aiheuttava nesteytysprosessi
 - ✓ Kuljetus nesteinä voi tulla isossa mittakaavassa kyseeseen laivakuljetuksissa

P2X – Hiilidioksidin varastointi ja kuljetus

- ✓ Hiilidioksidi on varsin helposti nesteytettävissä
 - ✓ Korkea CAPEX ja OPEX
 - ✓ Hiilidioksidin varastointi nesteenä, hyvä varastointikapasiteetti
 - ✓ Nesteytetyn hiilidioksidin kuljetus autolla/junalla
 - ✓ Laaja asiakaskunta mahdollinen
 - ✓ Nesteytetyn hiilidioksidin kuljetus putkissa
- ✓ Kuljetus paineistettuna kaasuna putkessa
 - ✓ Alhainen OPEX
 - ✓ Putken luvitus voi olla ongelmallista
 - ✓ Huono varastointikapasiteetti
- ✓ Kuljetus dense phase –muodossa
 - ✓ Käytetään suurien määrien kuljetuksiin isoilla etäisyyksillä, esim. Amerikan öljykentät

P2X - Ylijäämälämmön hyödyntäminen e-metaanituotannossa

- ✓ Merkittäväosa prosessissa käytetyn sähkön energiasisällöstä muuttuu lämmöksi
 - ✓ Vedyn elektrolyysi, noin 1/3 sähkön energiasisällöstä lämmöksi
 - ✓ Metanointi, noin 1/6 vedyn energiasisällöstä lämmöksi
 - ✓ Myös hiilidioksidin talteenotossa ja metaanin nesteytyksessä syntyy ylijäämälämpöä
- ✓ Elektrolyysiprosesseja ei usein ole suunniteltu lämmön talteenottoa huomioiden
 - ✓ Ylijäämälämpö jäähdytysveteen, esim. 25 °C sisään, 35 -40 °C ulos
 - ✓ Ylijäämälämmön hyödyntäminen vaatii lämpöpumppuja. Investointi lämpöpumppuihin ei usein ole kannattavaa, jos lämmön tarve on kausiluontoinen, kuten kaukolämpötuotannossa.
 - ✓ Korkea lämpötila (esim. 80 °C) elektrolyysissä parantaa lämmön talteenottomahdollisuuksia
 - ✓ Prosessi voidaan räätälöidä lämmön talteenottoon esim. 70 °C vetenä, jota voidaan hyödyntää kaukolämpötuotannossa ilman lämpöpumppuja
- ✓ Katalyyttisessä metanoinnissa höyryn tuotanto ylijäämälämmöstä mahdollinen
 - ✓ Voidaan hyödyntää esim. hiilidioksidin talteenoton lämmön lähteenä
- ✓ Lämmön talteenoton kannattavuus aina tapauskohtainen
 - ✓ Ideaalitapauksessa jatkuva tarve lämmölle melko alhaisessa lämpötilassa (esim. alle 80 °C).

P2X – Metaanin varastointi ja kuljetus

- ✓ Metaani on melko helposti nesteytettävissä, kiehumispiste noin $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ✓ Pieniä määriä metaania voidaan esimerkiksi biokaasulaitoksilla varastoida alhaisessa paineessa säiliöissä
- ✓ Kuljetusta varten metaani tulee normaalisti paineistaa korkeaan paineeseen tai nesteyttää
 - ✓ Maakaasuputkissa paine Suomessa tyypillisesti 30 – 54 bara, Baltic Connector kaasuputken suunnittelupaine 80 bara
 - ✓ Alemmat paineet (usein alle 10 bara) paikallisissa jakeluverkoissa ja biokaasun siirtoputkissa
 - ✓ Autokuljetus paineistetuissa pulloissa, paine jopa 300 bara
 - ✓ Nesteytetyn metaanin kuljetus putkessa ja autossa

P2X - e-metaanituotannon sijaintiin vaikuttavat tekijät

- ✓ Edullisen uusiutuvan sähkön saatavuus
 - ✓ Aurinkovoima, tuulivoima
 - ✓ Omalla tuotannolla voi olla mahdollisuus välttää osittain sähkön siirtomaksu
 - ✓ Sähköverkon riittävä siirtokapasiteetti
- ✓ Mahdollisuus tuoda uusiutuvaa vetyä, esim. vedyn runkolinjan läheisyys
- ✓ Edullinen, mahdollisimman jatkuva, biogeenisen hiilidioksidin lähde
 - ✓ Mahdollisuus tuoda edullisesti hiilidioksidia eduksi, jos hiilidioksidin tuotannossa katkoksia (esim. kaukolämpölaitokset kesällä)
- ✓ Sivutuotteiden myyntimahdollisuus
 - ✓ Happi, ylijäämälämpö
- ✓ Metaanin kuljetusmahdollisuudet käyttäjille
 - ✓ Maakaasuputken läheisyys, loppukäyttäjien/sataman läheisyys
- ✓ Veden saatavuus, elektrolyysin syöttövesi, jäähdytysvesi
- ✓ Valmis teollinen infrastruktuuri, synergiaedut

