



BIOGEEENISEN HIILIDIOKSIDIN LUOMAT MAHDOLLISUUDET SAVON VOI- MALLE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2025

Aaro Mäki-Saari

Tarkastajat: Professori Tapio Ranta

DI Mika Laihanen

Ohjaajat: DI Antti Karhunen

DI Janne Sisso

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Aaro Mäki-Saari

Biogeenisen hiilidioksidin luomat mahdollisuudet Savon Voimalle

Energiatekniikan diplomityö

2025

94 sivua, 27 kuvaa, 11 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Tapio Ranta ja DI Mika Laihanen

Avainsanat: BECCU, biogeeninen hiilidioksidi, hiilidioksidin talteenotto, hiilidioksidin arvoketju

Diplomityössä tutkittiin Savon Voima Oyj:n mahdollisuuksia luoda liiketoimintaa biogeenisestä hiilidioksidista. Biogeenisen hiilidioksidin liiketoimintamahdollisuuksien kartoittaminen on tärkeää tulevaisuuden hiilineutraalin energijärjestelmien ja kiertotalouden edistämiseksi. Kartoitus tehtiin energiayhtiön ominaispiirteet huomioiden.

Työssä arvioitiin liiketoiminnan tarvitsemia edellytyksiä arvoketjun alkupisteestä asiakasrajapintaan. Arvoketjun tutkimiseen sisältyi talteenottoteknologian, logistiikan, sekä niiden muodostamien kustannusten arviointi. Lisäksi tutkittiin hiilidioksidimarkkinan tilannetta ja potentiaalisia asiakkaita. Hiilidioksidille asetettavan hinnan arvioimiseksi ja oleellisimpien haasteiden tunnistamiseksi suoritettiin investointilaskelmat. Tulosten ja kirjallisuuden pohjalta pohdittiin keinoja liiketoiminnan aloittamisen nopeuttamiseksi.

Liiketoiminta osoittautui nykyolosuhteissa vielä kannattamattomaksi markkinan ollessa kehitysvaiheessa. Markkinaennusteet huomioiden liiketoimintaan liittyy kuitenkin potentiaalia lähitulevaisuudessa, jos hiilidioksidin hinta kehittyy optimistisesti. Alkuvaiheessa toimintaa voidaan laajentaa muodostamalla yritysklustereita ja hyödyntämällä synergiaetuja. Myöhemmin liiketoimintaa voidaan laajentaa tuotteen jakeluun markkinakehityksen ollessa pidemmällä. Päästökaupasta ja asiakasrajapinnasta tunnistettiin lisämahdollisuuksia kehityksen nopeuttamiseksi ja lisäarvon luomiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Aaro Mäki-Saari

Opportunities created by biogenic carbon dioxide for Savon Voima

Master's thesis

2025

94 pages, 27 figures, 11 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Tapio Ranta and M.Sc (Tech) Mika Laihanen

Keywords: BECCU, biogenic carbon dioxide, carbon capture, carbon dioxide value chain

This Master's thesis examined the opportunities of Savon Voima Oyj to create business from biogenic carbon dioxide. The mapping of business opportunities related to biogenic carbon dioxide is important for advancing carbon neutral energy systems and circular economy in the future. The assessment was conducted by considering the characteristics of an energy company.

The study evaluated the prerequisites for business development from the beginning of the value chain to the customer. The study of the value chain included the evaluation of carbon capture technology, logistics, and the associated costs. Additionally, the state of carbon dioxide market and potential customers were evaluated. Investment calculations were conducted to estimate the pricing level of carbon dioxide and the associated key challenges. Based on the results and literature, means for speeding up the adoption of carbon dioxide business were discussed.

The business was found to be unprofitable in the current situation due to the early stage of market development. However, considering market forecasts there will be business opportunities in the near future if the carbon price develops optimistically. In the initial phase, operations can be expanded by forming industry clusters and utilizing synergy benefits. Later, as the market matures, the business can be extended to carbon dioxide distribution. Further opportunities for speeding up development and creating additional value were identified in emissions trading and customer services.

KIITOKSET

Haluan kiittää Kari Anttosta, Timo Partasta sekä Savon Voimaa mahdollisuudesta tehdä diplomityö yrityksen toimeksiantona ajankohtaisesta ja tärkeästä aiheesta. Suuret kiitokset valmistuneesta työstä kuuluvat työn ohjaajalle, Janne Sissolle, joka on ohjannut työtä ansiokkaasti viime syksystä lähtien.

Haluan myös kiittää Tapio Rantaa, Mika Laihasta sekä Antti Karhusta koulun puolelta saamastani ohjauksesta ja neuvoista, joista on ollut apua työtä tehdessä.

Erytiskiitokset kuuluvat perheelleni, läheisilleni ja ystäväilleni, jotka ovat tukeneet minua diplomityön kirjoittamisprosessin läpi alusta loppuun saakka.

Turku, 25.3.2025

Aaro Mäki-Saari

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>C</i>	laitoksen hiilidioksidikapasiteetti	t _{CO2} /h
<i>I</i>	investointikustannus	€
<i>J</i>	jäännösarvo	€
<i>k</i>	laskentakorkokanta	%
<i>n</i>	investoinnin pitoaika	a
<i>S</i>	kassavirta	€

Alaindeksit

CO ₂	hiilidioksidi
e	sähkö
th	lämpö

Lyhenteet

BECCUS	biogeenisen hiilidioksidin hyödyntäminen ja varastointi
BoP	balance of plant
CAPEX	pääomakustannus (Capital Expenditures)
CCS	hiilidioksidin varastointi
CCU	hiilidioksidin hyödyntäminen
CDM	puhtaan kehityksen mekanismi (Clean Development Mechanism)
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
CO ₂	hiilidioksidi

DAC	Hiilidioksidin talteenotto ilmasta (Direct Air Capture)
DEA	dietanoliamiinit
EU ETS	Euroopan unionin päästökauppajärjestelmä
EUA	Euroopan unionin päästökauppajärjestelmän päästöoikeus
IET	päästökauppa
IRR	sisäinen korkokanta (Internal Rate of Return)
JI	yhteistoteutus (Joint Implementation)
KL	kaukolämpö
MDEA	metyylietanoliamiinit
MEA	monoetanoliamiinit
NPV	nettonykyarvo (Net Present Value)
OPEX	operointikustannus (Operational Expenditures)
P2X	Power-to-X-teknologia
TRL	Teknologian kehitysaste (Technological Readiness Level)
UNFCCC	YK:n ilmastosuojelun puitesopimus

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
2	Savon Voima	12
2.1	Savon Voima yrityksenä	12
2.2	Biogeenisen hiilidioksidin sijainnit	14
2.3	Savon Voiman strategia	16
3	Biogeenisen hiilidioksidin hyödyntäminen ja varastointi	17
3.1	Yleistä	17
3.1.1	Hiilidioksidin lähteet.....	17
3.1.2	Hiilidioksidin hyödyntämis- ja varastointimenetelmät.....	19
3.2	Hiilidioksidin talteenottomenetelmät.....	22
3.2.1	Savukaasu hiilidioksidin lähteenä.....	23
3.2.2	Talteenottoteknologiat	24
3.2.3	Talteenoton vaikutus voimalaitoksen toimintaan	29
3.2.4	Talteenoton kustannukset	30
3.3	Logistiikka	34
3.3.1	Hiilidioksidin jakelumahdollisuudet.....	34
3.3.2	Hiilidioksidin siirtäminen ja logistiikkaketju	35
3.3.3	Logistiikan kustannukset	36
3.3.4	Potentiaaliset sijainnit Savon Voimalla	39
3.4	Hiilidioksidin käyttäjät	39
3.4.1	P2X -tuotteet	40
3.4.2	Mineralisointituotteet.....	41
3.4.3	Tuotteiden markkina	41
4	Hiilidioksidimarkkinat.....	46
4.1	Päästömarkkinat.....	47

4.2	Talteenotto hiilidioksidimarkkinoilla	49
4.3	Hiilidioksidin markkinahinnan arviointi.....	50
5	Savon Voiman asema hiilidioksidimarkkinoilla	53
5.1	Energiayhtiön ominaispiirteet.....	53
5.2	Ulkoiset mahdollisuudet	54
5.3	Kilpailu muiden teollisuudenalojen kanssa	55
5.4	Liiketoimintamahdollisuudet hiilidioksidin arvoketjussa.....	56
6	Liiketoimintavaihtoehtojen kannattavuuden arviointi.....	60
6.1	Laskennan lähtökohdat	60
6.2	Laskentamenetelmät	62
6.3	Laskennan tulokset	64
6.4	Herkkyysanalyysi.....	66
7	Biogeenisen hiilidioksidin luomat mahdollisuudet	72
7.1	Liiketoiminnan arvo tulevaisuudessa.....	72
7.2	Optimaalinen sijainti sekä ajankohta liiketoiminnalle.....	73
7.3	Haasteiden huomioiminen	76
7.4	Mahdollisuudet asiakasrajapinnoissa.....	80
7.5	Mahdollisuudet päästökaupassa.....	82
8	Yhteenveto.....	84
	Lähteet	88

Liitteet

Liite 1. Mahdollisuudet liiketoiminnan laajentamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa.

1 Johdanto

Energiantuotannossa muodostuva hiilidioksidi on nykyhetkeen asti päätyntä enimmäkseen ilmakehään. Bioperäisten polttoaineiden polttamisesta saatava biogeeninen hiilidioksidi on viime aikoina ollut lisääntyvässä määrin tutkimusten mielenkiinnon kohteena. Biogeenisen hiilidioksidin hyödyntäminen ja varastointi tarjoavat uusia mahdollisuuksia vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä edistää kiertotaloutta. Biogeenisen hiilidioksidin avulla on myös mahdollista saavuttaa etuja muuan muassa energiantuotannossa, hiilidioksidia hyödyntävässä teollisuudessa, sekä yleisesti ilmastonmuutoksen hillinnässä. Aiheen ajankohtaisuutta lisäävät biogeenisen hiilidioksidin ympärillä lisääntyvä kysyntä sekä ennusteet hiilidioksidimarkkinan kehityksestä tulevaisuudessa.

Hiilidioksidin hyödyntämisestä on tehty tutkimusta jo kymmenien vuosien ajan eri osa-alueilta, mutta määrällisesti tutkimusta on edelleen vähän. Tutkimukset ovat keskittyneet yksittäisiin hyödyntämisen osa-alueisiin, kuten talteenoton teknologiaan tai kaupalliseen potentiaaliin yleisellä tasolla. Hiilidioksidin talteenottoon liittyvät laajemmat tutkimukset teollisuudessa ovat keskittyneet enimmäkseen metsäteollisuuden ympärille tai ne tutkivat talteenottoa suurista fossiilisia polttoaineita hyödyntävistä lauhdevoimalaitoksista, joista jälkimmäiset eivät ole nykypäivänä erityisen relevantteja Suomen olosuhteissa. Viime aikoina tutkimus hiilidioksidin hyödyntämisestä on lisääntynyt merkittävästi keskittyen vetytalouteen sekä synteettisten polttoaineiden ja muiden lopputuotteiden tarjoamiin mahdollisuuksiin. Aiempien tutkimusten tulokset viittaavat hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen olevan mahdollista. Hiilidioksidin hyödyntämiseen ja varastointiin liittyviä hankkeita on nykyhetkellä kehitteillä runsaasti, mutta tästä huolimatta toteutuneita hankkeita on vähän.

Energiayhtiöitä koskevien tutkimusten vähäisyys luo tarvetta tälle tutkimukselle, jonka tarkoituksena on tutkia biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämismahdollisuuksia suomalaisen energiayhtiön näkökulmasta sen erityispiirteet huomioiden. Diplomityössä tutkitaan biogeenisen hiilidioksidin luomia mahdollisuuksia työn toimeksiantajalle, Savon Voima Oyj:lle. Yhtiön kaukolämpö ja sähkö tuotetaan hiilineutraalisti, kun turpeen poltosta luovutaan vuoden 2026 loppuun mennessä. Diplomityön tavoitteena ja keskeisimpänä tutkimusongelmana on selvittää Savon Voiman mahdollisuuksia luoda liiketoimintaa omasta toiminnasta syntyvästä biogeenisestä hiilidioksidista. Tutkimuskysymyksinä on esimerkiksi voiko

biogeenisestä hiilidioksidista luoda liiketoimintaa, milloin kannattaa lähteä luomaan liiketoimintaa, mikä arvo liiketoiminnalla on sekä mitä voidaan tehdä liiketoiminnan mahdollistamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa. Työssä käsitellään Savon Voiman biogeenisen hiilidioksidin kapasiteettia sekä sijainteja, hiilidioksidin käyttökohteita, talteenoton teknologiaa, logistiikkaa ja niiden vaatimia investointeja sekä kesänaikaisen hiilidioksidin polttamattomuuden vaikutusta potentiaaliseen liiketoimintaan. Tutkimuksen toteutuksessa on tehty muutamia rajoituksia. Fossiilinen hiilidioksidi on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Turveperäinen fossiilinen hiilidioksidi ei ole relevanttia, sillä Savon Voima luopuu sen käytöstä jo ensi vuoden aikana. Lisäksi fossiilinen hiilidioksidi ei tarjoa mahdollisuuksia ilmastonmuutoksen hillinnässä. Tarkastelun kohteena oleva liiketoiminta rajataan Savon Voiman sähkön ja lämmön yhteistuotanto- (CHP) ja lämpöliiketoimintaan biogeenisen hiilidioksidin tullessa näistä liiketoiminnoista. Lisäksi tutkittavien hiilidioksidin käyttökohteiden ulkopuolelle on rajattu biologinen hyödyntäminen, sekä suora käyttö, sillä nämä käyttökohteet soveltuvat heikosti savukaasulle, eikä niistä ole tehty merkittävästi tutkimusta teollisten pistelähteiden yhteydessä.

Tutkimuksen rakenne on muodostettu tutkimuskysymykset huomioiden. Tutkimuksen alkiosa on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkitaan biogeenisen hiilidioksidin talteenottoa ja hiilidioksidimarkkinaa aiempien tutkimusten pohjalta. Tämä luo oman haasteensa aiemman tutkimustiedon vähäisyyden vuoksi. Aluksi esitellään Savon Voima yrityksenä minkä yhteydessä käydään läpi biogeenisen hiilidioksidin sijainnit, sekä työn kannalta oleellista Savon Voiman strategiaa. Osiossa 3 käsitellään biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämisen peruskäsitteitä sekä hyödyntämisen tuomia mahdollisuuksia yleisellä tasolla, jotta lukija saa tarvittavan taustatiedon aiheesta. Lisäksi osiossa käsitellään talteenoton teknologiaa sekä logistiikkaa ja arvioidaan näiden vaatimien investointien suuruutta. Talteenottomenetelmissä tarkastelu rajataan oleellisimpaan teknologiaan, jota tutkitaan tarkemmin. Logistiikan käsittelyssä on painotettu suomalaisia tutkimuksia ja käsittely keskittyy siirtomenetelmiin ja niiden kustannuksiin. Osion lopussa esitellään potentiaalisia hiilidioksidin käyttäjiä Savon Voiman toimintaympäristö huomioiden. Osiossa 4 käydään läpi hiilidioksidimarkkinan nykytilannetta tavoitteena arvioida biogeenisestä hiilidioksidista saatavaa tuloa tulevaisuuden hiilidioksidimarkkinalla.

Tutkimuksen tutkimusosassa arvioidaan liiketoiminnan luomia mahdollisuuksia ja kannattavuutta. Osiossa 5 käydään läpi Savon Voiman asemaa hiilidioksidimarkkinalla sekä

esitellään mahdollisuudet liiketoiminnan laajentamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa. Osiossa 6 suoritetaan investointilaskelmat eri liiketoimintavaihtoehtojen pohjalta muodostetuille skenaarioille, jotta voidaan arvioida hiilidioksidin hintatasoa tuotteena, sekä potentiaalisimpia liiketoimintavaihtoehtoja. Investointilaskennassa hyödynnetään kirjallisuusosiossa saatuja tietoja tarvittavista investoinneista. Osiossa 7 pyritään arvioimaan liiketoimintamahdollisuuksia investointilaskelmissa saatujen tulosten pohjalta. Lisäksi pohditaan mahdollisuuksia energiayhtiölle tyypillisten haasteiden minimoimiseksi sekä liiketoiminnan kannattavuuden parantamiseksi. Lopuksi esitetään yhteenveto sekä johtopäätökset tehdystä tutkimuksesta.

2 Savon Voima

Tässä osiossa annetaan lukijalle perustiedot tämän diplomityön toimeksiantajasta, Savon Voima Oyj:stä, sekä käydään nopeasti läpi Savon Voiman strategiaa ja biogeenisen hiilidioksidin lähteiden sijainteja. Strategiaa esiteltäessä painotetaan tekijöitä, joilla on todennäköisesti vaikutusta biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämiseen. Sijainteja esiteltäessä käydään läpi biogeenisen hiilidioksidin sijainnit kartalla, mutta ei oteta vielä tarkemmin kantaa potentiaalisimpiin sijainteihin.

2.1 Savon Voima yrityksenä

Savon Voima Oyj on Pohjois-Savolainen energiayhtiö, joka toimii nykyisin Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan alueilla. Savon Voiman toiminta juontaa juurensa vuoteen 1947, jolloin yhtiö perustettiin jälleenrakentamisen käynnistämiseksi. Tämän jälkeen maakunta sähköistyi nopeasti seuraavien vuosikymmenten aikana. Vuonna 1975 liiketoimintaa laajennettiin kaukolämpöön öljykriisin seurauksena, mikä mahdollisti tehokkaamman energian kokonaiskäytön. Sähkömarkkinalain uudistuksen seurauksena sähkön siirto tuli erottaa myyntitoiminnasta ja vuonna 2006 perustettiin tytäryhtiö Savon Voima Verkko Oy. Suurimpien yrittäjäasiakkaiden energiamarkkinariskien hallitsemiseksi perustettiin Savon Voima Salkunhallinta Oy vuonna 2007, joka siirtyi Väre osakeyhtiöön vuonna 2019. Savon Voima omistaa 37,8 % osakeyhtiöstä.

2020-luvulla konsernirakenteeseen ja liiketoimintaan on tullut paljon uutta. Vuonna 2020 Savon Voima osti Joensuusta sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen (CHP) sekä kaukolämpöverkon Fortumin kanssa tehdyllä kaupalla. Vuonna 2022 Savon Voima perusti yhdessä Joensuu Biocoalin kanssa biomassan hankintayhtiö Itä-Suomen Biomassa Oy:n. Vuonna 2024–2025 Lestijärvelle valmistuva 455,4 MW tuulipuistohanke lisää Kymppi-voima Oy:n omistuksen kautta Savon Voiman sähköntuotantoa 32 %. Savon Voiman nykyinen konsernirakenne on kuvan 1 mukainen. (Savon Voima 2024a; Savon Voima 2024b.)



Kuva 1. Savon Voiman nykyinen konsernirakenne (Savon Voima 2024b)

Savon Voima Oyj:n omistaa Savon Energia-holding Oy, joka on kahdenkymmenen omistajakunnan omistama. Savon Voiman tytäryhtiöitä ovat sähköverkkoyhtiö Savon Voima Verkko Oy sekä biomassan hankintayhtiö Itä-Suomen Biomassa Oy. Merkittäviä osakkuuksia Savon Voimalla on Väre Oy:ssä, Varkauden aluelämpö Oy:ssä ja Kymppivoima Oy:ssä. Keskeisiä Savon Voima konsernin tilastoja on esitetty taulukossa 1. (Savon Voima 2024b.)

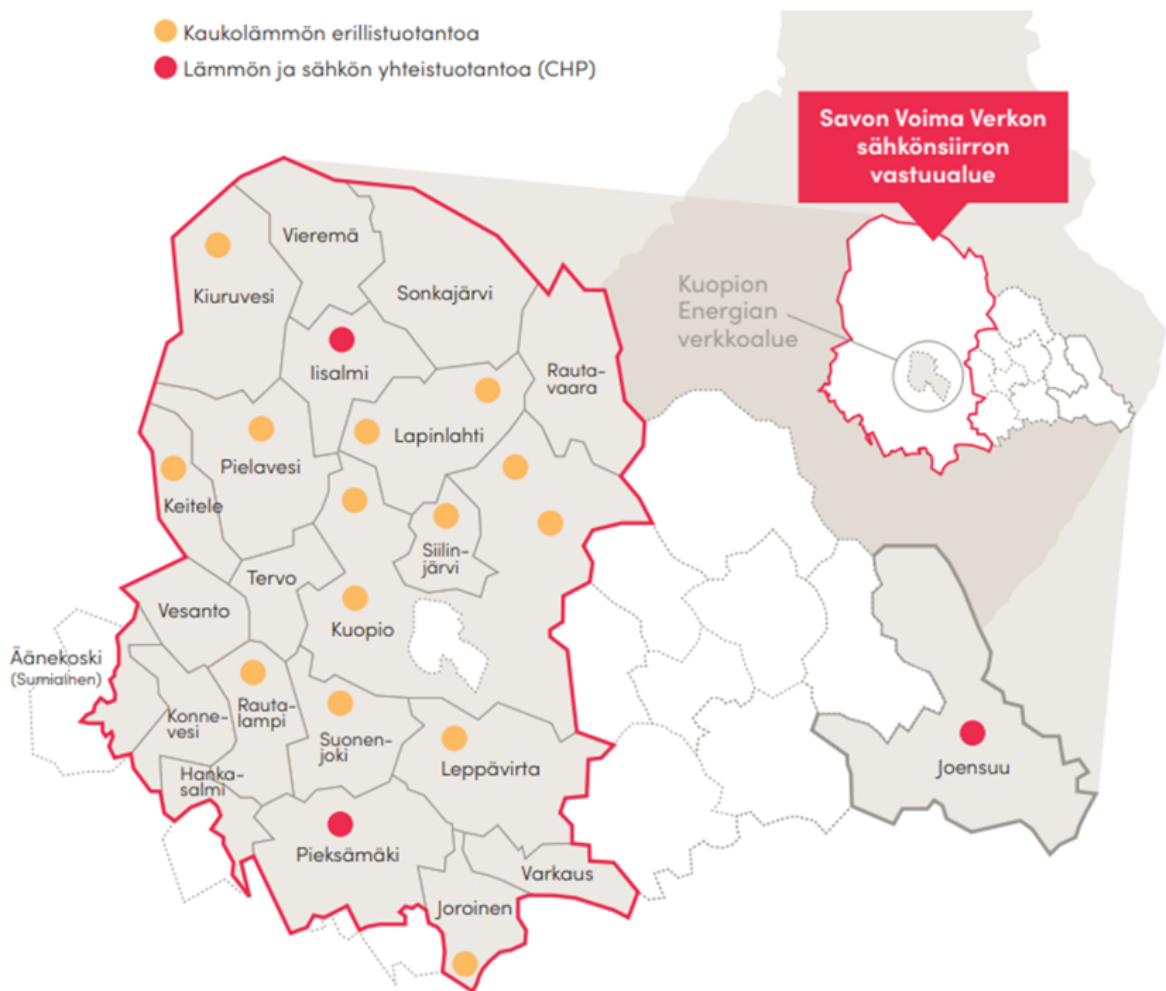
Taulukko 1. Keskeisiä Savon Voima konsernin tilastoja vuodelta 2023 (Savon Voima 2024b)

Liikevaihto	[milj. €]	238,7
Liikevoitto	[milj. €]	47,7
Työntekijät		214
Sähköverkkoa	[km]	27800
Sähköntuotanto	[GWh]	569
Asiakkaita		120892
Kaukolämpöverkkoa	[km]	627
Lämpöenergian myynti	[GWh]	1147
Asiakkaita		5850

Savon Voiman liiketoiminta käsittää sähkön ja lämmön yhteistuotantoa (CHP), lämmön erillistuotantoa, vesivoimaa, sekä kaukolämmön ja sähkön jakelua. Tämän työn kannalta oleellisin liiketoiminta liittyy CHP-energiantuotantoon sekä lämmön erillistuotantoon, sillä näissä tuotantomuodoissa syntyy biogeenistä hiilidioksidia, kun sähköä ja lämpöä tuotetaan polttamalla uusiutuvaa biomassaa. Muu liiketoiminta rajataan tässä työssä pääasiallisesti käsittelyn ulkopuolelle.

2.2 Biogeenisen hiilidioksidin sijainnit

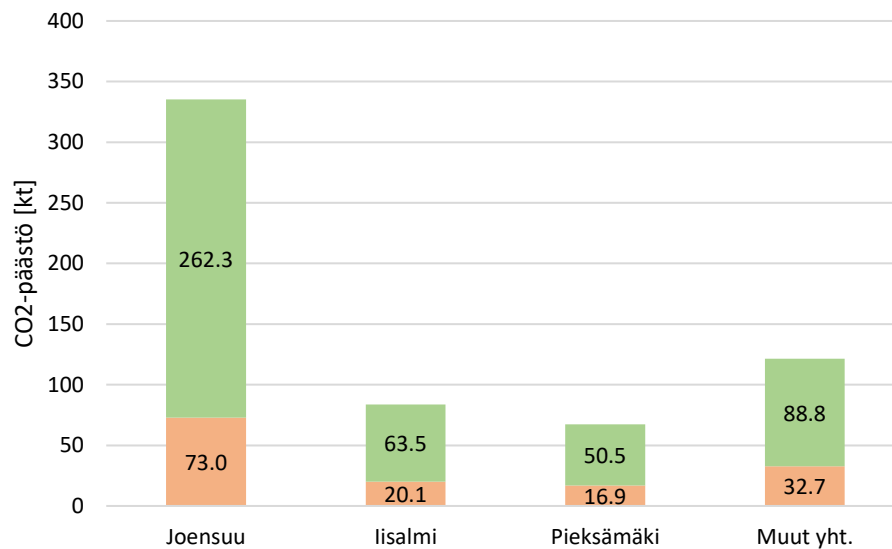
Savon Voiman biogeenisen hiilidioksidin lähteet sijoittuvat Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan alueille. Kuvassa 2 on esitetty Savon Voiman toiminta-alue, josta voidaan nähdä myös biogeenisen hiilidioksidin lähteet. CHP-tuotanto on kuvattu punaisella merkillä ja lämmön erillistuotanto keltaisella merkillä.



Kuva 2. Savon Voiman biogeenisen hiilidioksidin lähteet. Alkuperäinen kuva: (Savon Voima 2024b)

Kuten kuvasta nähdään, CHP-tuotanto on keskittynyt pääasiassa isommille paikkakunnille Iisalmeen, Pieksämäelle ja Joensuuhun. Joensuun voimalaitos on CHP-tuotantolaitoksista selkeästi suurin biogeenisen hiilidioksidin lähde. Voimalaitoksella on kaksi biomassaa käyttävää kattilaa, tehoiltaan 100 MW ja 30 MW. Lisäksi voimalaitoksella on savukaasupesuri, josta saadaan 30 MW verran lisätehoa ja sähkökattila, jonka teho on 35 MW. Alueelle on

myös suunnitteilla P2X-solutionsin P2X-hanke sekä rakennusvaiheessa oleva, Taalerin omistama Joensuu Biocoal biohiilitehdas. Voimalaitoksen hiilidioksidipäästöt olivat noin 335 000 hiilidioksiditonnia vuonna 2023 (Savon Voima 2023). Iisalmen voimalaitosalueella on biopolttoainetta käyttävä CHP-kattila, jolla saavutetaan 15 MW sähköteho. CHP-kattilan apuna toimii toinen lämpökeskuskäytössä oleva biokattila, ja kattiloiden yhteenlaskettu kaukolämpöteho on 45 MW. Pieksämäen voimalaitoksella on samanlainen kattilajärjestely, jossa CHP-kattila tuottaa 10 MW sähkötehon ja kahden kattilan yhteenlaskettu kaukolämpöteho on 45 MW. Tuotantolaitosten hiilidioksidipäästöt on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 3. (Savon Voima 2024c.)



Kuva 3. Tuotantolaitosten biogeeniset (vihreä) ja fossiiliset (oranssi) hiilidioksidipäästöt vuonna 2023 (Savon Voima 2023)

Suurin osa Savon Voiman hiilidioksidipäästöistä on biogeenisiä. Biogeenisen hiilidioksidin osuus tulee tulevaisuudessa nousemaan vielä lisää, kun energiantuotannon tavoitteena on olla hiilineutraalia vuoteen 2030 mennessä (Savon Voima 2024b, 11). Tämän vuoksi fossiilisen hiilidioksidin tarkastelu on lähtökohtaisesti rajattu tämän työn ulkopuolelle. Joensuun voimalaitos on selvästi suurin hiilidioksidin lähde. Iisalmen voimalaitoksen hiilidioksidipäästöt olivat 83 600 tonnia vuonna 2023, joka on noin neljäsosa Joensuun voimalaitoksen hiilidioksidipäästöistä. Vastaavasti Pieksämäen voimalaitoksen hiilidioksidipäästöt olivat 67 400 tonnia vuonna 2023, joka on noin viidesosa Joensuun hiilidioksidipäästöistä. Kuvassa 2

merkityt lämmön erillistuotannon laitokset tuottivat 120 800 tonnin hiilidioksidipäästöt vuonna 2023, mikä vastaa noin kolmasosaa Joensuun voimalaitoksen hiilidioksidipäästöistä. Lämmön erillistuotanto on suurilta osin toteutettu muutaman megawatin tehoisilla arinakattiloilla ja kuten kuvasta 2 nähdään, tuotanto on hyvin hajanaista verrattuna CHP tuotantoon. Hajanaisuus on seurausta asutuksen sijainneista.

2.3 Savon Voiman strategia

Savon Voiman strategiaan kuuluu tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Tämän tavoitteen toteuttamiseksi täytyy etsiä uusia liiketoimintamahdollisuuksia, joista yksi potentiaalinen vaihtoehto on biogeenisen hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen. Tällä hetkellä hiilidioksidi kulkeutuu voimalaitosten ja lämpökeskusten savupiipuista takaisin hiilikiertoon. Biogeenisen hiilidioksidin talteenotto mahdollistaa suljetun hiilikierron, mikäli talteenottoon käytetty energia tuotetaan uusiutuvasti tai jopa hiilinegatiivisen liiketoiminnan, jos hiilidioksidia varastoidaan pysyvästi hiilikierron ulkopuolelle (Alagu et al. 2024, 12). Hiilidioksidin avulla tuotetuilla tuotteilla voidaan myös korvata fossiilista alkuperää olevia tuotteita, kun kysyntä fossiiliselle energialle laskee (Mäkikouri et al. 2024, 150).

Kaukolämmön- ja sähköntuotanto on hyvin kausiluonteista. Energiaa tarvitaan kesällä huomattavasti vähemmän kuin talvella (Huhtinen et al. 2013, 12). Savon Voiman strategiaan kuuluu myös tavoite luopua kesän aikaisesta puunpoltosta. Tällä on vaikutusta hiilidioksidin talteenottoon ja hyödyntämiseen, sillä kausiluonteisuuden vaikutukset heijastuvat myös hiilidioksidin käyttäjiin, mikä täytyy ottaa huomioon liiketoimintavaihtoehtoja arvioitaessa.

Muita työn kannalta oleellisia strategiakohtia Savon Voiman strategiassa ovat ”asiakas keskiöön” sekä ”puhtaan huomisen alueellinen rakentaja”. Asiakasnäkökulman huomioiminen on tärkeää uutta liiketoimintaa muodostettaessa ja arvoketjua tutkittaessa. Asiakkaan tarpeet tunnistamalla voidaan luoda lisäarvoa biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyvästä liiketoiminnasta. Tätä käsitellään tarkemmin työn loppuosassa. Myös puhtaan huomisen alueellisen rakentajan strategia otetaan työssä huomioon liiketoimintavaihtoehtoja tutkittaessa. Strategian mukaisesti on hyvä korostaa vaihtoehtoja ja toimintamalleja, jotka luovat paikallista arvoa Savon Voiman liiketoiminta-alueella.

3 Biogeenisen hiilidioksidin hyödyntäminen ja varastointi

Toistaiseksi teollisuudessa ja energiatuotannossa muodostunut hiilidioksidi on päätyntä enimmäkseen taivaalle. Tämän toistaiseksi hyödyntämättömän ainevirran hyödyntämistä on alettu tutkia entistä enemmän hiilidioksidin talteenotolla saavutettavien potentiaalisten hyötyjen vuoksi. Tässä osiossa käydään läpi ajatusta hiilidioksidin talteenoton taustalla, esitellään aiheen kannalta oleellisia menetelmiä ja käsitteitä sekä pohditaan Savon Voimalle oleellisia tekijöitä hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyen. Lisäksi pohditaan alustavasti Savon Voiman kannalta optimaalisia ratkaisuja, jos jollain menetelmällä on selkeää merkitystä energiayhtiön erityispiirteet huomioiden. Aluksi esitellään hiilidioksidin hyödyntämistä ja varastointia yleisesti sekä käsitellään hiilidioksidin lähteitä. Tämän jälkeen tarkastellaan talteenottoon liittyvää teknologiaa ja logistiikkaa. Teknologiaa tarkastellessa vertaillaan nykyteknologioita ja arvioidaan niiden soveltuvuutta voimalaitoksen yhteyteen. Potentiaalisimman menetelmän kustannusrakenteesta ja soveltuvuudesta voimalaitoksen prosessiin tehdään tarkempia arvioita. Logistiikkaa käsitellessä tarkastellaan logistiikan aiheuttamia vaatimuksia, eri siirtämiskeinoja, sekä siirtämiskeinojen keskinäisiä eroja kustannuksissa. Lopuksi esitellään lyhyesti hiilidioksidista saatavia lopputuotteita ja markkinakehitystä, jotta voidaan arvioida, millaisten toimijoiden kanssa on kannattavaa tehdä liiketoimintaa tulevaisuudessa.