P2X – Kaustisen seutu e-metaanin tuotantopaikkana

- ✔ Hyvä uusiutuvan sähkön saatavuus
 - ✔ Aurinkovoima, tuulivoima
 - ✔ Valtakunnan sähköverkko, tuleva Lakeus –linja
- ✔ Mittavat suunnitelmat biokaasun tuotannolle
 - ✔ Biokaasu erinomainen hiilidioksidilähde e-metaanin tuotantoon
 - ✔ Synergiaedut e-metaanilaitoksen sijoittamisella biokaasutuotannon yhteyteen
- ✔ Ei suuria biomassaa ympäri vuoden polttavia energialaitoksia
 - ✔ Rajallinen hiilidioksidin saatavuus P2X –tuotteiden valmistamiseen
- ✔ Rajalliset mahdollisuudet P2X –tuotannossa syntyvän ylijäämälämmön hyödyntämiseen
 - ✔ Vain pienehköjä kaukolämpöverkkoja
 - ✔ Potentiaalia lämpöenergian hyödyntämiseen kasvihuoneissa
- ✔ Kohtuullinen etäisyys satamaan, myös vedyn ja/tai metaanin siirto putkikuljetuksella mahdollista
- ✔ Kohtuullinen etäisyys suunnitteilla olevaan valtakunnalliseen vetyverkkoon
- ✔ Ei maakaasuverkkoa, johon tuotettava metaani voitaisiin syöttää
 - ✔ Tuotettava metaani pääsääntöisesti nesteytettävä (putkikuljetus satamaan voi olla vaihtoehto)
- ✔ Rajallinen veden saatavuus
 - ✔ Jäähdytysvedelle tarvitaan kierrätys, ilmajäähdyttimet tai jäähdytystornit
 - ✔ Humuspitoiset vedet, elektrolyysin syöttöveden puhdistus orgaanisesta hiilestä

Sähkövarastot – Teknologiat

✓ Akkuteknologiat

✓ Litiumioni (Li-ion) (~90% markkinaosuus)

- ✓ + Suuri energiatiheys ja korkea energiatehokkuus (90-95%)
- ✓ - Lyhyempi käyttöikä (n. 6000 sykliä) ja paloturvallisuus

✓ Virtausakut (~10% markkinaosuus)

- ✓ + Pitkä käyttöikä (>10000 sykliä) ja pitkän keston varastointi (1-4h)
- ✓ - Alhainen energiatiheys ja korkeampi alkuinvestointi

✓ Natriumioni (Na-ion) (~1% markkinaosuus)

- ✓ + Edulliset raaka-aineet ja ekologinen
- ✓ - Alhainen energiatiheys ja vasta kehitysvaiheessa



Lähde: Sungrow

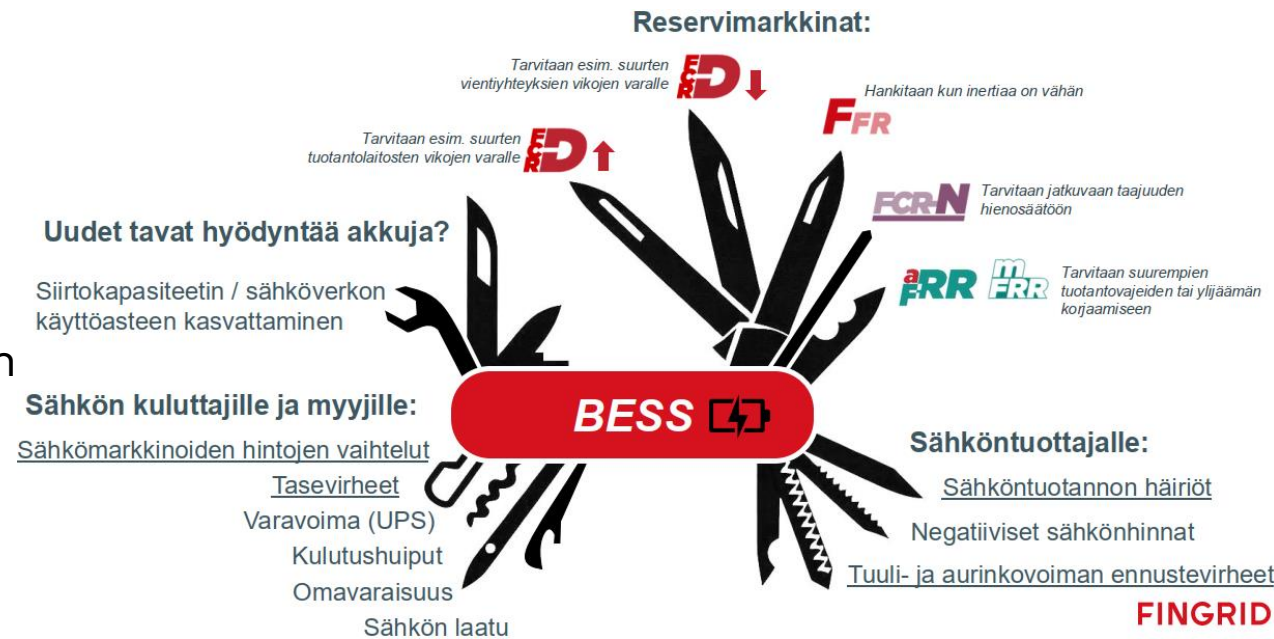
Sähkövarastot – käyttökohteet

Useita käyttökohteita, sähkövarastot ovat ”sähköverkon linkkuveitsiä”

✓ Reservimarkkinat

✓ Arbitraasi

- ✓ Sähköä ladataan halvalla ja syötetään verkkoon kalliimmalla hinnalla
- ✓ Tuotantolaitoksen tuottama sähkö voidaan syöttää verkkoon kannattavampaan ajankohtaan
- ✓ Vaatii sähkön hinnan volatiliteettia, n. 5-10stn hinnan vaihteluita päivän sisällä
- ✓ Tuottotaso 500-1500€/kk/MW, mikä on merkittävästi reservimarkkinoita pienempi
- ✓ Muut: Siirtokapasiteetin parantaminen, varavoima, kulutushuiput, omavaraisuus, sähkönlaatu, mahdolliset uudet tavat