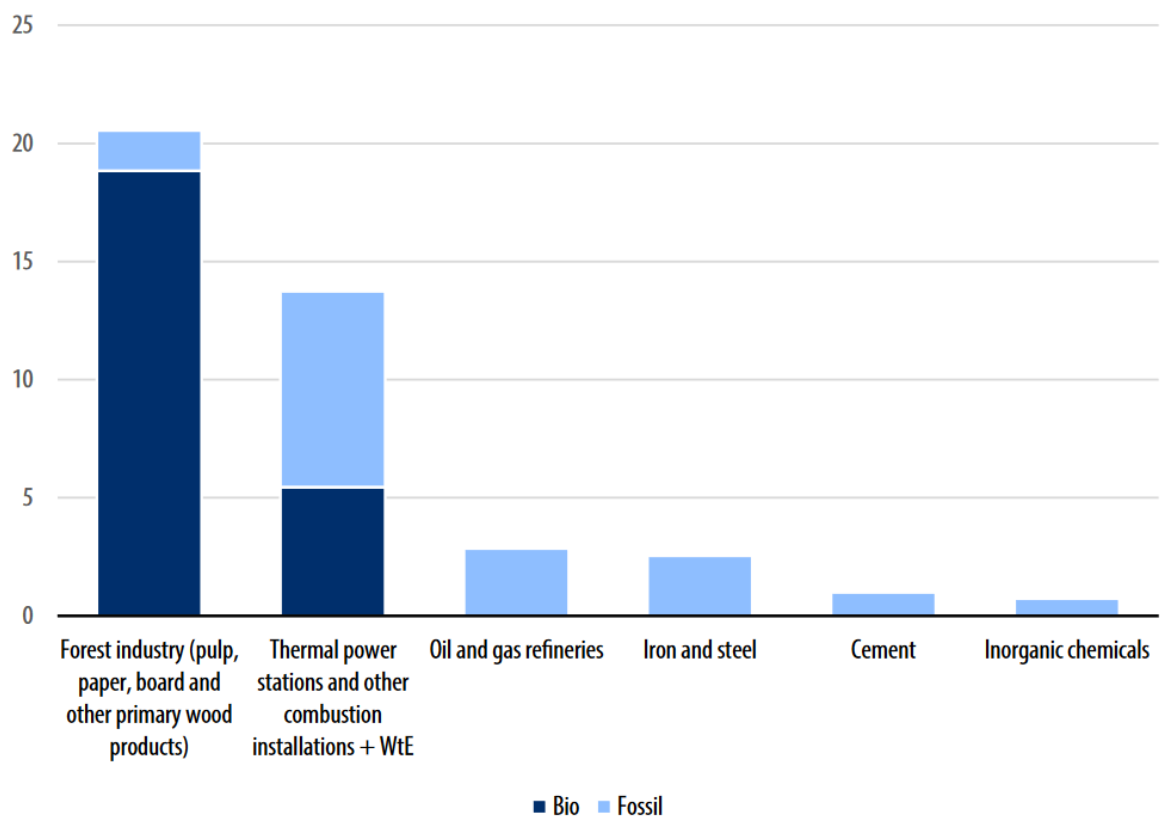
3.1 Yleistä

Osion aluksi käydään läpi yleistietoa hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyen ja esitellään tutkimukseen liittyvää kontekstia lukijalle. Hiilidioksidin lähteitä tutkimalla saadaan yleiskäsitys hiilidioksidin hyödyntämisen tulevaisuuden mahdollisuuksista. Hyödyntämis- ja varastointimahdollisuuksien läpikäyminen antaa lukijalle alustavan yleiskäsityksen aiheesta.

3.1.1 Hiilidioksidin lähteet

Hiilidioksidi on yleinen kaasu, jonka pitoisuus ilmakehässä on kasvanut teollistumisen seurauksena voimakkaasti. Hiilidioksidia voidaan erottaa suoraan ilmakehästä, mutta tämä

menetelmä on vielä toistaiseksi kallista ja kaupallisesti kannattamatonta teollisessa mittakaavassa (Alagu et al. 2024, 30). Tämän työn kannalta oleellisin hiilidioksidin lähde on savukaasu, jota syntyy esimerkiksi metsä- ja energiateollisuudessa polttoaineita poltettaessa höyrykattiloissa. Muita pistemäisiä hiilidioksidin lähteitä ovat myös esimerkiksi sementin valmistus, terästeollisuus ja kemikaalien, kuten ammoniakkin ja bioetanolin tuotanto. Tärkeimmät hiilidioksidin lähteet Suomessa vuonna 2020 on esitetty kuvassa 4.



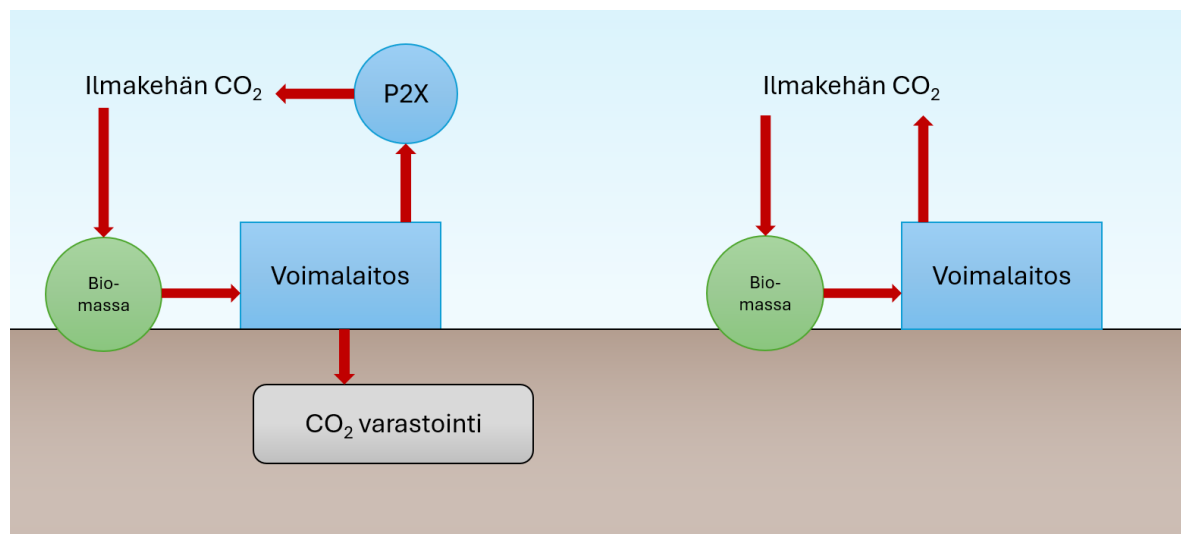
Kuva 4. Tärkeimmät hiilidioksidin lähteet Suomessa (Kujanpää et al. 2023, 40)

Metsäteollisuuden osuus hiilidioksidipäästöistä on korostunut Suomessa. Suurin osa näistä päästöistä on myös biogeenisiä. Voimalaitosten ja lämpökeskusten tuottama hiilidioksidi on lähes samaa mittaluokkaa, mutta tuotanto on hajanaisempaa ja biogeenisen hiilidioksidin osuus on suhteellisesti pienempi. Öljynjalostus, terästeollisuus ja sementin valmistus ovat Suomessa myös merkittäviä hiilidioksidin lähteitä. Vaikka näiden alojen päästöt ovat fossiilisia ja pienempiä kuin metsä- tai energiateollisuudella, päästöt ovat usein keskittyneet pienille alueille, mikä parantaa niiden kilpailukykyä. Hiilidioksidin hyödyntämisenäkökulmasta

hyvän lähteen ominaisuuksiin kuuluu muun muassa korkea hiilidioksidikonsentraatio, suuret hiilidioksidivirrat ja mittaluokka, vähäinen kausivaihtelu ja hiilidioksidin biogeenisyys. (Mäkikouri et al. 2024, 25–29.)

3.1.2 Hiilidioksidin hyödyntämis- ja varastointimenetelmät

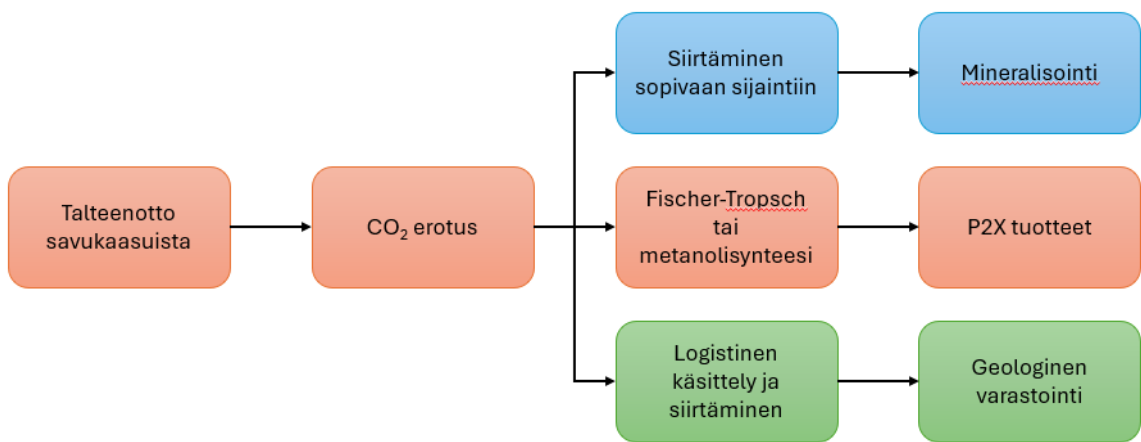
Perinteisesti hiilidioksidia on vapautunut suoraan ilmakehään energiantuotantoprosessien yhteydessä. Fossiilisia polttoaineita poltettaessa tästä aiheutuu positiivisia hiilidioksidipäästöjä, jotka kuormittavat ilmastoa. Biomassaa poltettaessa taas polttoaineesta vapautuvan hiilidioksidin voidaan katsoa olevan hiilineutraalia, jos muusta prosessista ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä. Varastoimalla tätä biogeenistä hiilidioksidia voidaan saavuttaa hiilinegatiivinen energiantuotantoprosessi, jossa ilmakehän hiilidioksidia sitoutuu pysyvästi hiilikieron ulkopuolelle (Durusut et al. 2020, 10). Hiilen kiertoa on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Hiilen kierto hiilidioksidin varastoinnilla ja hyödyntämisellä (vasen) ja ilman (oikea)

Varastointi voidaan tehdä joko varastoimalla hiilidioksidia pysyvästi geologisiin muodostelmiin tai tuottamalla hiilidioksidista mineralisoituja tuotteita, kuten esimerkiksi rakennusmateriaaleja, jolloin hiilidioksidi sitoutuu tuotteisiin käytännössä pysyvästi. Toinen vaihtoehto on hyödyntää biogeenistä hiilidioksidia orgaanisissa tuotteissa, kuten esimerkiksi e-metaanissa ja e-metanolissa, jolloin hiilidioksidi sitoutuu tuotteisiin näiden elinkaaren ajaksi.

Tällöin prosessi ei varsinaisesti ole hiilinegatiivinen, mutta tuotetuilla tuotteilla on mahdollista korvata esimerkiksi fossiilisilla resursseilla tuotettuja tuotteita, mikä vähentää kokonaispäästöjä (Alagu et al. 2024, 12). Tuotetuilla tuotteilla on usein myös korkeampi markkina-arvo, kuin pelkällä savukaasulla tai savukaasusta erotetulla hiilidioksidilla (Mäkikouri et al. 2024, 54). Kuvassa 6 on havainnollistettu hiilidioksidin käyttömahdollisuuksia yleisellä tasolla.



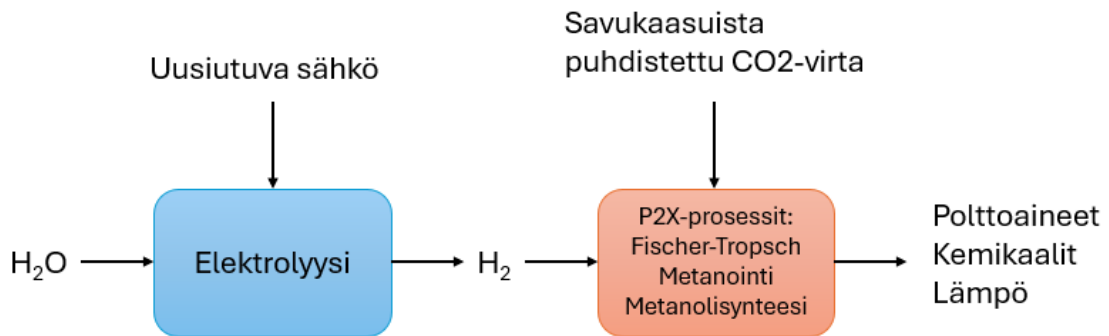
Kuva 6. Hiilidioksidin hyödyntämis- ja varastointimahdollisuudet

Tällä hetkellä teknologisesti kehittynein hiilidioksidin varastointimuoto on varastointi geologisiin muodostumiin, kuten sopivaan suolavesikerrostumaan tai käytettyihin kaasu- ja öljyesiintymiin. Menetelmän hinta-arvio vaihtelee voimakkaasti logistiikan mukaan välillä 30–350 €/t_{CO2} (Kujanpää et al. 2023, 67). Muut varastointivaihtoehdot ovat hiilidioksidin varastointi syväälle meren pohjaan, hyödyntämiskelvottomiin hiiliesiintymiin tai sitouttaminen mineraaleihin, kuten kaivosjätteisiin. Kaikki nämä menetelmät vaativat hiilidioksidin kuljettamista tuotantosijainnista varastointisijaintiin. Suolavesikerrostumiin voidaan varastoida hiilidioksidia, sillä näille kerrostumille ei ole keksitty vaihtoehtoisia käyttöä ja kerrostumissa vaikuttaa useita eri mekanismeja, jotka minimoivat hiilidioksidivuodot takaisin ilmakehään. Tärkein varastointia edistävä tekijä on tiheä kaasua läpäisemätön kivilaji suolavesikerrostuman yläosassa, joka pitää hiilidioksidin varastointikerrostumassa. Muita tekijöitä ovat esimerkiksi huokoinen kiviaines, jolloin hiilidioksidi jää huokosiin suolaveden muodostaman paineen vaikutuksesta, liukeneminen suolaveteen sekä kemialliset reaktiot suolaveden ja kerrostuman mineraalien kanssa. Käytetyt öljy- ja kaasuesiintymät ovat myös

lupaavia varastointikohteita, sillä niistä on olemassa laajaa tutkimustietoa ja valmiiksi kehitettyä infrastruktuuria, kuten esimerkiksi putkistoja ja poraustorneja. Hiilidioksidin varastointia edistävät tekijät ovat samankaltaiset suolavesikerrostumien kanssa, tärkeimpänä tiivis, kaasua läpäisemätön kivilaji esiintymän yläosassa. (Aminu et al. 2017, 1390; Teir et al. 2011, 44.)

Yllä mainittuja menetelmiä tarkasteltaessa on huomattava, että Suomen maaperä ei tarjoa tällaisia mahdollisuuksia hiilidioksidin varastointiin. Lähimmät nykyisellään käytössä olevat sijainnit geologiselle varastoinnille ovat Sleipnerissä ja Snøhvitissä Norjan rannikolla, jonne hiilidioksidi olisi kuljetettava (Kujanpää et al. 2023, 34). Toinen vaihtoehto on käyttää muita varastointimenetelmiä, joista lupaavin Suomen oloissa on hiilidioksidin sitouttaminen kaivosjätteisiin. Tämän menetelmän etuna on pysyvä varastointi ilman vuotoja ja mahdollisuus tuottaa hiilidioksidista rakennusmateriaaleja ilman vetyä. Nykyisiä Suomessa sopivia kaivoksia menetelmälle ovat esimerkiksi Elijärven, Hituran ja Kevitsan kaivokset (Mäki-kouri et al. 2024, 51). Sopivia mineraaleja menetelmälle löytyy myös pääasiassa Pohjois- ja Itä-Suomesta, mutta nämä mineraalivarat täytyy ensin ottaa käyttöön, ennen kuin näissä sijainneissa voidaan sitoa hiilidioksidia. Tällöin varastointikapasiteetti olisi noin 20–30 Mt hiilidioksidia vuodessa. Hinta-arvio menetelmälle nykyhetkessä ja 2030-luvulle on hieman alle 100 €/tCO₂ (Kujanpää et al. 2023, 35, 67). Mineraaliesiintymien sijainti Itä-Suomessa lisää tämän menetelmän mahdollista potentiaalia Savon Voimalle, kun logistiset etäisyydet pysyvät suhteellisen lyhyinä.

Hiilidioksidista on mahdollista tuottaa myös polttoaineita tai kemianteollisuuden tuotteita. Suurin osa näistä tuotteista tuotetaan vedyn ja sähkön avulla Power-to-X-prosessilla (P2X). Prosessi on havainnollistettu yksinkertaistettuna kuvassa 7.