Lähde: Fingrid Oyj

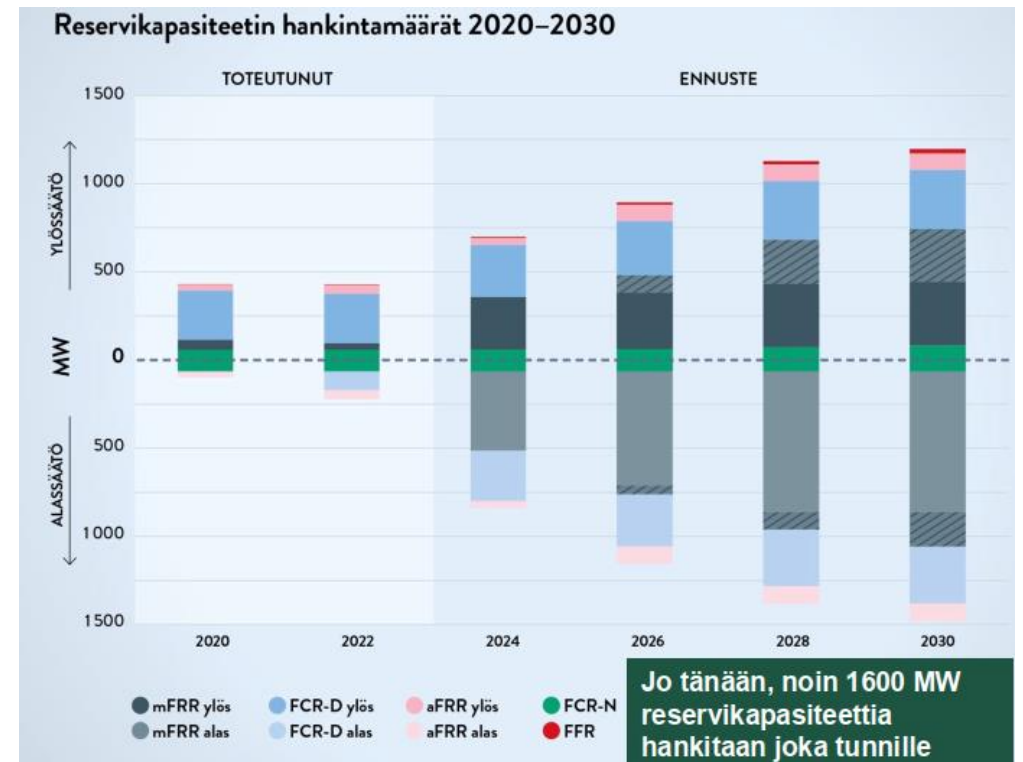
Sähkövarastot - reservimarkkinat

- ✓ Energiaturros lisää jouston tarvetta - Reservikapasiteetin hankintamäärät kasvavat
- ✓ Reservimarkkinatuotteet
 - ✓ FFR – Nopea taajuusreservi
 - ✓ FCR-D – Taajuusohjattu häiriöreservi
 - ✓ FCR-N – Taajuusohjattu häiriöreservi
 - ✓ aFRR – Automaattinen taajuuden palautusreservi
 - ✓ mFRR – Manuaalinen taajuuden palautusreservi
 - ✓ Monimarkkinaoptimointi = mille markkinalle kannattaa kapasiteetti milloinkin allokoida

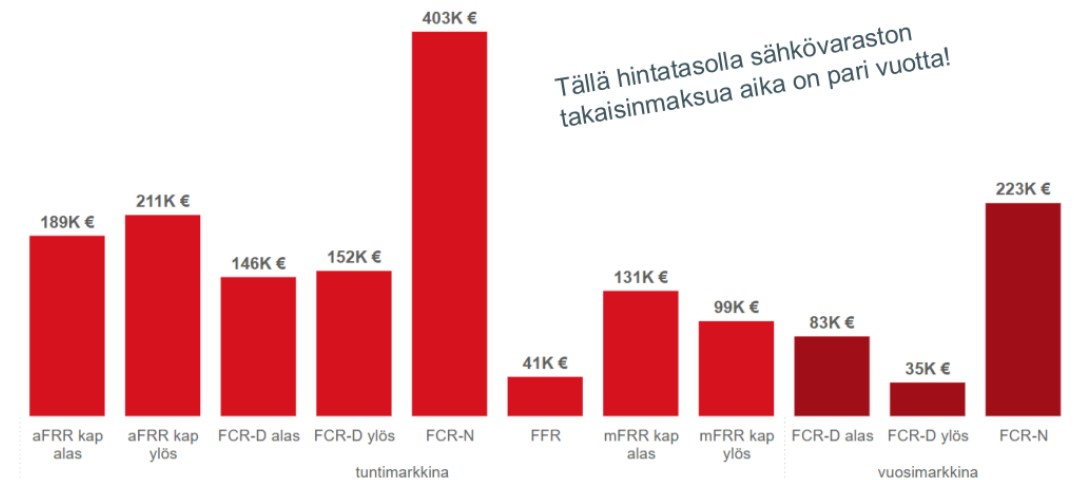
Lisää tietoa reservimarkkinoista:

<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/sahkojarjestelman-reservit/#reservituotteiden-toimintaperiaatteet>