Kuva 7. Power-to-X-prosessi yksinkertaistettuna

P2X-prosessissa tarvittava vety tuotetaan usein vedestä uusiutuvalla sähköllä elektrolyysin avulla. Saadulla vedyllä ja hiilidioksidilla voidaan tuottaa erilaisia hiilivetyjä ja kemikaaleja, joita voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineina. Sivutuotteena syntyy myös lämpöä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmityksessä. Saatavia lopputuotteita tarkastellaan tarkemmin osiossa 3.4. P2X-prosessit sisältävät useita eri prosesseja, joista tärkeimmät ovat metanointi, metanolisynteesi, sekä Fischer-Tropsch-prosessi. Näillä prosesseilla voidaan tuottaa vastaavassa järjestyksessä metaania, metanolia sekä lentopolttoaineita, kuten e-kerosiinia. Hyödyntämismenetelmää tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että kaupallisuuden varmistamiseksi hiilidioksidivirran tulisi olla melko suuri. Tämä sulkee pois vaihtoehdon hyödyntää pienempiä, hajanaisesti sijoitettuja tuotantolaitoksia (Olsson et al. 2020, 12).

3.2 Hiilidioksidin talteenottomenetelmät

Hiilidioksidin talteenottoteknologia on merkittävä kustannusten aiheuttaja hiilidioksidin hyödyntämisessä. Tässä osiossa käsitellään hiilidioksidin talteenottomenetelmiä hiilidioksidin erottamiseksi savukaasuista. Osion alussa tarkastellaan savukaasun ominaisuuksia hiilidioksidin lähteenä. Tarkastelun kohteena on esimerkiksi savukaasun yleinen soveltuvuus hiilidioksidin lähteenä sekä savukaasun ominaisuuksien aiheuttamia vaikutuksia teknologiaan ja kustannuksiin. Tämän jälkeen esitellään nykyisin käytössä olevia erotusmenetelmiä sekä käsitellään niiden vahvuuksia. Menetelmistä kaksi lupaavinta valitaan tarkemman tarkastelun kohteeksi, jonka jälkeen valitaan lupaavin menetelmä. Lopuksi arvioidaan tämän menetelmän vaatimuksia ja vaikutuksia voimalaitosprosessiin sekä tehdään alustava arvio menetelmän aiheuttamista kustannuksista.

3.2.1 Savukaasu hiilidioksidin lähteenä

Hiilidioksidia syntyy biomassaa poltettaessa, kun orgaaniset yhdisteet muodostavat palamistuotteita palamisreaktioissa. Palamistuotteet sisältävät hiilidioksidin lisäksi myös vettä, rikin ja typen oksideja, sekä palamisilman mukana tullutta reagoimatonta typpeä (Raiko et al. 2002, 36). Biomassaa poltettaessa hiilidioksidin mooliosuus savukaasuista on tyypillisesti 14–20 % ja osapaine noin 12,2–14,2 kPa riippuen polttoaineen kosteudesta. Typen osuus on 57–80 % ja vesihöyryn osuus 0–29 % muiden palamistuotteiden osuuksien ollessa huomattavasti pienempiä (Huhtinen et al. 2000, 90). Nämä muut palamistuotteet sisältävät esimerkiksi erilaisia kloori-, natrium- ja kaliumyhdisteitä, raskasmetalleja sekä polyaromaattisia yhdisteitä. Nämä yhdisteet ovat myrkyllisiä ja saattavat vaurioittaa savukaasukanavaa, joten niiden minimointi erilaisin päästönhallintajärjestelmin on tärkeää (Vakkilainen 2017, 45–54; Huhtinen et al. 2000, 92).

Taulukko 2. Pistemäisten hiilidioksidin lähteiden hiilidioksidin osapaineita (Kearns et al. 2021, 25)

Hiilidioksidin lähde	Hiilidioksidin osapaine [kPa]
maakaasukombivoimalaitos	3,8–4,6
hiilivoimalaitos	12,2–14,2
biomassa/jätteenpolttolaitos	10,1–12,2
sementinvalmistus	18–30
sellutehdas	~18
terästeollisuus	3,7–35
bioetanolin valmistus	>85

Energiateollisuuden savukaasun käyttö hiilidioksidin hyödyntämiseen sisältää omat haasteensa, sillä tuotettu hiilidioksidin määrä vaihtelee voimakkaasti vuodenajan mukaan, mikä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia talteenoton kapasiteettia mitoitettaessa. Mittaluokka on pienempi esimerkiksi metsäteollisuuteen verrattuna, jolloin suuren mittaluokan edut jäävät pienemmäksi. Lisäksi savukaasun matalan hiilidioksidipitoisuuden vuoksi hiilidioksidi täytyy erottaa muista savukaasukomponenteista, jotta sen hyödyntäminen tai siirtäminen olisi kannattavaa. Suurin osa talteenoton hinnasta biomassaa poltettaessa muodostuukin alhaisen

hiilidioksidipitoisuuden vaikutuksesta (Kearns et al. 2021, 26). Vertailun vuoksi muiden pistemäisten lähteiden hiilidioksidivirtojen osapaineita on esitetty taulukossa 2. Toisaalta hiilidioksidin korkea biogeenisyysaste ja tämän tuoma mahdollisuus negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin saattaa lisätä energiateollisuuden hiilidioksidivirran houkuttelevuutta.

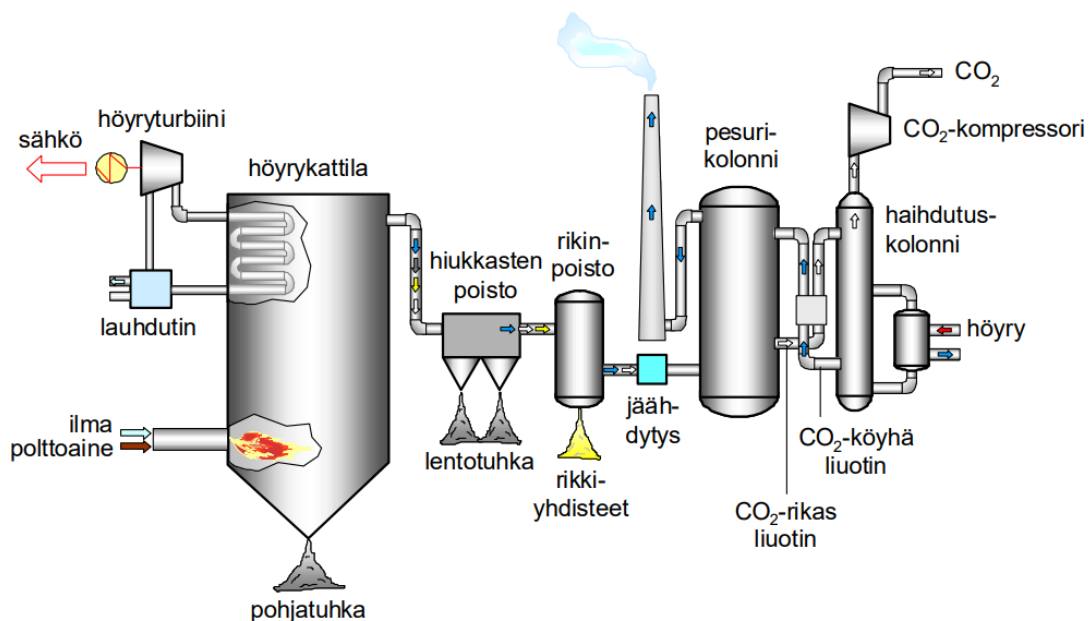
3.2.2 Talteenottoteknologiat

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista voidaan jakaa karkeasti kolmeen vaihtoehtoon. Hiilidioksidin erottaminen ennen polttoa, erottaminen polton jälkeen savukaasuista sekä happipolttu. Hiilidioksidin erotus polttoaineesta ennen palamistapahtumaa rajataan tämän työn käsittelyn ulkopuolelle, sillä menetelmä on sovellettavissa pääasiassa maakaasu- ja kaasutusvoimalaitosten yhteydessä, mikä tekee menetelmästä vähemmän houkuttelevan Savon Voiman tuotantolaitokset huomioiden. Happipolttu ja hiilidioksidin erotus savukaasuista polton jälkeen ovat sovellettavissa kiinteää polttoainetta polttaville laitoksille (Teir et al. 2011, 13). Pääasiallisia talteenottoteknologioita hiilidioksidin erottamiseksi savukaasuista ovat esimerkiksi absorptiomenetelmä, adsorptiomenetelmä, kryogeeninen erotus, kalsiumkiertomenetelmä sekä erilaiset membraanisuodattimet. Eri teknologioita on hyvä verrata aluksi karkeasti keskenään, jotta tarkastelu voidaan rajata lupaavimpiin teknologioihin. Vertailun tarkoitus on löytää lupaavimmat teknologiat hiilidioksidin talteenottoon voimalaitoksen savukaasuista, joten tässä kohtaa ei vielä eritellä teknologioiden yksityiskohtia tarkemmin. Vertailu on tehty koostamalla tietoa useista lähteistä ja tulokset on esitetty taulukossa 3 (Aaron & Tsouris 2011; Akeeb et al. 2022; Alagu et al. 2024; Kearns et al. 2021).

Taulukko 3. Hiilidioksidin talteenottomenetelmien alustavaa vertailua

	hinta	energia-vaatimus	TRL	CO2 puhtaus	soveltuvuus savukaasuihin
absorptio (MEA)	korkea	korkea	9	>95 %	hyvä
adsorptio (pressure swing)	matala	matala	9	matala	heikko
happipolttu	keskiverto	keskiverto	6–7	korkea	hyvä
kryogeeninen suodatus	korkea	todella korkea	<6	99,95 %	heikko
kalsiumkierto	keskiverto	keskiverto	6–7	>95 %	hyvä
membraanisuodatus	matala	matala	6–7	matala	hyvä

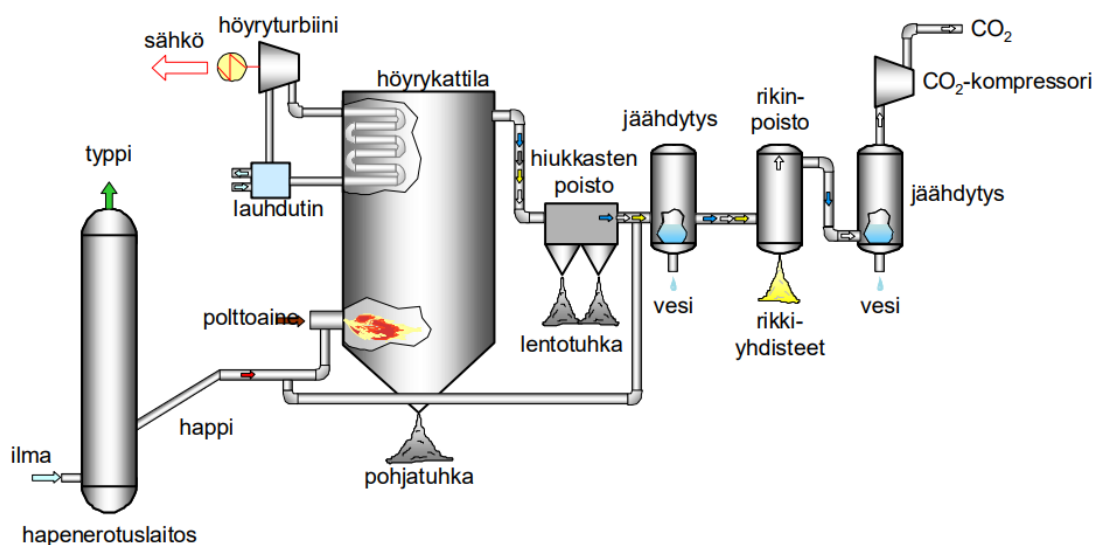
Keskeisiä tekijöitä eri teknologioiden vertailussa ovat menetelmästä aiheutuneet kustannukset, menetelmän energiavaatimus, teknologian kehitysaste (TRL), talteenotetun hiilidioksidivirran puhtaus sekä soveltuvuus hiilidioksidin erottamiseen savukaasuista. Amiinipesuriin perustuva absorptio on selkeä vaihtoehto tarkasteluun sen korkeista kustannuksista huolimatta, sillä menetelmästä on saatavilla laajaa tutkimustietoa pitkän käyttökokemuksen ajalta. Taulukkoa 3 tarkastelemalla huomataan, että kryogeeninen suodatus sekä adsorptio voidaan sulkea pois niiden heikon savukaasulle soveltuvuuden vuoksi. Myös membraanisuodattimet voidaan rajata pois tarkemmasta talteenottoteknologian tarkastelusta, sillä ne eivät kykene tuottamaan yksinään tarpeeksi puhdasta hiilidioksidivirtaa. On kuitenkin hyvä huomata, että membraanisuodattimet soveltuvat esimerkiksi avustavaksi talteenottoteknologiaksi toisen teknologian rinnalle niiden yksinkertaisuuden ja alhaisten kustannusten vuoksi. Happipolttaja ja kalsiumkierto ovat vaihtoehtoina samankaltaisia. Molemmat toimivat samalla periaatteella, jossa palamisilma korvataan lähes puhtaalla happivirralla ja molemmat ovat lupaavia vaihtoehtoja tulevaisuudessa korvaamaan kalliita nyky menetelmiä. Kumpikin teknologia on kuitenkin vasta saavuttamassa kaupallisuutta (Kearns et al. 2021, 17). Rajataan tässä kohtaa kuitenkin kehittyvien teknologioiden tarkastelu vain happipolttajaan, sillä happipolttajasta on paremmin tietoa saatavilla biogeenisen hiilidioksidivirran hyödyntämiseen (Bennett et al. 2021, 3). Jäljelle jäävät siis absorptio amiinipesurilla sekä happipolttaja.



Kuva 8. Hiilidioksidin erotus savukaasuista absorptiolla (Teir et al. 2011, 14)

Kuvassa 8 on esitetty esimerkkijärjestely absorptiomenetelmään perustuvasta hiilidioksidin talteenotosta. Absorptiolaitteisto ei aiheuta merkittäviä muutoksia voimalaitosprosessiin ennen savukaasukanavaa. Sen sijaan päästönhallintajärjestelmään on lisätty pesuri- ja haihdutuskolonnit, joiden tehtävänä on erottaa hiilidioksidi savukaasuista. Savukaasu täytyy jäähdyttää ennen pesuria tai pesurissa ja mahdolliset rikkiyhdisteet tulee poistaa huolellisesti, sillä ne hajottavat käytettäviä liuottimia (Teir et al. 2011, 13). Pesurissa käytetään kemiallisia liuottimia, koska ne sopivat paremmin savukaasulle, jonka hiilidioksidin osapaine on kohtuullisen alhainen (IEAGHG 2019, 48). Yleisiä liuottimia ovat esimerkiksi monoetanoli-amiinit (MEA), dietanoliamiinit (DEA), metyylietanoliamiinit (MDEA) sekä tulevaisuudessa mahdollisesti myös ammoniakki (Teir et al. 2011, 13). Pesurikolonnissa oleva liuotin absorboi hiilidioksidin, kun lämpötila on noin 40–60 °C, minkä jälkeen seos siirretään haihdutuskoloniin. Siellä hiilidioksidi haihdutetaan nostamalla seoksen lämpötilaa välille 120–140 °C (Alagu et al. 2024, 23). Tämä tehdään erillisessä lämmönvaihtimessa (englanniksi ”reboiler”), jonka tarvitsema lämpö on mahdollista ottaa esimerkiksi voimalaitoksen höyryvirrasta. Tämä vaihe vaatii runsaasti energiaa ja vaikuttaa merkittävästi voimalaitoksen hyötysuhteeseen (Romeo et al. 2008, 1040; Liszka et al. 2013, 88). Lopuksi hiilidioksidi painistetaan käyttöä varten ja jäljelle jäänyt liuotin palautetaan pesurikoloniin.

Typpi on inertti kaasu, eikä pääasiassa reagoi palamistapahtumassa muiden yhdisteiden kanssa. Poistamalla typpi palamisilmasta saadaan savukaasuiksi lähes puhdas vesihöyryn ja hiilidioksidin seos, jotka on helppo erottaa toisistaan. Tämä voidaan saavuttaa happipoltolla, jossa typpipitoinen palamisilma korvataan lähes puhtaalla happivirralla. Teknologia on ollut kehitteillä jo vuosikymmeniä. Happipolton peruseriaate ja laitteisto on esitelty kuvassa 9.