- ✓ 2024 toteutuneiden hintatasojen perusteella takaisinmaksuaika 2 vuotta



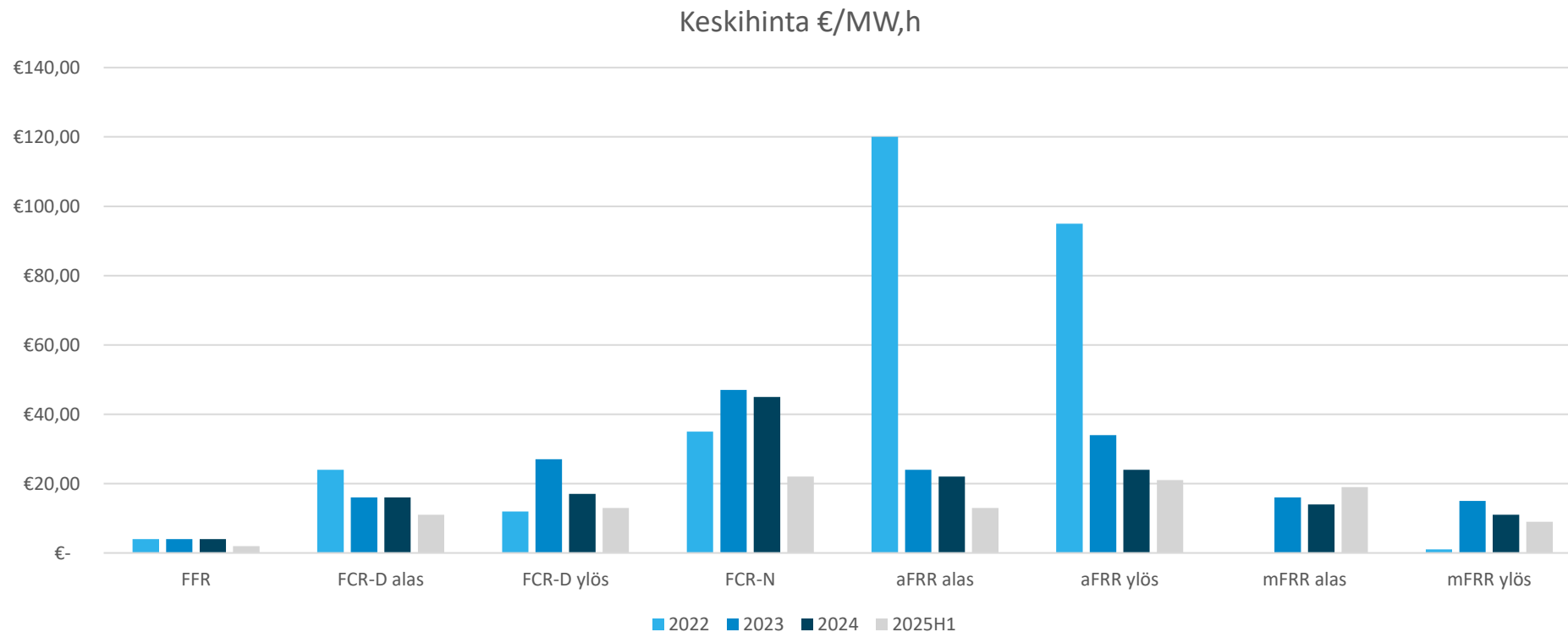
Kapasiteettimarkkinat vuonna 2024



Lähde: Fingrid Oyj

Sähkövarastot - Reservimarkkinoiden kehitys

- ✓ Toteutuneet tuntimarkkinahinnat 2022-2025H1 koottuna alla
- ✓ Markkinahinnat ovat laskevassa trendissä, mutta monimarkkinaoptimoinnilla on mahdollista saavuttaa 10.000-20.000€/kk/MW tuottotasot



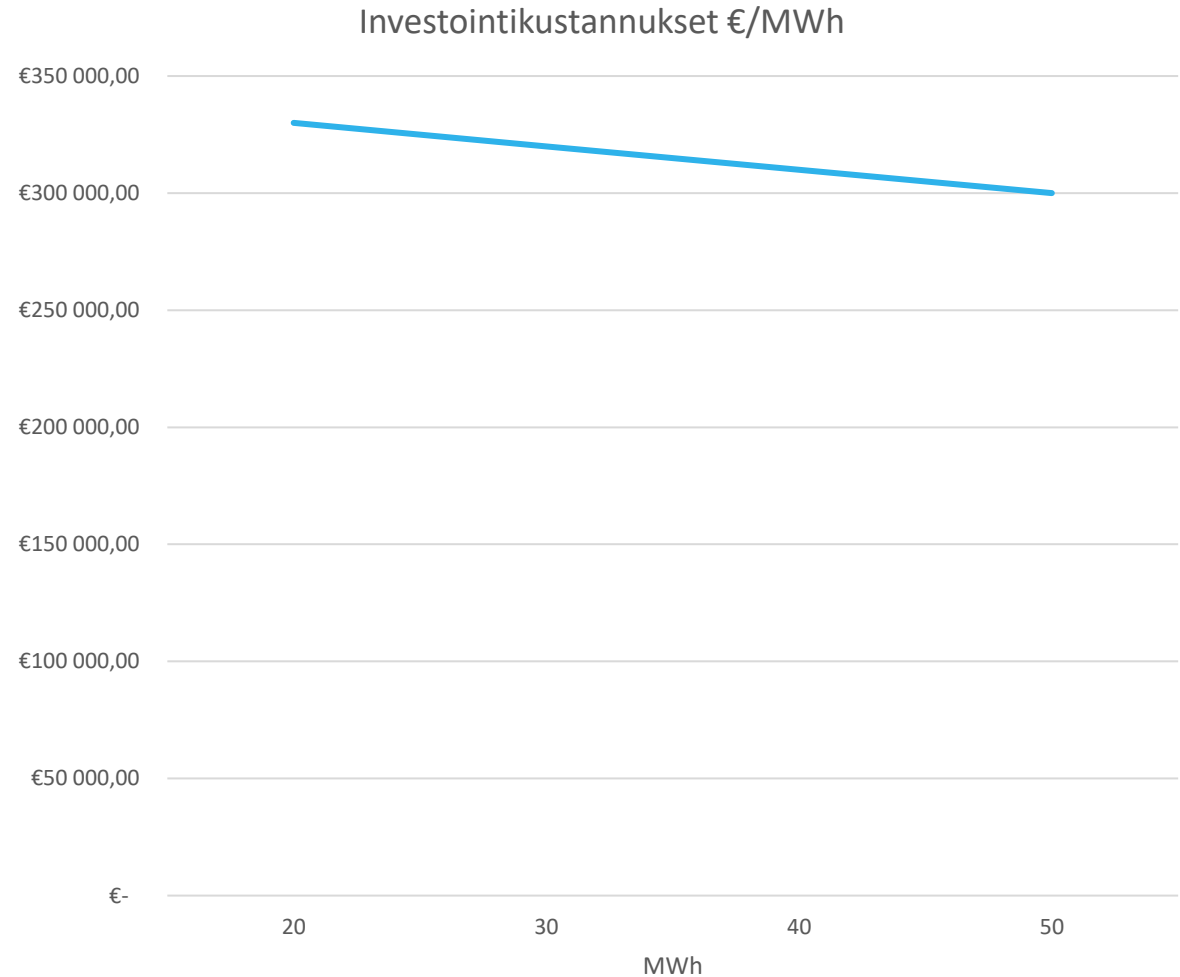
Sähkövarastot – investointi- ja käyttökustannukset

✓ Investointikustannukset

- ✓ Akkukontit
- ✓ Invertterit ja muuntajat
- ✓ Verkkoliityntä
 - ✓ Verkkoliityntäsopimus
 - ✓ Sähköasema ja päämuuntaja
 - ✓ Mahdollinen liityntäjohto
- ✓ Infra kokonaisuudessaan

✓ Käyttökustannukset

- ✓ Karkea arvio käyttökustannuksista (käyttö, kunnossapito, valvonta, vakuutukset ym.) = 10.000€/MWh



Sähkövarastot – riskit

Teknisiä riskejä

- ✓ Teknologia
 - ✓ Akkuteknologiat kehittyvät nopeasti ja nykyiset teknologiat voivat vanhentua ennen investoinnin takaisinmaksua
 - ✓ Esim. nykyinen kehityssuunta pidempikestoisiin 2-4h akkuihin
- ✓ Paloturvallisuus
 - ✓ Erityisesti nykyisin suosituimmissa litiumioni akuissa
 - ✓ Voi rajoittaa asennuksia sisätiloihin
- ✓ Kapasiteetin heikkeneminen (degraatio)
 - ✓ Lataussyklit heikentävät akun kapasiteettia ja tehoa

Kaupallisia riskejä

- ✓ Markkinoiden saturoituminen
 - ✓ Uusia sähkövarastoja kehitetään ja rakennetaan merkittävästi
 - ✓ Kannibalisaatio – omat tai kilpailijoiden uudet sähkövarastot syövät tuottoja
 - ✓ Kantaverkko yhtiö Fingridin mukaan Suomen markkinoille mahtuisi vielä useita tuhansia megawatteja kapasiteettia
- ✓ Tuottojen epävarmuus
 - ✓ Sähkövarastojen kannattavuutta on hyvin vaikea ennustaa pidemmälle tulevaisuuteen

Sähkövarastot - ympäristövaikutukset

Rakentaminen

- ✓ Raaka-aineet hankinta
 - ✓ Mm. litiumin, nikkelin ja koboltin louhinta aiheuttavat merkittäviä ympäristövaikutuksia
 - ✓ Kehityksessä olevat natriumioniakut vähentäisivät ympäristövaikutuksia
- ✓ Energiankulutus
 - ✓ Raaka-aineiden louhinta, komponenttien valmistus ja infran rakentaminen vaatii paljon energiaa
 - ✓ Hiilijalanjälki 100-150 kg CO₂/kWh
- ✓ Infrastrukturi
- ✓ Sähkövarastoja varten rakennetaan sen koosta riippuen 1-5ha sorakenttä ja mahdollinen liityntäjohto
- ✓ Alueen ympäristöarvot on syytä ottaa huomioon sähkövarastojen sijaintia pohtiessa

Käyttö

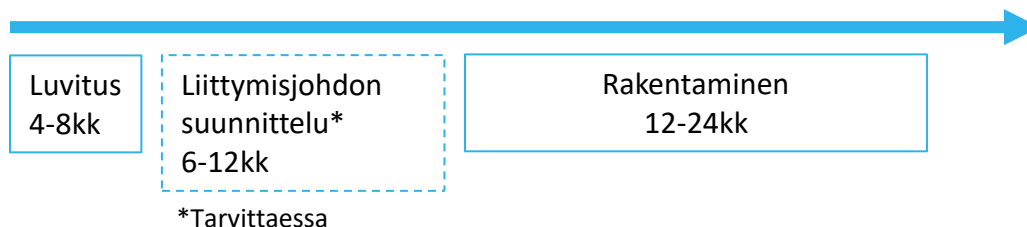
- ✓ Käyttö ei tuota suoria päästöjä
- ✓ Käyttö voi tuottaa epäsuoria päästöjä, mikäli se lisää fossilisen sähkön käyttöä
 - ✓ Lähtökohtaisesti hyödynnetään uusiutuvan energian kanssa

Käytöstä poisto

- ✓ Nykyisin käytetyt akut ovat vaarallista jätettä, joiden kierrätys on haastavaa
- ✓ Akkujen kierrätys on vielä kehittyvä ala

Sähkövarastot – Kaustisen seutu

- ✓ Sijaintiin vaikuttavat tekijät
 - ✓ Verkkoliityntä; Vapaa kapasiteetti ja etäisyys
 - ✓ Kaavoitus; Ei saa hidastaa hanketta
 - ✓ Rakennettavuus; 1-5 ha tasainen kenttä
 - ✓ Tuotanto; lähellä sähköntuotantoa, ei kuitenkaan välttämätön kannattavuuden kannalta
- KASE: Isot sähkövarastot tulevien Fingridin Ullavan ja Halsuan sähköasemien viereen
- ✓ Sähkövarastohankkeen aikataulu voi olla hyvinkin nopea → hankekehittäjille tärkeää tehokas yhteistyö kunnan kanssa



* Sähköaseman toteutus riippuu liityntähankkeista

Lähde: 15 tapaa hyödyntää sähkövarastoa, Fingrid

3. Case- esimerkit

Case 1: P2X esimerkkilaskelma

Case 2: Pieni standalone-akku

Case 3: Suuri standalone-akku

Case 4: Suuri co-located akku

Case 1: P2X esimerkkilaskelma

Elektrolyysillä tuotetun vedyn tuotanto-kustannus, suuruusluokka-arvio

✔ Lähtöoletukset

✔ Elektrolyysilaitteisto	50 MW
✔ Sähkön hinta	40 €/MWh
✔ Investointikustannus	90 M€
✔ Kuoletusaika	15 a, korko 5%
✔ Laitosta ajetaan	8400 h/a

✔ Vedyn tuotantokustannus

✔ Sähkö	2,04 €/kgH ₂	61 €/MWh, LHV
✔ Pääomakulu	1,05 €/kgH ₂	
✔ Muut kulut	0,37 €/kgH ₂	

✔ Vesi, kemikaalit, kunnossapito
työvoima, hallinto ym.