Kuva 9. Hiilidioksidin erottaminen happipolton avulla (Teir et al. 2011)

Laitteiston alussa on hapenerotuslaitos, jossa happi erotetaan sisään otettavasta ilmasta. Nykyiset, voimalaitoskäyttöön soveltuvat laitteistot perustuvat hapen ja typen erottamiseen kryogeenisesti äärimmäisen kylmässä lämpötilassa, jossa kaasukomponentit voidaan erottaa toisistaan niiden erisuuruisten kiehumispisteiden avulla (Erdöl et al. 2024, 2). Hapen erottamiseen on myös kehitteillä keraamiseen suodatukseen perustuva menetelmä, englanniksi ”Oxygen Transport Reactor” (Nemitallah et al. 2019, 24). Menetelmän hintakehitystä on syytä seurata tulevaisuudessa, sillä se saattaa vaikuttaa happipolton kannattavuuteen (Teir et al. 2011, 23). Osa muodostuneista, pääasiassa hiilidioksidia ja vesihöyryä sisältävistä, savukaasuista kierrätetään takaisin palamisilmapuolelle, jotta palamislämpötila voidaan pitää suunnitellulla tasolla (Akeeb et al. 2022, 2). Savukaasun kierrätys voidaan järjestää kostealla tai kuivalla savukaasulla. Vaihtoehtojen välillä ei ole merkittävää eroa, kunhan rikkipitoisuudet ovat pieniä tai kierrätyksen lämpötila on happokastepisteen yläpuolella. Toinen vaihtoehto on myös lisätä polttotapahtumaan vesihöyryä, jolloin paine-erot kattilan sisällä tasaantuvat. Haittapuolena on vesihöyryn sitoma energia, mutta matalan lämpötilan kaukolämmönvaihtimet ovat yksi keino, jolla tämä energia voidaan mahdollisesti ottaa talteen (Leckner 2023, 1). Kattilan jälkeiset päästönhallintajärjestelmät, kuten esimerkiksi sähkösuodattimet, SCR-järjestelmä tai savukaasupesuri voidaan pitää ennallaan, sillä happipolttolaitteistolla ei ole vaikutusta näihin. Jäljellä olevat savukaasut puhdistetaan vedestä ja hiilidioksidi paineistetaan käyttöä tai varastointia varten (Nemitallah et al. 2019, 49).

Vertaillaan lyhyesti näitä kahta teknologiaa, jotta voidaan valita yksi ratkaisu lopullista tarkastelua varten. Amiinipesurin vahvuuksiin kuuluu yli 60 vuoden ajalta kaupallisesti todennettu toimivuus ja sovellettavuus jo olemassa olevaan voimalaitosinfrastruktuuriin. Happipoltto puolestaan on kehittyvä teknologia, jonka tulee vielä todistaa kannattavuus kaupallisella tasolla tulevaisuudessa, sillä hinta-arviot vaihtelevat melko voimakkaasti teollisuudenalan ja kokoluokan mukaisesti (Akeeb et al. 2022, 9). Amiinipesuri ei vaadi merkittävää operointia, mikä yksinkertaistaa prosessia (Aaron & Tsouris, 2005). Muita etuja ovat myös helppo integroitavuus ja jälkiasentaminen voimalaitosprosessiin sekä korkean hiilidioksidipitoisuuden saavuttaminen melko helposti (Dziejarski et al. 2023, 12). Operointikustannukset nousevat todennäköisesti kuitenkin happipolttoa korkeammalle (Berghout et al. 2013, 276). Happipoltto vaatii todennäköisesti amiinipesuriakin vähemmän operointia, kun järjestelmä on integroitu voimalaitokseen. Happipolttojärjestelmä on myös jälkiasennettavissa, joskin täydellinen prosessin optimointi saattaa vaatia kattilan mitoituksen tarkastelua (Teir et al. 2011, 19). Happipolton etuna on myös potentiaalisesti alhaisemmat operointikustannukset, riippumattomuus kemikaaleista, korkea potentiaali ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi sekä hyvä yhteensopivuus erityisesti CHP-voimalaitoksiin (Bennett et al. 2021, 3; Teir et al. 2021, 18). Näiden suhteen amiinipesurilla on useita haittapuolia, kuten esimerkiksi tarvittavien kemikaalien myrkyllisyys, korkea energiantarve sekä kemiallisten reaktioiden aiheuttama korroosio ja amiinien kuluminen. Kemiallisten reaktioiden vuoksi on erittäin tärkeää, että amiinipesurille johdettu hiilidioksidivirta sisältäisi mahdollisimman vähän esimerkiksi rikin oksideja tai happea. Nykytilanteessa happipoltossa hapen erottaminen on prosessin energiaintensiivisin vaihe ja saattaa pudottaa CHP-voimalaitoksen tai lämpökeskuksen hyötysuhdetta noin 10 % verran (Leckner 2023, 4). Amiinipesurin vaikutus hyötysuhteeseen CHP-voimalaitoksella on suunnilleen samaa luokkaa (Liszka et al. 2013, 91).

Ottaen huomioon yllä mainitut tekijät, tämän työn laskentaosiota varten valittava talteenotomenetelmä on savukaasun jälkeinen hiilidioksidin erotus absorptiomenetelmällä. Amiinipesurilla tapahtuva hiilidioksidin talteenotto toimii lähtökohtana tarkastelulle, koska menetelmä on ollut käytössä jo 60-luvulta asti ja tekniikka on pitkälle kehitettyä. Happipolton tarkastelu ei ole mielekäästä, sillä saatavat tulokset sisältävät merkittäviä epävarmuustekijöitä ja saadut tiedot voivat vanhentua hyvin nopeasti. Amiinipesurin tarkastelusta saatu tieto on potentiaalisesti tarkempaa, ja tuloksia voidaan verrata myös tulevaisuudessa kehittyviin ja muuttuviin happipolton kustannuksiin.

3.2.3 Talteenoton vaikutus voimalaitoksen toimintaan

Hiilidioksidin talteenoton vaikutusta sellutehtaiden ja lauhdevoimalaitosten toimintaan on tutkittu runsaasti. Vastaavasti tutkimuksia talteenoton vaikutuksesta CHP-voimalaitosten toimintaan on huomattavasti vähemmän saatavilla. Tätä osiota kirjoittaessa on painotettu CHP-voimalaitoksia koskevia tutkimuksia, mutta tarkastelu sisältää osittain myös lauhdevoimalle tehtyjä tutkimuksia. Yleisesti amiinipesurin integroiminen CHP-prosessiin vaikuttaa lupaavalta, sillä lämmön hyödyntäminen sähköntuotannon ohella pienentää talteenoton negatiivista vaikutusta laitoksen hyötysuhteelle. Laitoksen hyötysuhteen pudotus on noin 10 % luokkaa (Liszka et al. 2013, 91).

MEA liuoksen höyrystäminen vaatii höyryä noin 2,8–3,7 GJ/tCO₂ ja sähköä noin 100 kWh/tCO₂ (Romeo et al. 2008, 1042; Bryngelsson & Westermark 2009, 1404). Sähköä kuluu esimerkiksi pumppujen ja muiden oheislaitteiden käyttöön. Tarvittavan höyryvirran arvot ovat usein 126,1 °C ja 2,4 bar luokkaa. Amiinipesurin ja CO₂-kompressoreiden tarvitsema höyryn massavirta on yhteensä noin 60 kg/s voimalaitoksella, jonka polttoaineteho on 200 MW (Liszka et al. 2013, 10). Aiheesta tehdyissä tutkimuksissa talteenoton vaikutus muihin laitoksen höyryvirtoihin on jäänyt melko vähäiseksi. Esimerkiksi Liszka et al. (2013) tekemässä tutkimuksessa merkittävimmät erot ovat turbiinin välitoissa, joiden välinen suhde höyryvirroissa vaihtelee hieman muuttuneen prosessin vaikutuksesta. Lisäksi höyryn massavirrat ja polttoaineen kulutus amiinipesurin kanssa ovat noin 10 % suuremmat kuin ilman hiilidioksidin talteenottoa.

Merkittävimmät talteenoton aiheuttamat erot Liszka et al. (2013) tutkimuksessa ovat kaukolämmön ja sähkön tuotannossa. Voimalaitoksen nettosähköteho on pudonnut oheislaitteiden tehovaatimuksen johdosta 60,10 MW_e tehosta 50,80 MW_e tehoon. Kaukolämmönvaihtimille saatava teho on pudonnut 110,22 MW_{th} tehosta 57,02 MW_{th} tehoon. Erotus aiheutuu kokonaisuudessaan talteenotto-prosessin vaatimasta lämpötehosta. Toisaalta osa hiilidioksidin talteenotto-prosessiin menevästä lämpöenergiasta on mahdollista hyödyntää vielä kaukolämpönä toisaalla, jolloin todellinen vaikutus kaukolämmöntuotantoon jää hieman maltillisemmaksi. Talteenotto-prosessin integrointi lauhdeperäturbiinia käyttäviin laitoksiin jää hieman epäselväksi, sillä tutkimuksen simuloinnissa on käytetty vastapaineturbiinia.

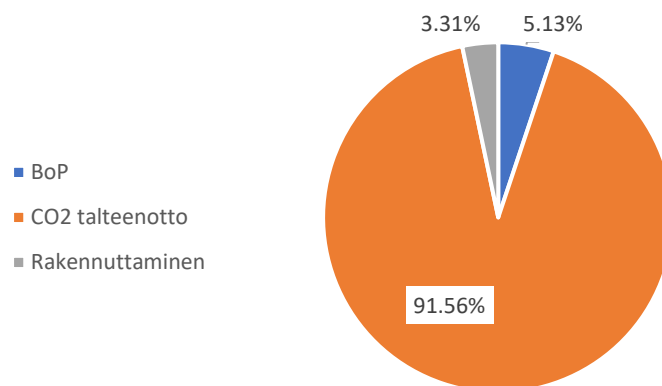
MEA-liuoksen käytöllä on muutamia laatuvaatimuksia, jotka tulee ottaa huomioon prosessisuunnittelussa. Amiinipesurin MEA-liuos ei saa ylittää 122 °C lämpötilaa, tai muuten liuos

alkaa hajoamaan. Päästönhallintajärjestelmällä tulee saavuttaa myös alle 10 ppm SO₂-pitoisuus, sillä muutoin rikin oksidit reagoivat liuoksen kanssa (Liszka et al. 2013, 89; Romeo et al. 2008, 1041).

3.2.4 Talteenoton kustannukset

Hiilidioksidin talteenottojärjestelmän kustannukset vaihtelevat huomattavasti projektin ja saatavilla olevan lähteen mukaan, eikä osaa teknisistä ratkaisuista ole sovellettu vielä kaupallisessa mittakaavassa (Moioli et al. 2024, 3). Tämän vuoksi kustannusten arviointi tehdään tässä työssä olemassa olevan tutkimustiedon pohjalta. Liian tarkka kustannusten erittely saattaa antaa harhaanjohtavan kuvan kustannusten tarkkuudesta, kun todellisuudessa kustannusarviot voivat vaihdella jopa 30 % kumpaankin suuntaan. Kustannuksiin vaikuttaa esimerkiksi laitoksen ajotapa, polttoaineen hinta, talteenotosta aiheutuvat hyötysuhdetappiot, sähkön hinta sekä muut satunnaiset tekijät (Teir et al. 2011, 65).

Amiinipesurijärjestelmän kustannusrakenne voidaan jakaa investointikustannuksiin (CAPEX) sekä operatiivisiin eli juokseviin kustannuksiin (OPEX). Tutkimuksissa esitettyjen kustannusarvioiden suuren vaihtelun lisäksi talteenoton tarkasta kustannusrakenteesta on saatavissa melko vähän tietoa julkisista lähteistä, jolloin joudutaan tekemään yksinkertaistavia oletuksia saatavilla olevien tutkimusten pohjalta.



Kuva 10. Amiinipesurijärjestelmän investointikustannusten rakenne (Panja et al. 2022, 7)

Investointikustannukset ovat suuria kertaluontoisia kulueriä, jotka aiheutuvat laitoksen rakentamisesta ja käyttöönotosta (Turton et al. 2018, 206). Kuvassa 10 on havainnollistettu investointikustannusten rakennetta hiilidioksidin talteenotolle amiinipesurilla. Yli 90 % investointikustannuksista aiheutuu itse talteenottojärjestelmän kustannuksista. Näihin sisältyvät järjestelmän suunnittelu- ja rakennuskustannukset. Noin 5 % kustannuksista on BoP (Balance of Plant) kustannuksia, jotka muodostuvat laitoksen tarvitseman infrastruktuurin, kuten esimerkiksi sähköjärjestelmien, putkistojen ja maanrakennuksen toteuttamisesta. Noin 3 % kustannuksista on rakennuttamisesta aiheutuvia kuluja, jotka aiheutuvat esimerkiksi muusta suunnittelutyöstä, laitoksen käyttöönotosta, valvonnasta ja vaihtelevista satunnaisista kuluista.

Kustannusten määrittämisen lähtökohtana Joensuun ja Iisalmen voimalaitoksille on sopivan mittaluokan arviointi talteenottojärjestelmälle. Tässä työssä tehdään karkea mitoitus saatavilla olevan kirjallisuuden avulla. Tarkempi mitoitus, jossa mitoitetaan tarkat mitat ja suunnitteluarvot haihdutus- ja pesurikolonneille on syytä määrittää, mikäli aiheesta tehdään jatkotutkimusta. Suuremmalla talteenottojärjestelmällä on mahdollista hyödyntää suurempi osa saatavilla olevasta hiilidioksidista. Toisaalta liian iso talteenottojärjestelmä maksaa enemmän. Järjestelmän mitoitukseen vaikuttaa myös CHP-voimalaitokselle ominainen voimakas tuotetun hiilidioksidin määrän vaihtelu vuodenajan mukaan. Talteenottojärjestelmän tulisi pystyä toimimaan myös pienemmillä tehoilla. Talteenottojärjestelmän minimiteho on noin 30 % mitoitetusta tehosta (Abdilahdi et al. 2017, 3107). Kun verrataan näitä kriteerejä voimalaitosten hiilidioksidituotantoon, huomataan, että minimiteho muodostuu ongelmaksi kesäkuukausina, kun kaukolämmön tuotanto on alhaisimmillaan. Tällöin biogeenistä hiilidioksidia olisi tuotava voimalaitoksen ulkopuolelta, jotta talteenottoa ei tarvitsisi ajaa alas. Mittaluokka voidaan määrittää esimerkiksi kirjallisuuden avulla niin, että alle 90 % saatavilla olevasta biogeenisestä hiilidioksidista pyritään erottamaan savukaasuista. Tällöin prosessin vaatima energia pitäisi olla maltillinen biomassaa polttavan laitoksen hiilidioksidikonsentraatiolla (Hsiao & Chang 2024, 8). Lisäksi järjestelmä on parempi alimitoittaa kuin ylimitoittaa, sillä kaukolämpötehon tarve tulee todennäköisesti laskemaan tulevaisuudessa tuotannon sähköistyessä. Tällöin talteenoton suunnittelukapasiteetti olisi suunnilleen 27 t_{CO2}/h Joensuun voimalaitokselle ja 6,8 t_{CO2}/h Iisalmen voimalaitokselle. Investointikustannus voidaan arvioida karkeasti tarkasteltavalle laitokselle, kun tunnetaan jonkin olemassa olevan laitoksen kapasiteetti ja kustannus (Kearns et al. 2021, 27).

$$I_A = I_B \left(\frac{C_A}{C_B} \right)^n \quad (1)$$

jossa I_A on laitoksen A investointikustannus (€), I_B on laitoksen B investointikustannus (€), C_A on laitoksen A kapasiteetti (t_{CO_2}/h), C_B on laitoksen B kapasiteetti (t_{CO_2}/h) ja n on 0,7.

Käytetään referenssilaitoksina Panja et al. (2022) tekemää tutkimusta hiilidioksidin talteenotosta hiilivoimalan yhteydessä sekä Moioli et al. (2024) tekemää tutkimusta hiilidioksidin talteenotosta jätettä polttavan CHP-laitoksen yhteydessä. Tutkimuksia käytetään referenssinä, sillä ne ovat suhteellisen tuoreita ja edustavat mittaluokkia molemmilta puolilta Savon Voiman voimalaitosten mittaluokkia. Panja et al. (2022) referenssitutkimuksessa käytetyt dollarit on muutettu euroiksi valuuttakurssilla USD = 0,9 EUR. Saadut investointikustannukset Joensuun ja Iisalmen voimalaitoksille otetaan referenssilaitosten ja yhtälön 1 avulla laskettujen tulosten keskiarvona ja tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. CAPEX kustannusten arviointi referenssivoimalaitoksen avulla

		Referenssi- laitos 1	Referenssi- laitos 2	Joensuun voi- malaitos	Iisalmen voima- laitos
Talteenoton osuus	[%]	90	90	90	90
Suunnittelukapasiteetti	[t_{CO_2}/h]	402	5	25	6
CAPEX	[M €]	666	22	80	30

Kuten huomataan, mittakaavaedut pienenevät ja suhteelliset kustannukset kasvavat investoitaessa pienempään talteenottojärjestelmään Iisalmen tapauksessa. Iisalmen voimalaitoksen arvioidut investointikustannukset ovat noin 40 % Joensuun voimalaitoksen investointikustannuksista, vaikka tuotantokapasiteetti on vain noin 25 % Joensuun tuotantokapasiteetista.