✔ Yhteensä	3,46 €/kgH ₂	104 €/MWh, LHV (alempi lämpöarvo)
------------	-------------------------	-----------------------------------

✔ Hukkalämmön hyödyntämisen taloudellisen vaikutuksen oletetaan olevan vähäinen, joten mahdollista ylijäämälämmön ja hapen myyntiä ei ole huomioitu laskelmissa

✔ Vedyn tuotantokustannuksista yli 90 % tulee sähkön hinnasta ja pääomakustannuksista

- ✔ Sähkön hinta keskeinen; 1 snt/kWh sähkön hinnassa nostaa vedyn tuotantokustannusta noin 0,5 €/kg H₂
- ✔ Sähkövarastolla voidaan optimoida sähkön hintaa lyhyellä aikavälillä

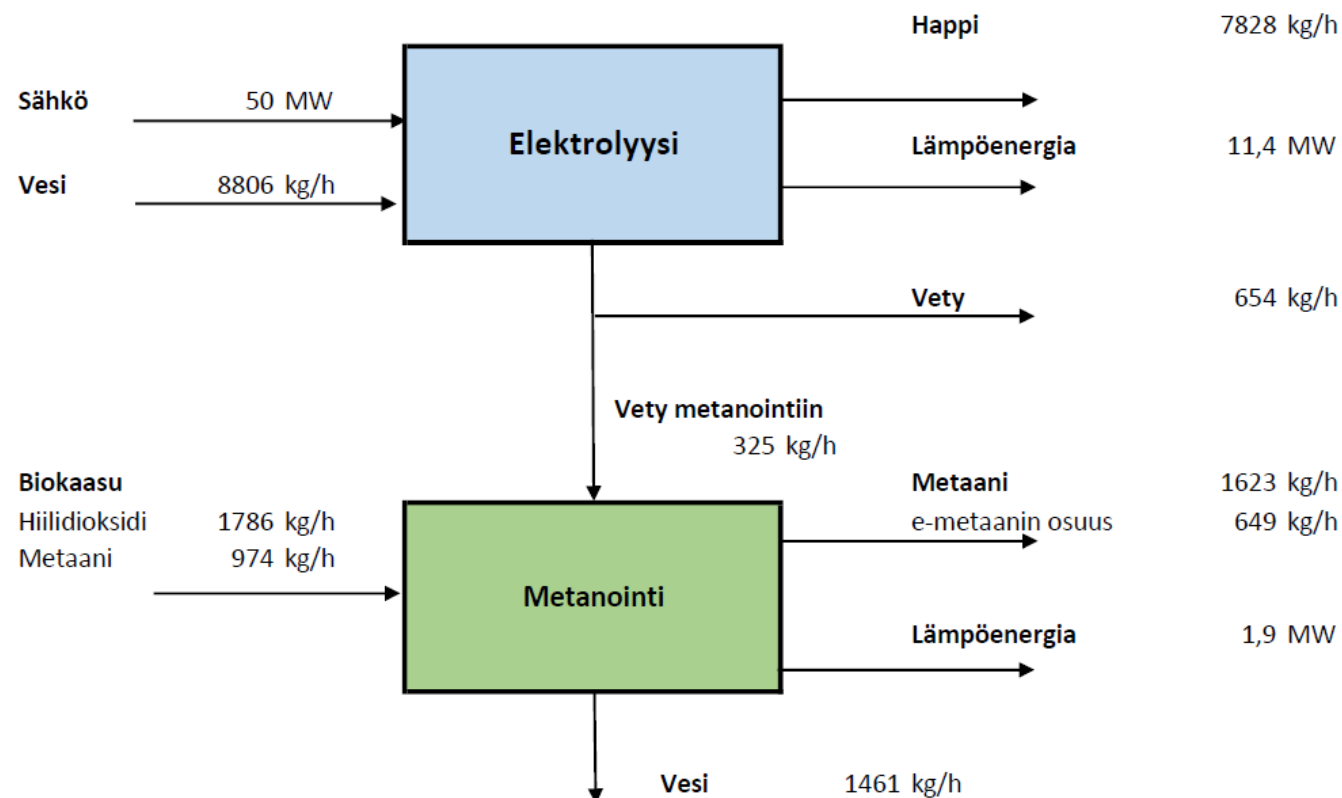
Case 1: P2X esimerkkilaskelma

e-metaanituotanto Kaustisen seudulla, alustava konsepti

- ✔ Vedyn tuotanto, sähköteho elektrolyysiin 50 MW
 - ✔ Vedyn tuotanto joustaa sähkön hintojen mukaan, kuitenkin riittävä vetytuotanto metanointiin koko ajan
 - ✔ Pieni bufferisäiliö vedylle harkittavissa hetkellisten sähkön hintapiikkien varalle
- 1. Biokaasu hiilidioksidin lähteenä (60 til-% CH₄, 40 til -% CO₂) 23 180 t/a , 8180 t/a CH₄, 15000 t/a CO₂
 - ✔ Ei erillistä hiilidioksidin erotusta biokaasusta ennen metanointia
 - ✔ Vedyn tarve metanointiin 325 kg/h, 2730 t/a, noin kolmannes tuotantokapasiteetista
 - ✔ Metaanituotanto 1620 kg/h, 13 600 t/a, josta e-metaani noin 5 440 t/a
- ✔ Biologinen metanointi
 - ✔ Soveltuu biokaasun prosessointiin, koska kestää epäpuhtauksia
- ✔ Metaanin puhdistus ja nesteytys
 - ✔ Vaihtoehtoisesti metaanin kuljetus paineistettuna kaasuna putkikuljetuksena Kokkolaan
 - ✔ Vedyn palautus puhdistuksesta ja nesteytyksestä metanointiin
- ✔ Osa elektrolyysin ylijäämälämmöstä kaukolämmön tuotantoon
- ✔ Hiilidioksidin metanointi lisää biokaasutuotannon metaanisaantoa noin 65 %

Case 1: P2X esimerkkilaskelma

Vedyn tuotanto elektrolyysillä ja e-metaanituotanto biokaasusta, päätase



Case 1: P2X esimerkkilaskelma

e-metaanituotannon investointi-kustannukset (suuruusluokka-arvio)

✓ Vedyn tuotanto, 50 MW	90 M€
✓ Syöttöveden puhdistus	
✓ Muuntajat, tasasuuntaajat	
✓ Vedyn puhdistus	
✓ Jäähdytysveden kierrätys	
✓ Metanointi biokaasusta, 40 % tuotetusta vedystä	20 M€
✓ Metanointi	
✓ Metaanin puhdistus	
✓ <u>Metaanin nesteytys</u>	10 M€
✓ Yhteensä	120 M€
✓ Investointikustannusarvio ei sisällä	
✓ Vedyn, hiilidioksidin ja metaanin varastoja ja kuljetusputkistoja	
✓ Korkeajännitesähköverkkoja ja muuta infrastruktuuria laitosalueen ulkopuolella	

Case 1: P2X esimerkkilaskelma

Nesteytetyn e-metaanin tuotanto-kustannus, suuruusluokka-arvio

✓ e-metaanin raaka-aineeksi oletettu biokaasu (ei hiilidioksidin talteenottokuluja), 15 000 t/a CO₂. Sähkön hinnaksi oletettu 40 €/MWh

✓ Vedyn tuotanto elektrolyysillä,	3,46 €/kg H ₂	1,73 €/kg CH ₄
✓ Muut kulut	1,5 M€/a	0,31 €/kg CO ₂
✓ Kunnossapito, työvoima, sähkö, jäteveden käsittely ym.		
✓ Pääomakustannus, CAPEX 30 M€	2,89 M€/a	0,59 €/kg CH ₄
✓ Kuoletusaika 15 a, korko 5 %		
✓ Yhteensä		2,62 €/kg CH ₄ 189 €/MWh

✓ Mahdollista ylijäämälämmön myyntiä ei huomioitu

✓ Esim. liikennebiokaasun verollinen kilohinta tankkausasemilla on noin 2,20 €/kg, joten e-metaanin tuotantokustannusarvio ylittää selvästi biokaasun hinnan

Case 2: Pieni standalone-akku

Pieni standalone-akku, takaisinmaksuajan arviointi

✓ Lähtöoletukset

- ✓ Sähkövarasto 1MW/2MWh
- ✓ Investointikustannus 500.000€/MWh = 1.000.000 €
- ✓ Käyttökustannus 10.000 €/MWh = 20.000 €
- ✓ Sisäinen korkokanta 5%
- ✓ Tuotto arvioidaan kolmella skenaariolla
 - ✓ Konservatiivinen 5.000€/MW/kk
 - ✓ Realistinen 10.000€/MW/kk
 - ✓ Optimistinen 20.000€/MW/kk

Skenaariot	Konservatiivinen	Realistinen	Optimistinen
Takaisinmaksuaika	>30 v	13 v	6 v

Pienet standalone akut eivät nykyhetkessä ole välttämättä kovin kannattavia

Case 3: Suuri standalone-akku

Suuri standalone-akku, takaisinmaksuajan arviointi

✓ Lähtöoletukset

- ✓ Sähkövarasto 50MW/50MWh
- ✓ Liittymismaksu 900.000 €
- ✓ Investointikustannus 300.000€/MWh = 15.000.000 €
- ✓ Käyttökustannus 10.000€/MW,a = 500.000 €/a
- ✓ Sisäinen korkokanta 5%
- ✓ Tuotto arvioidaan kolmella skenaariolla
 - ✓ Konservatiivinen 5.000€/MW/kk
 - ✓ Realistinen 10.000€/MW/kk
 - ✓ Optimistinen 20.000€/MW/kk

Skenaariot	Konservatiivinen	Realistinen	Optimistinen
Takaisinmaksuaika	9 v	4 v	2 v

Suuret standalone akut voivat nykyhetkessä olla hyvinkin kannattavia

Case 4: Suuri co-located akku

Sähkövarasto 50MW/50MWh, tuulivoimalaitos 150 MW

✓ Sähkövarasto parantaa tuulivoimalaitoksen "capture ratea" arbitraasi, eli tuotantoa pystytään hyödyntämään paremmin

✓ Lähtöoletukset

✓ 150MW tuulivoimalaitoksen verkkoliityntään lisätään 50MW/50MWh sähkövarasto

✓ Investointikustannus BESS lisäykselle 250.000€/MWh = 12.000.000€

✓ Käyttökustannus 10.000€/MW,a = 500.000 €/a

✓ Sisäinen korkokanta 5%

✓ Tuotto arvioidaan neljällä skenaariolla

✓ Arbitraasi 1000€/MW/kk

✓ Konservatiivinen 5.000€/MW/kk

✓ Realistinen 10.000€/MW/kk

✓ Optimistinen 20.000€/MW/kk

Co-located akut voivat olla hyvinkin kannattavia nykyhetkessä monimarkkinaoptimoituina. Pelkästään tuotantolaitoksen tuottoa parantamaan arbitraasilla niitä ei kannata suunnitella.