Operatiiviset kustannukset ovat laitoksen käytöstä aiheutuvia kustannuksia, jotka aiheutuvat laitoksen jokapäiväisestä käytöstä. Operatiiviset kustannukset muodostuvat kiinteiden kustannusten komponentista sekä muuttuvien kustannusten komponentista. Kiinteät OPEX kustannukset sisältävät menoja, joiden määrä ei vaihtelee tuotannon kapasiteetin mukaan, kuten

esimerkiksi henkilöstö- ja huoltokustannukset. Vastaavasti muuttuvat kustannukset sisältävät kuluja, jotka riippuvat toiminnan kapasiteetista, kuten esimerkiksi sähkön, höyryn ja kemikaalien aiheuttamat kustannukset (Turton et al. 2018, 238). Tässä työssä kustannukset on arvioitu karkeasti Panja et al. (2022) sekä Moioli et al. (2024) tekemien tutkimusten mukaan. Operatiivisten kulujen rakenne on kuitenkin esitetty suuntaa antavasti taulukossa 5.

Taulukko 5. Tiivistelmä operatiivisten kustannusten kulurakenteesta

	Panja et al. 2022 [% CAPEX]	Moioli et al. 2024 [% CAPEX]
Kiinteät OPEX kustannukset		
Käyttötyöt	0,5	-
Huoltotyöt ja -tarvikkeet	0,6	-
Muuttuvat OPEX kustannukset		
Raakavesi	0,2	-
Demineralisoitu vesi	0,01	-
Vedenkäsittely	0,1	-
pH:n säätö	0,2	-
Sähkö	3,0	-
Höyry	2,6	-
MEA	1,7	-
Yhteensä	8,8	13,2

Kiinteiden operointikustannusten osalta Panja et al. (2022) tutkimuksessa on otettu huomioon tarvittavan käyttö- ja kunnossapitotyövoiman kustannukset sekä huoltotarvikkeiden ja varaosien aiheuttamat kustannukset. Muuttuvien kustannusten osalta huomioon on otettu tarvittava demineralisoitu vesi sekä raakavesi, jäteveden käsittely, pH:n säätö ennen amiinipesuria, tarvittavat höyryvirrat, omakäyttösähkö sekä pesurissa käytettävä 30 % MEA-liuos. Moioli et al. (2024) tutkimuksessa ei ole eritelty kuluja yhtä tarkasti, mutta operatiivisten kulujen osuus investointikustannuksista on kuitenkin mahdollista huomioida tutkimuksessa esitettyjen taulukoiden avulla. Operatiivisten kustannusten osuus vaihtelee melko merkittävästi tutkimusten välillä. Oletettavasti ero johtuu suuresta mittakaavaedusta. Joensuun voimalaitosta tarkastellessa on syytä valita arvo OPEX-kustannuksille lähempää 8,8 % kustannusosuutta CAPEX-kustannuksista. Iisalmen voimalaitosta tarkastellessa on syytä valita arvo lähempää 13,2 % kustannusosuutta. Tutkimusten arvot ovat myös melko lähellä

metsäteollisuutta ja P2X-menetelmiä koskevien tutkimuksien arvioita (Onarheim et al. 2017; Li et al. 2024).

3.3 Logistiikka

Hiilidioksidin tehokas hyödyntäminen ja käsittely vaatii hyvin suunniteltua logistiikkaa. Hiilidioksidin hyödyntämisen logistiikka pitää sisällään hiilidioksidin esikäsittelyn tuotantolaitoksella, hiilidioksidin siirtämisen tuotantolaitokselta varastoon tai hyödynnettäväksi, sekä käsittelyn määränpäässä. Tässä osiossa käsitellään aluksi eri hyödyntämis- ja varastointitekniologioiden rajapintoja hiilidioksidin talteenoton kanssa, jotta voidaan arvioida tarvittavaa logistiikkaa. Seuraavaksi esitellään pääsialliset hiilidioksidin siirtämiskeinot, sekä näiden keinojen alustavat kustannusarviot. Lopuksi pohditaan logistiikan asettamia rajoituksia ja vaatimuksia, joiden pohjalta tehdään rajaus Savon Voiman biogeenisen hiilidioksidin sijainteihin, joissa on potentiaalia hiilidioksidin hyödyntämiseksi.

3.3.1 Hiilidioksidin jakelumahdollisuudet

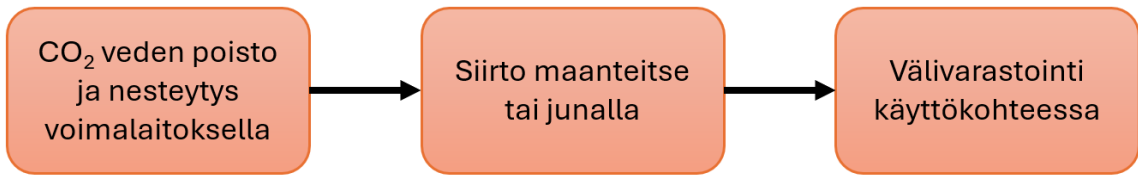
Hiilidioksidin jakelutoimintaa suunniteltaessa on hyvä tarkastella teknologioiden rajapintoja ja niiden aiheuttamia vaatimuksia. P2X-tuotantolaitoksia on pitkälti suunniteltu suoraan pistemäisten hiilidioksidilähteiden välittömään läheisyyteen, jolloin logistiikan kustannukset ovat hiilidioksidin siirtämisen näkökulmasta hyvin pieniä. Lisäksi P2X-teknologia on riippuvaista vetytalouden kehityksestä, sillä teknologian tarvitsema, usein tuulivoimalla tuotettu sähkö ja pistemäiset hiilidioksidin lähteet eivät useimmiten kohtaa maantieteellisesti. Tois-taiseksi on epäselvää, kannattaako kansallisen tason logistisia investointeja lähteä tekemään vedyn vai hiilidioksidin pohjalta, sillä molempien arvioidut logistiset kustannukset ovat samaa luokkaa (Mäkikouri et al. 2024, 166). P2X-teknologian osalta on myös saavutettavissa jonkin asteisia synergiaetuja, kun esimerkiksi P2X-prosessissa syntynyttä lämpöä voidaan käyttää voimalaitoksen ja hiilidioksidin talteenoton prosesseissa. Hiilidioksidia varastoitaessa tai jakelutoimintaa harjoitettaessa vastaavia synergiaetuja ei ole ja hiilidioksidin siirtämiseen liittyvä logistiikka tarvitsee lisäinvestointeja.

Yksi potentiaalinen jakelukohde tulevaisuudessa on P2X-teknologiaan liittyvät käyttökeskittymät, joihin tuodaan hiilidioksidia pistemäisistä lähteistä (VTT 2024, 5). Tällöin

synergiaedut menetetään, mutta keskitetyllä käyttökohteella saattaa olla korkeampi maksukyky hiilidioksidille mittakaavaetujen vuoksi. Toinen potentiaalinen toimijaryhmä jakelua varten on mineralistointitoimijat, sillä toimijat eivät ole riippuvaisia vetytaloudesta ja hiilinegatiivisella betonilla on tulevaisuudessa mahdollisesti korkeaa kysyntää (Sick et al. 2022). Pilottihankkeet on usein sijoitettu suoraan lopputuotetta vastaavaan sijaintiin. Rakennusmateriaalien kohdalla tämä tulee todennäköisesti tarkoittamaan hiilidioksidin siirtämistä esimerkiksi lähimmän betonitehtaan läheisyyteen, jossa hiilidioksidia voidaan hyödyntää vähähiilisen betonin tuotantoon. Kaivosjätteisiin sitouttamalla hiilidioksidi taas tulee siirtää mineralisointiin soveltuvia mineraaleja sisältävän kaivoksen yhteyteen. Geologisessa varastoinnissa hiilidioksidi on sijoitettava lähimpään sopivaan geologiseen muodostumaan, joita on esimerkiksi Itämerellä ja Pohjanmerellä. Tällöin logistiikkakustannukset kasvavat suurimmiksi verrattuna muihin menetelmiin, mutta menetelmä on teknologisesti toteutettavissa jo nykyhetkessä (Mäkikouri et al. 2024, 134).

3.3.2 Hiilidioksidin siirtäminen ja logistiikkaketju

Pääasialliset siirtämiskeinot hiilidioksidille ovat putkisiirto, siirto laivalla, siirto junalla ja siirto maanteitse. Putkisiirto ja laivalla siirto soveltuvat hyvin pitkille siirtomatkaille esimerkiksi geologisen varastoinnin yhteydessä. Putkisiirto on herkkä siirtokapasiteetin mukaan, jolloin kustannukset laskevat suurilla siirtokapasiteeteilla. Laivalla siirtämisellä ei saavuteta samanlaisia mittakaavaetuja kapasiteettia kasvattamalla. Laivasiirto taas on herkkä siirtomatkan mukaan, jolloin se tulee putkisiirtoa edullisemmaksi tilanteissa, joissa siirtomatkat ovat hyvin pitkiä, kuten esimerkiksi Suomen tapauksessa. Lisäksi laivasiirron aloittaminen on helpompaa sen modulaarisen luonteen vuoksi, jolloin siirtäminen voidaan aloittaa pienellä määrällä laivoja. Siirto junalla tai maanteitse soveltuu parhaiten lyhyille siirtoetäisyyksille, kun kapasiteetit ovat pieniä, esimerkiksi hiilidioksidin jakelun tapauksessa. Kustannukset ovat tällöin kuitenkin korkeita siirrettävää hiilidioksiditonnia kohden. (Kearns et al. 2021, 38–40; VTT 2024, 12.)



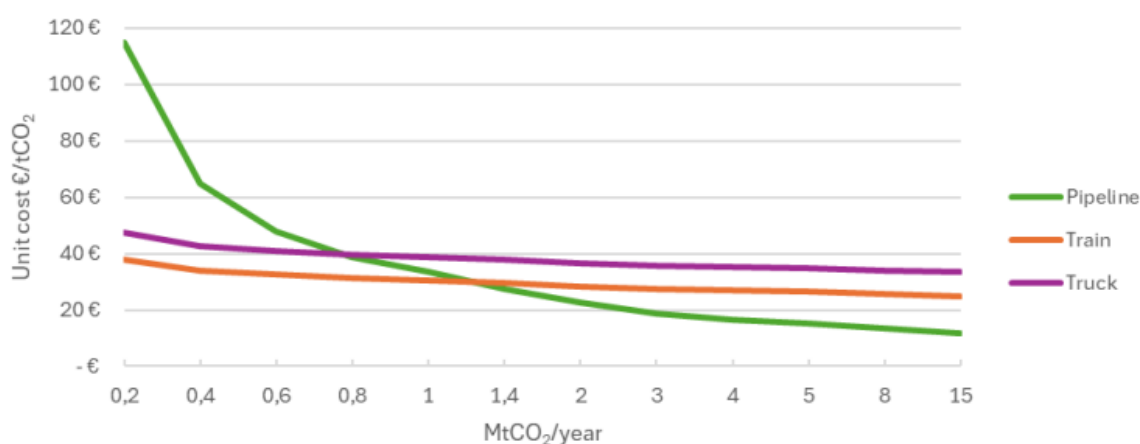
Kuva 11. Hiilidioksidin logistiikkaketju hiilidioksidin jakelun tapauksessa

Siirtämisen lisäksi on hyvä tarkastella tarvittavaa logistiikkaketjua kokonaisuudessaan. Esimerkki logistiikkaketjusta hiilidioksidin jakelutapauksessa on esitetty kuvassa 11. Pääasialliset vaiheet ovat esikäsittely voimalaitoksella, siirto maanteitse ja välivarastointi hiilidioksidin käyttökohteessa. Maanteitse tai junalla siirrettäessä esikäsittelyyn kuuluu hiilidioksidin nesteytys siirtoa varten. Lisäksi hiilidioksidista on tärkeää poistaa esimerkiksi vesi sekä muita epäpuhtauksia, sillä esimerkiksi typpi ja argon vievät turhaan varastointikapasiteettia ja rikkiyhdisteet yhdessä veden kanssa aiheuttavat korroosiota. Itse hiilidioksidin siirtäminen voidaan toteuttaa Savon Voiman toimintaympäristön olosuhteet huomioiden joko maanteitse tai junalla. Maanteitse siirtäminen on joustavampaa, jolloin hiilidioksidi saadaan laajemman käyttäjäjoukon saataville. Junalla siirto on halvempaa, mutta loppukäyttäjien saavuttaminen on haastavampaa rautatieverkoston aiheuttamien rajoitusten vuoksi. Logistiikkaketjun lopussa hiilidioksidi puretaan käyttökohteessa välivarastoon, josta käyttäjä ottaa tarvitsemansa hiilidioksidin. (Myers et al. 2024; Teir et al. 2011, 29.)

3.3.3 Logistiikan kustannukset

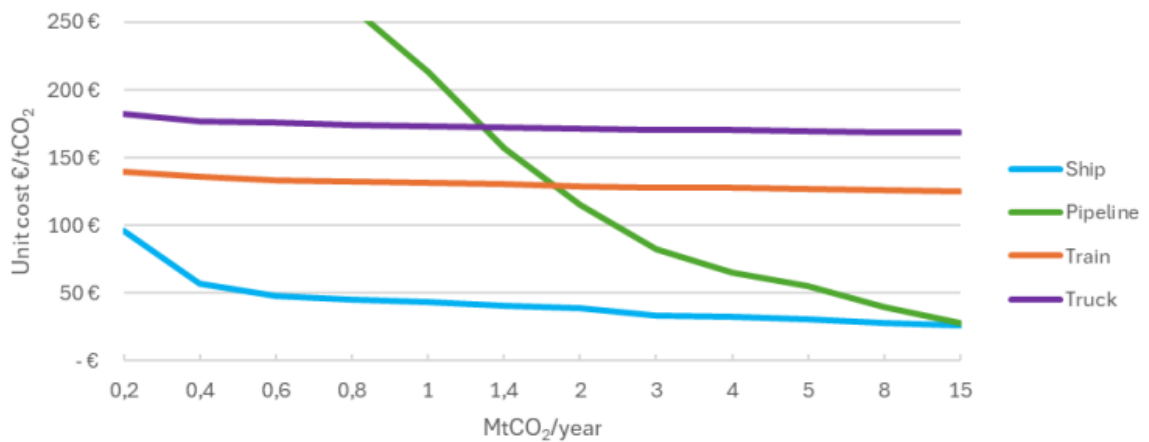
Tässä työssä siirtämiskeinojen kustannusten arvioinnissa ja tarkastelussa painotetaan suomalaisia tutkimuksia, jotta tieto olisi mahdollisimman oleellista Suomen oloissa. Suuri osa tutkimuksista käsittelee logistiikkaa osana suurempaa viitekehystä, jossa tarkastellaan yleisesti hiilidioksidin tuomia mahdollisuuksia. Myös yksityiskohtaisempia tutkimuksia on tehty, viimeisimpänä esimerkiksi VTT:n (2024) tekemä yleiskatsauksellinen tutkimus hiilidioksidilogistiikasta Suomessa. Tätä tutkimusta käytetään tässä työssä logistiikkakustannusten arviointiin sen tuoreuden ja ajankohtaisuuden vuoksi. Tutkimuksessa on tutkittu mahdollisuuksia hiilidioksidin logistiikan kehittämiseksi sekä annettu arvioita logistiikan kehittämisen kustannuksista, sekä lopullisista hiilidioksidin siirtokustannuksista. Tutkimuksen mukaan ilmastotavoitteiden saavuttaminen vaatisi tehokasta hiilidioksidin logistiikkaa,

johon sisältyisi esimerkiksi alueellisia logistiikkakeskuksia. Nämä logistiikkakeskukset mahdollistavat suuremmat siirtokapasiteetit, jolloin siirtokustannukset ovat maltillisemmat saavutettavien mittakaavaetujen vuoksi (VTT 2024, 2). Tutkimuksen mukaan eri siirtomenetelmien väliset erot kustannuksissa vaihtelevat Suomen oloissa seuraavasti siirrettävän hiilidioksidikapasiteetin mukaan, kuten huomataan kuvista 12 ja 13. Kuvissa esitetyt hinnat sisältävät koko logistiikkaketjun kustannukset, joihin kuuluu toimenpiteet hiilidioksidin esikäsittämiseksi, siirtämiseksi ja loppusijoittamiseksi.