Skenaariot	Arbitraasi	Konservatiivinen	Realistinen	Optimistinen
Takaisinmaksuaika	Ei maksa itseään takaisin	7 v	3 v	2 v

4. Yhteenveto

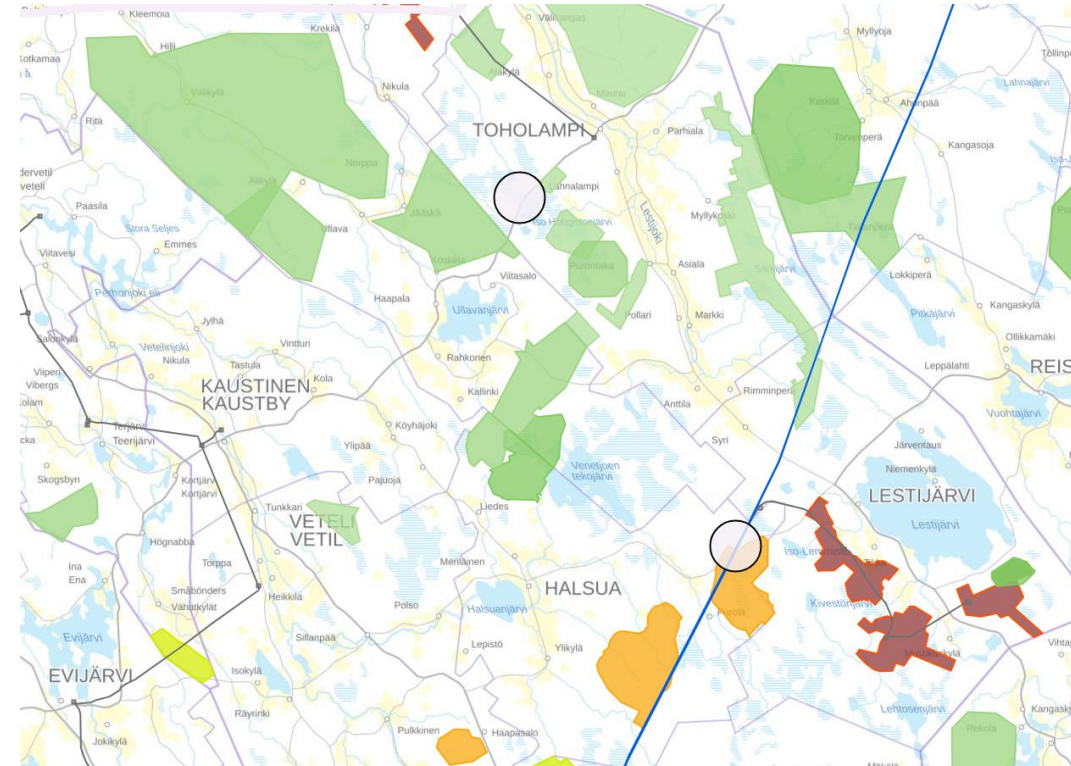
P2X ja sähkövarastojen hyödyntäminen
Kaustisen seudulla

Yhteenveto

- ✔ Sähkön hinta on keskeinen kustannustekijä vedyn tuotannossa elektrolyysillä
 - ✔ Korkea pääomakustannus ei kuitenkaan mahdollista tuotannon keskittämistä vain erityisen halvan sähkön tunneille
- ✔ e-metaanin tuotannossa syntyy energiatappioita ylijäämälämpönä useissa prosessivaiheissa.
 - ✔ Vety ja e-polttoaineet ovat kuitenkin helpommin varastoitavissa kuin sähkö ja soveltuvat paremmin esim. laivaliikenteen ja raskaan liikenteen käyttöön.
- ✔ Kaustisen seudun merkittävimmät vahvuudet vedyn ja e-polttoaineiden tuotannossa ovat mittavat suunnitelmat sähköverkon kehittämiseen ja uusiutuvan sähkön ja biokaasun tuotantoon
 - ✔ Biokaasu on erinomainen hiilidioksidin lähde e-polttoaineiden tuotantoon
- ✔ Kaustisen seudulla on vain rajalliset mahdollisuudet hyödyntää laajamittaisessa e-polttoaineiden tuotannossa syntyvää ylijäämälämpöä
- ✔ e-polttoaineiden tuotanto on selvästi kalliimpaa kuin vastaavien fossiilisista raaka-aineista tuotettujen tuotteiden valmistus
 - ✔ Tarvitaan poliittisia päätöksiä vedyn ja e-polttoaineiden tuotannon edistämiseksi
- ✔ Sähkön varastointi akkuihin antaa parhaan tuoton reservimarkkinoilla. Akkuvarastoinnilla on vain rajoitetut mahdollisuudet saada riittävän edullista sähköä e-polttoaineiden tuotantoon sähkön hintavaihteluiden tasaamisessa. Esimerkiksi pelkän aurinkosähkön varassa jatkuvatoimisesti toimiva elektrolyysilaitosta on vaikea saada kannattavaksi varastoimalla päivällä tuotettua sähköä akkuihin ja käyttämällä sähköä elektrolyysiprosessiin yön aikana. Kesällä tuotetun aurinkosähkön varastointi talvikäyttöä varten akkuihin olisi vielä epätaloudellisempaa, koska varastoitu sähkö käytettäisiin vain kerran vuodessa.

Yhteenveto

- ✓ Kaustisen seudulla on tulevaisuudessa merkittävä rooli uusiutuvan energian hankkeiden toteutumisessa kun Fingridin voimajohto- ja sähköasemahankkeet valmistuvat
 - ✓ Kartalla punaisella valmistuneet tuotantohankkeet, muilla väreillä eri kehitysvaiheessa olevia hankkeita
- ✓ Tuotantohankkeiden toteutuminen kasvattaa alueella sähkövarastoinnin ja -kulutuksen hankkeiden potentiaalia
- ✓ Alueen kehityksessä suositellaan huomioitavan proaktiivisesti tulevien Ullavan ja Halsuan sähköasemien lähialueet



Lähde: Fingrid Oyj Verkkokiikari