Kuva 12. Hiilidioksidin siirtokustannukset eri menetelmien välillä siirtokapasiteetin mukaan, kun hiilidioksidia siirretään yli 200 km sisältäen käsittelykustannukset (VTT 2024, 12)

Kuvaa 12 tarkastelemalla huomataan, että pienillä, alle 0,6 Mt/a siirtokapasiteeteilla kuljetus junalla tai maanteitse on putkella kuljetusta halvempaa. Tämä siirtokapasiteetin mittaluokka on noin Joensuun voimalaitoksen kokoisen CHP-voimalaitoksen hiilidioksidituotannon mittaluokkaa. Tällöin esimerkiksi hiilidioksidin lyhyt siirto junalla tai maanteitse olisi todennäköisesti halvinta. Lyhyitä matkoja siirrettäessä, esimerkiksi mineralisointia varten, logistiikkakustannukset ovat oletettavasti hieman kuvaa 12 alhaisemmat. Kun skaalataan hintaa alaspäin noin 50 km matkaa varten esimerkiksi Myers et al. tekemän tutkimuksen maantiekuljetuksen hintojen mukaan, saadaan hinnaksi noin 35 €/t (Myers et al. 2024, 8). Pitkiä matkoja siirrettäessä taas olisi hyödyllistä, että logistiikassa hyödynnettäisiin VTT:n tutkimuksen mukaisia alueellisia logistiikkakeskuksia kustannusten minimoimiseksi. Suomen oloissa hiilidioksidiputkiston kapasiteetti tulisi olemaan mahdollisesti välillä 5,5–12,4 Mt/a (VTT 2024, 6).



Kuva 13. Hiilidioksidin siirtokustannukset eri menetelmien välillä siirtokapasiteetin mukaan, kun hiilidioksidia siirretään yli 2000 km sisältäen käsittelykustannukset (VTT 2024, 12)

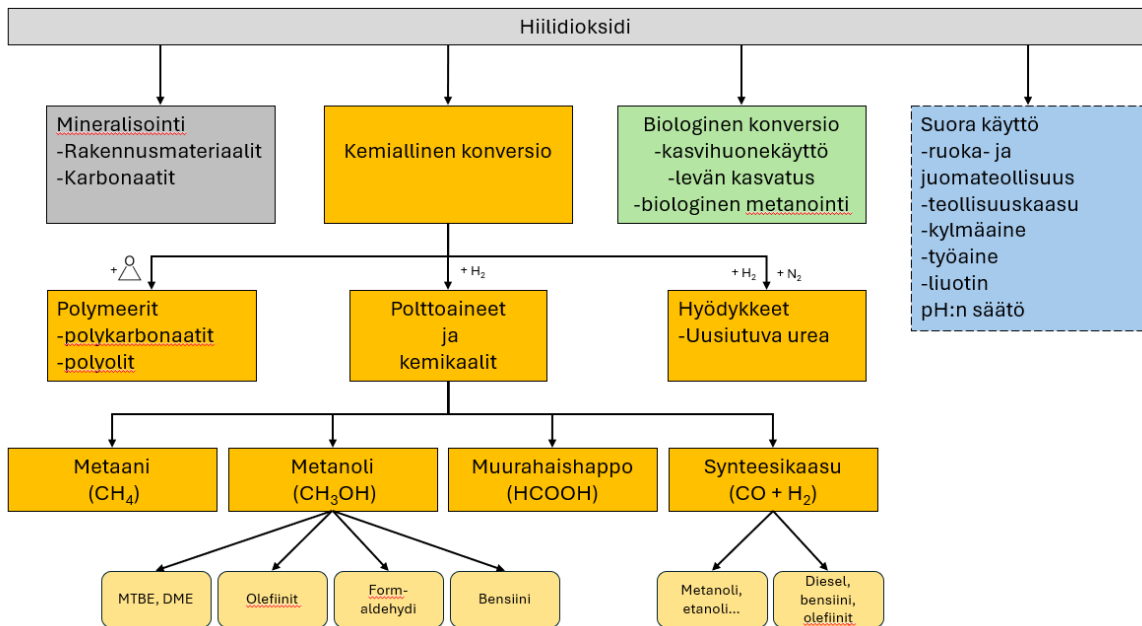
Kuvien 12 ja 13 pohjalta voidaan tehdä alustavat arviot logistiikan kustannuksille eri varastointivaihtoehtojen välille. Kuva 12 kuvaa hyvin hiilidioksidin geologisen varastoinnin logistiikan hintakomponenttia, jossa kuljetetaan hiilidioksidia sisämaan lähteestä satamaan. Kuva 13 puolestaan kuvaa hyvin hintakomponenttia, jossa hiilidioksidia kuljetetaan satamasta loppusijoituskohteeseen Pohjanmerelle. Näiden pohjalta voidaan tehdä karkea arvio geologisen varastoinnin logistiikan hinnalle nykytilanteessa, jossa laajaa putkisiirtoa ei ole vielä käytettävissä. Kokonaishinnaksi tulisi tällöin noin 80–100 €/tCO₂. Tässä tilanteessa siirtokapasiteetti olisi oletettavasti alle 0,6 Mt/a, kun logistinen infrastruktuuri ei ole vielä ehtinyt kehittyä. VTT:n tutkimuksessa on myös annettu tarkka arvio geologisen varastoinnin logistiikan kustannukselle, kun tarvittava infrastruktuuri ja alueelliset logistiikkakeskukset ovat valmiita. Arvio vaihtelee välillä 45–52 €/tCO₂ riippuen CCU ja CCS teknologioiden käytön suhteesta. Infrastruktuurin valmistumisesta ei ole esitetty aika-arviota, mutta suurten, noin 4 miljardin euron investointikustannusten vuoksi voidaan olettaa, että infrastruktuuri kehittyy hitaasti valmistuen mahdollisesti vuoden 2050 paikkeilla. Myöhemmin laskennassa valittava logistiikkakustannus on syytä valita edellä mainittujen arvioiden väliltä, esimerkiksi 60 €/tCO₂, jotta voidaan arvioida myös mahdollista logistiikkainfrastruktuurin kehitystä.

3.3.4 Potentiaaliset sijainnit Savon Voimalla

Hiilidioksidin kannalta kiinnostavin voimalaitos on Joensuun voimalaitos sen selkeästi suurimman hiilidioksidikapasiteetin ansiosta. Hiilidioksidin talteenotto myös Iisalmen ja Piekämäen voimalaitoksilta on periaatteessa mahdollista, mutta kannattavuus on epäselvää hiilidioksidin hyödyntämisenäkökulmasta pienten hiilidioksidikapasiteettien vuoksi. Pienemmät lämpökeskukset rajataan työssä kannattavuustarkastelujen ulkopuolelle, sillä niiden sijainti on hyvin hajanainen ja hiilidioksidin tuotanto on pientä, jolloin esimerkiksi P2X-tekniologian käyttö ei ole kannattavaa (Olsson et al. 2020, 12). Kaikkien Savon Voiman voimalaitosten sijainti on selkeästi sisämaassa, mikä tarkoittaa geologisen varastoinnin tapauksessa kuljettamista satamaan. Voimalaitokset ovat kuitenkin melko lähellä VTT:n vuonna 2024 julkaiseman tutkimuksen suunniteltuja logistiikkakeskuksia, jotka mahdollistavat mallittaiset siirtokustannukset sisämaasta satamaan suhteellisen pienillä investoinneilla omaan siirtoinfrastruktuuriin (VTT 2024). Jakeluliiketoiminta voimalaitoksilta saattaa olla mahdollista, jos VTT:n tutkimuksen suuren mittakaavan käyttökeskittymät lähtevät kehittymään. Lisäksi Itä-Suomessa on noin 50–200 km etäisyydellä voimalaitoksista potentiaalisia sijoituskohteita kaivosjätteisiin liittyen, mikä saattaa tarjota mahdollisuuksia tulevaisuudessa pitkällä aikavälillä tarkasteltuna. Tarkasteluja olisi hyvä tehdä ainakin Joensuun voimalaitoksen suhteen, sekä Iisalmen voimalaitoksen suhteen, jotta voidaan arvioida Iisalmen ja Piekämäen CHP-voimalaitosten soveltuvuutta hiilidioksidin talteenottoon.

3.4 Hiilidioksidin käyttäjät

Hiilidioksidista valmistettavien lopputuotteiden esittely ja arviointi ovat olennainen osa hiilidioksidin luomien liiketoimintamahdollisuuksien arvioimiseksi, sillä lopputuotteet vaikuttavat osaltaan hiilidioksidin kysyntään raaka-aineena. Tärkeimmät käyttäjäryhmät ovat P2X-toimijat, jotka tuottavat polttoaineita ja kemikaaleja, kuten e-metaania, e-kerosiinia tai polyoleja sekä mineralisointitoimijat, joiden teknologialla on mahdollista tuottaa hiilinegatiivisia rakennusmateriaaleja tai varastoida hiilidioksidia pysyvästi kaivosjätteisiin ja rakennusmateriaaleihin. Pääasialliset hiilidioksidin hyödyntämiskeinot on esitetty kootusti kuvassa 14.



Kuva 14. Hiilidioksidista saatavia lopputuotteita. Alkuperäinen kuva: (BioCO₂ 2018, 3)

Lopputuotteiden tarkastelu on rajattu tässä työssä mineralisointiin ja kemiallisella konversiolla saataviin polttoaineisiin ja kemikaaleihin (P2X), sillä nämä lopputuotteet soveltuvat sava-kaasulle parhaiten ja suomalaiset tutkimukset keskittyvät näihin menetelmiin.

3.4.1 P2X -tuotteet

Kuten aiemmissa osioissa mainittiin, P2X-ratkaisuilla on mahdollista tuottaa erilaisia tuotteita vedystä ja hiilidioksidista. Polttoaineiden, kuten metanolin tai metaanin tuotanto on jo osittain kaupallista pienillä markkinasegmenteillä. Kaupallistumista on auttanut esimerkiksi Suomen oloissa saatavilla oleva vähäpäästöinen vety, halpa sähkö sekä EU:n regulaatiot (IEA 2019, 11). Lentopolttoaineita valmistamalla saadaan sivutuotteena myös kevyempiä hiilivetyjä, joilla voidaan korvata fossiilista bensiiniä, sekä hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää kaukolämpönä. Lentopolttoainemarkkinan odotetaan kaupallistuvan metanolia ja metaania hitaammin. E-kerosiin kaupallistumista nopeuttaa tulevaisuudessa todennäköisesti lentopolttoaineisiin liittyvä regulaatio (Arasto et al. 2024, 17). Synteettisen lentopolttoaineen arvioitu hinta on noin 3000 €/t, ja kevyempien hiilivetyjen hinta 2400 €/t, kun vastaavien fossiilisten polttoaineiden hinta taas on noin 600 €/t (Mäkikouri et al. 2024, 48). Polttoaineiden korkean hinnan vuoksi kaupallisuus vaatii nykytilanteessa halpaa sähköä ja

halvan hiilidioksidin lähteen. Useita tuotantolaitoksia on kuitenkin jo suunnitteilla tai rakennettu (IEA 2020, 109).

Toinen potentiaalinen vaihtoehto on polyolien tuotanto. Teknologia polyolien tuottamiseksi ei ole vielä yhtä kaupallista kuin polttoaineiden tuotannossa. Lisäksi markkinat ovat pienet, mikä lisää epävarmuutta. Arvioidut tuotantokustannukset ovat noin 2800 €/t tuotteiden hinnan vaihdellessa voimakkaasti välillä 1700–6000 €/t. (Mäkikouri et al. 2024, 45.)

3.4.2 Mineralisointituotteet

Mineralisointi on menetelmä, jossa hiilidioksidia sitoutetaan karbonaateiksi rakennusmateriaaleihin. Prosessi vaatii hiilidioksidia, vettä, sähköä, lämpöä ja epäorgaanisia sivuvirtoja, kuten esimerkiksi kaivosjätteitä. Lopputuotteina on mahdollista tuottaa esimerkiksi hiekka- ja murskaa, jota voidaan käyttää hiekan ja soran korvikkeena tai vähähiilisiä betonituotteita, joita voidaan käyttää perinteisen betonin korvikkeena. Hiilidioksidia voidaan myös sitoa kaivosjätteisiin, jolloin saadaan talteen muuten menetettäviä kaivosteollisuuden sivuvirtoja. Näistä menetelmistä kaikki, paitsi kaivosjätteisiin sitouttaminen ovat melko lähellä kaupallisuutta. Esimerkiksi hiilinegatiivisen betonin hinnan on arvioitu olevan Suomen oloissa noin 20 % kalliimpaa kuin perinteisen betonin (Betoni-lehti 2024). Kaivosjätteisiin sitouttaminen taas tarjoaa korkean hyödyntämispotentiaalin, mikäli kaupallisuus saavutetaan. Yleisesti mineralisointi on edullisempi prosessi kuin P2X-prosessi. Lisäksi mineralisointi sitoo hiilidioksidia pysyvästi ilmakehästä eikä menetelmä ole riippuvainen vedyn tuotannosta. Teknologia ei kuitenkaan ole vielä yhtä kaupallista verrattuna P2X-tekniikkaan ja tuotetuilla tuotteilla on alhaisempi markkina-arvo. Menetelmän rajoittavana tekijänä on usein tarvittavat mineraalit, joihin hiilidioksidia voidaan sitouttaa. (Mäkikouri et al. 2024, 56–59.)

3.4.3 Tuotteiden markkina

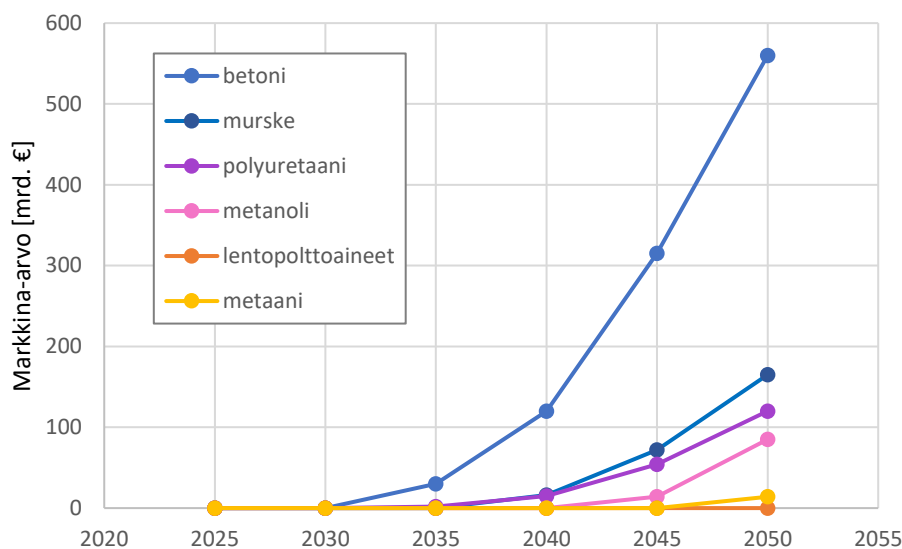
Myös hiilidioksidiperäisten tuotteiden markkinakehitystä on syytä tarkastella, jotta saadaan yleiskuva potentiaalisista hiilidioksidin ostajista. Markkinan nykyarvo on melko pieni, mutta tarkastelussa on syytä kiinnittää erityistä huomiota tulevaisuuden ennustettuihin markkina-arvoihin, jotta voidaan arvioida optimaalista aikaa lähteä mukaan markkinaan. Eri tuotteiden markkina-arvoja on tutkittu esimerkiksi Lux Researchin tekemässä tutkimuksessa vuodelta

2022 (Mäkikouri et al. 2024, 101). Tutkimukseen kuuluu kolme eri skenaariota, perusskenaario, optimistinen skenaario ja paras skenaario. Tutkimuksessa oletetut hiilidioksidin hinnat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Lux Researchin tutkimuksessa käyttämät hintaoletukset hiilidioksidille

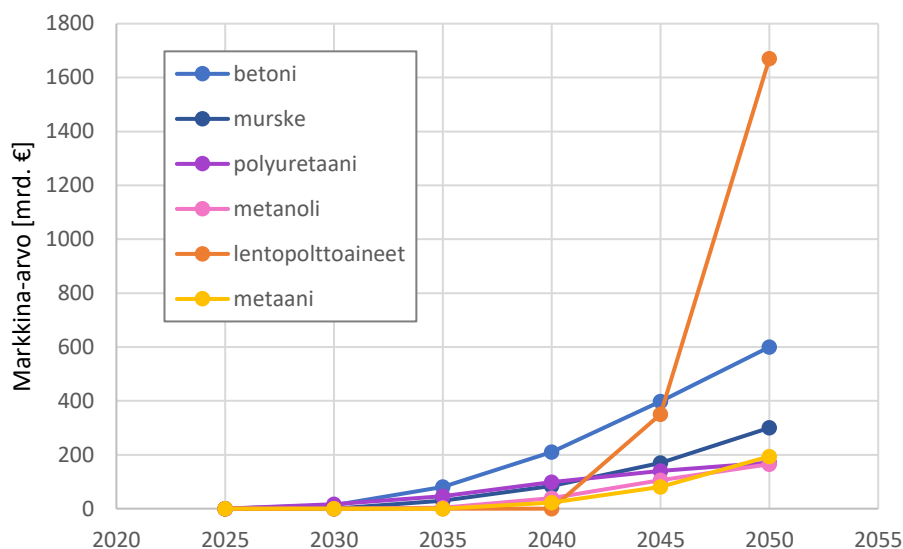
Skenaario	Kannustimen käyttöönotto	Lähtö- hinta [US\$/tCO ₂]	Vuosittainen kasvu [US\$/tCO ₂]	Kattohinta [US\$/tCO ₂]
perus	2020	10	2	100
optimistinen	2020	10	2,5	100
paras	2020	10	4	100

Hiilidioksidin hintakannustimen oletetaan lähtevän 10 US\$/tCO₂ hinnasta päättyen 100 US\$/tCO₂ hintaan, hinnan kasvunopeuden vaihdella skenaarioiden välillä. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty tutkimuksessa ennustettuja globaaleja markkina-arvoja eri tuotteille. Pitkälle erikoistuneet, kapean markkinaraon tuotteet, kuten esimerkiksi muurahaishappo, sekä savukaasun hiilidioksidivirrasta vaikeasti hyödynnettävät tuotteet, kuten hiilidioksidiperäinen proteiini on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi optimistinen skenaario on jätetty pois tarkastelusta käsiteltävän datan rajaamiseksi, sillä skenaarion arviot sijoittuvat usein perusskenaarion ja parhaan skenaarion puoleen väliin. Vähintään kahden skenaarion tarkastelu on kuitenkin olennaista, jotta voidaan arvioida markkinaennusteen epävakautta.



Kuva 15. Hiilidioksidipohjaisten tuotteiden markkina-arvoennuste perusskenaariossa

Perusskenaariossa hiilidioksidia sitovan betonin markkinat ovat selkeästi houkuttelevimmat. Markkina lähtee kasvamaan jo 2031 aikana ja saavuttaa nopeasti noin 560 miljardin euron markkina-arvon vuoteen 2050 mennessä. Hiilidioksidipohjaisen murskeen markkina saavuttaa 165 miljardin euron markkina-arvon vuoteen 2050 mennessä. Markkinaa ajavia tekijöitä ovat esimerkiksi tarve vähentää veden ja sementin käyttöä tulevaisuudessa sekä mahdollisesti hiilidioksidille asetettava markkinahinta. Markkinaa heikentää perinteisen murskeen ja sementin aiheuttama kilpailu. Näitä mineralisointituotteita tarkastellessa on syytä ottaa huomioon, että vaikka markkina-arvo onkin muita tuotteita korkeampi, markkinoilta saatava liikevoitto on suhteellisesti todennäköisesti hieman pienempi kuin esimerkiksi kemikaaleilla ja polttoaineilla. Lisäksi näiden tuotteiden markkinat ovat lievästi kytköksissä toisiinsa, kun mursketta käytetään betonin tuotannossa. Metanolin markkinat jäävät perusskenaariossa hieman rakennusmateriaalien jälkeen saavuttaen noin 100 miljardin euron markkina-arvon vuoteen 2050 mennessä. Markkinan kehitystä ajaa mahdollisen hiilidioksidin hinnoittelun lisäksi elektrolyysiteknologian kehitys sekä alhainen sähkön hinta. Markkinan haasteena on hiilidioksidipohjaisen metanolin korkea hinta. Perusskenaariossa polttoaineiden markkinat eivät saavuta kaupallista potentiaalia tarkasteluvälillä eli vuoteen 2050 mennessä. Lentopolttoainemarkkinan haasteena on polttoainekustannusten korkea osuus lentoyhtiöiden liiketoiminnasta ja metaanimarkkinan haasteena biokaasun aiheuttama voimakas kilpailu. Lisäksi hiilidioksidille mahdollisesti asetettava hinta on kriittinen sekä lentopolttoaineiden että metaanin markkinoiden kannattavuuden kannalta. (Sick et al. 2022.)



Kuva 16. Hiilidioksidipohjaisten tuotteiden markkina-arvoennuste parhaassa skenaariossa

Parasta skenaariota tarkastellessa huomataan, että kaikkien lopputuotteiden markkina-arviot ovat korkeampia ja markkinat tulevat kannattaviksi aiemmin kuin perusskenaariossa. Betonin markkinalla on pienin muutos kasvun ollessa noin 8 % perusskenaarioon verrattuna. Markkina tulee siis olemaan todennäköisesti melko vakaa. Murskeen ja metanolin markkinat kasvavat vastaavasti noin 90 %. Merkittävin muutos skenaarioiden välillä on polttoaineilla. Parhaassa skenaariossa metaanin markkinan on ennustettu olevan yli 10 kertainen perusskenaarioon verrattuna. Markkina-arvo on tällöin samaa luokkaa metanolin ja polyuretaanin kanssa. Lentopolttoaineet saavuttavat ennusteen mukaan huiman 1,8 biljoonan euron markkina-arvon, mikä tekee tässä skenaariossa lentopolttoaineista houkuttelevimman vaihtoehdon. Valtava ero perusskenaarion ja parhaan skenaarion välillä kertoo markkinan olevan melko epävarma ja vaikeasti ennustettava. Tutkimuksessa oleellimmat lentopolttoaineen markkinaennusteen vaihteluun vaikuttavat tekijät hiilidioksidin hinnoittelun lisäksi ovat perinteisen lentopolttoaineen hinnan ja tarpeen kehitys sekä korvaavien vaihtoehtojen vähäisyys P2X polttoaineiden ollessa lupaavin korvaaja. (Sick et al. 2022.)

Lux Researchin tutkimusta tulkitessa on hyvä ottaa huomioon, että tutkimus on tehty globaalista näkökulmasta, jolloin esimerkiksi tutkimuksessa käytetty hiilidioksidin hinta on Suomen oloja alhaisempi. Suomessa on lisäksi saatavilla halpaa sähköä, mikä lisää P2X tuotteiden kannattavuutta suhteessa muihin hyödyntämiskeinoihin. Näillä huomioilla

voidaan olettaa, että paras skenaario kuvaa Suomen tuotteiden markkinakehitystä melko realistisesti, jolloin e-polttoaineilla olisi parasta lopputuotepotentiaalia Suomen oloissa.

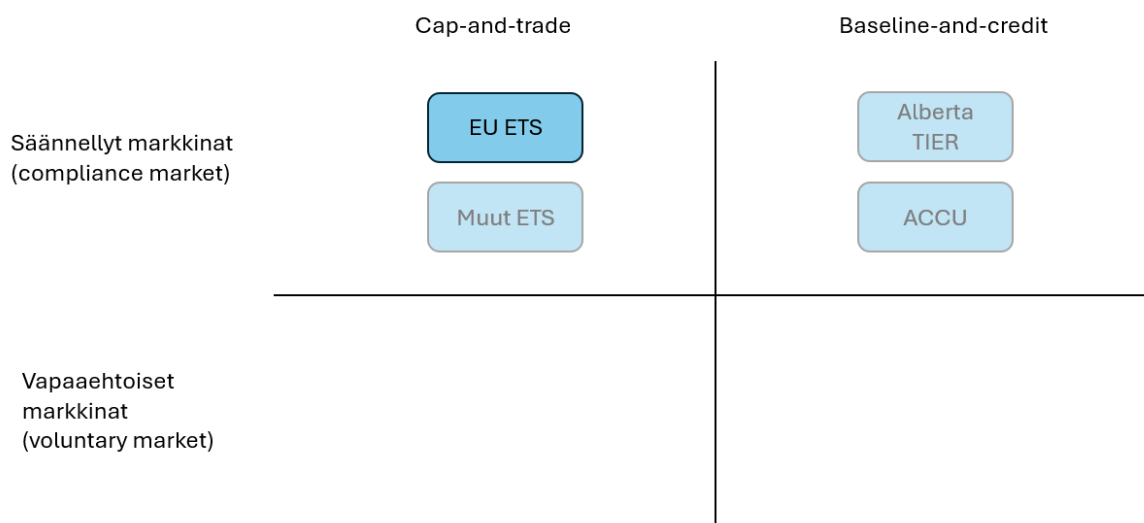
4 Hiilidioksidimarkkinat

Lopputuotteiden markkinoiden lisäksi myös hiilidioksidin ympärille odotetaan muodostuvan markkinoita lähitulevaisuudessa. Tässä osiossa tutkitaan hiilidioksidimarkkinan nykytilannetta sekä tulevaisuudennäkymiä. Koska konkreettista markkinaa ei vielä ole muodostunut ja hintatiedot eivät ole läpinäkyviä, karkeat hinta-arviot hiilidioksidille tehdään päästömarkkinoiden hintatasoihin pohjautuen. Alussa annetaan lukijalle yleiskäsitys päästömarkkinan toiminnasta ja olennaisimmista peruskäsitteistä liittyen päästömarkkinoihin. Lisäksi tutkitaan hiilidioksidin talteenoton nykytilannetta ja lähitulevaisuuden näkymiä hiilidioksidimarkkinoilla.

Toimiva hiilidioksidimarkkina on tärkeä edellytys biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämiselle. Hiilidioksidimarkkinoilla hiilidioksidin päästön vähentämisestä maksetaan markkinahinnan mukainen korvaus. Markkinahinta muodostuu markkinoilla olevien toimijoiden tarpeiden mukaisesti. On tärkeää huomata, että nykytilanteessa hiilidioksidimarkkina on vasta kehittymässä eikä vielä muodostunut täysin toimivaa ja universaalia markkinastandardia, jossa hiilidioksiditonilla olisi jokin tietty konkreettinen hinta (Boston Consulting Group 2024a). Markkinan muodostumista hankaloittaa esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen aineeton luonne hyödykkeenä. Hyötyä saavutetaan vähentämällä ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, eli varsinaisena hyödykkeenä on tällöin negatiivinen hiilidioksidipäästö (Deknatel & van der Loos 2025, 1). Tästä aineettomasta hyödykkeestä hyötyvät kaikki ihmiset globaalisti, kun ilmastonmuutoksen aiheuttamat kulut pienenevät. Tällöin yksittäisten toimijoiden vastuita on myös vaikea määrittää globaalilla tasolla. Lisäksi markkinoiden muodostamiseksi tarvitaan todennäköisesti sekä vapaaehtoisia markkinamekanismeja että valtioiden ja kansainvälisten sopimusten asettamaa sääntelyä. Hiilidioksidimarkkinan tarkoitus on vähentää päästöjä siellä, missä se on tehokkainta ja halvinta. Markkinaa ajavia tekijöitä ovat esimerkiksi tarve ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi, päästökauppa ja muu hiilidioksidia koskeva politiikka, kansainväliset sopimukset sekä fossiilisten tuotteiden nouseva hinta. Markkinan odotetaan kasvavan Suomessa 8 Mton vuotuisen hyödyntämiseen vuoteen 2040 mennessä (Mäkikouri et al. 2024, 135).

4.1 Päästömarkkinat

Päästömarkkinoilla on kaksi pääasiallista markkinamekanismia: ”baseline-and-credit” sekä ”cap-and-trade”. Molemmissa mekanismeissa käydään pohjimmillaan kauppaa hiilidioksiditonneista. Baseline-and-credit-kaupassa hiilidioksidipäästöille ei ole määritelty tiettyä rajaa, mutta hiilidioksidipäästöjä aiheuttaville toimialoille on määritetty suuntaa antavat päästötavoitteet historiallisen datan ja tulevaisuuden tavoitteiden pohjalta. Toimialakohtaiset päästötavoitteet alittavat toimijat voivat myydä carbon credit yksiköitä toimijoille, joiden hiilidioksidipäästöt ylittävät asetetut tavoitteet. Yksiköiden myynti tapahtuu jo muodostuneilla päästövähennyksillä, kun myyjä on jo myyntihetkellä alittanut päästötavoitteen. Tämä mekanismi pohjautuu YK:n ilmastosuojelun puitesopimuksen (UNFCCC) Kioton pöytäkirjassa määriteltyihin kahteen päästövähennysmekanismiin: Clean Development Mechanism (CDM) sekä Joint Implementation (JI). Nämä mekanismit sisälsivät aiemmin useita ongelmia eikä suhde päästöoikeuden ja reaalisen päästövähennyksen välillä ole ollut aina selvä. Haasteista huolimatta nämä menetelmät ovat kuitenkin luoneet pohjan nykyiselle hiilidioksidimarkkinalle, joka perustuu Pariisin ilmastosopimuksen artikloihin 6.2 ja 6.4. Esimerkkejä baseline-and-credit mekanismista ovat esimerkiksi Alberta Emission Offset System (Alberta TIER) sekä Australian Carbon Credit Unit Scheme (ACCU). Kansainvälisten sopimusten muodostaman markkinan lisäksi on olemassa pienempiä vapaaehtoisia hiilidioksidimarkkinoita, joissa yksityiset toimijat voivat tuottaa markkinoille päästöoikeuksia tai ostaa niitä osoittaakseen vastuullisuutta. (Carbon Market Watch 2020, 3–5; OECD 2021.)



Kuva 17. EU:n päästökauppajärjestelmä hiilidioksidimarkkinoilla

Cap-and-trade kaupassa päästöjen määrälle ja täten päästöoikeuksille asetetaan tietty raja, jonka jälkeen päästöoikeuksilla voidaan käydä kauppaa, jolloin hinta muodostuu markkinaehtoisesti. Tämä tarkoittaa, että myydyt yksiköt eli päästöoikeudet (englanniksi ”allowances”) edustavat tulevaisuudessa tapahtuvia hiilidioksidipäästöjä (Carbon Market Watch 2020, 3). Kioton pöytäkirjassa tätä päästövähennyskeinoa edusti kolmas päästövähennysmekanismi, päästökauppa (IET). Esimerkkejä cap-and-trade kaupasta ovat erilaiset päästökauppajärjestelmät, joita voidaan mahdollisesti soveltaa tulevaisuudessa myös biogeenisen hiilidioksidin talteenottoon. Esimerkiksi Suomessa ja Euroopan Unionissa on käytössä EU ETS päästökauppajärjestelmä, jonka yksikkönä on EU emission allowance (EUA). EU ETS järjestelmää on kehitetty vaiheittain eteenpäin neljässä vaiheessa. Esimerkiksi ongelmia ja porsaanreikiä on korjattu ja päästörajaa on laskettu uudelleen kahdessa ensimmäisessä vaiheessa, sen pysyessä kuitenkin noin 2000 MtCO₂ paikkeilla. Kolmannessa vaiheessa myös lentämisen hiilidioksidipäästöt otettiin huomioon ja määritettyä rajaa alettiin laskemaan 1,74 % vuosittaisella vauhdilla. Lisäksi hiilidioksidin hyödyntäminen ja talteenotto otettiin tarkastelun alle, vaikka nämä menetelmät eivät vielä varsinaisesti olekaan mukana päästökaupassa. Viimeisin, eli neljäs vaihe, astui voimaan vuonna 2021, jolloin rajan vuosittaista laskua kiihdytettiin 2,2 % vuosivauhtiin ja meriliikenne otettiin mukaan päästökauppaan (ICAP 2022, 5–6). EU ETS:n asemaa päästömarkkinoilla on havainnollistettu kuvassa 17.

4.2 Talteenotto hiilidioksidimarkkinoilla

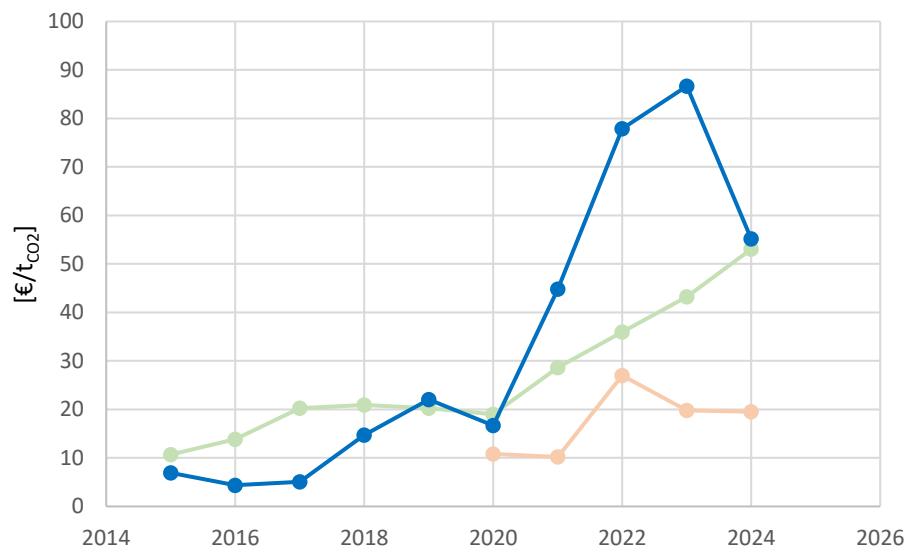
Nykytilanteessa säännellyt päästökauppajärjestelmät tai muutkaan hiilidioksidimarkkinamekanismit eivät suurimmilta osin ota huomioon negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tai hiilidioksidin talteenottoa sekä hyödyntämistä. Poikkeuksena on esimerkiksi EU ETS:n suhteen ainoastaan fossiilinen hiilidioksidi, jonka tuottaja luovuttaa päästöoikeuksia hiilidioksidin siirtäjälle tai käsittelijälle, kun hiilidioksidia siirretään pois tuottajan hallusta. Päästöoikeuksia ei kuitenkaan tarvitse luovuttaa, mikäli fossiilinen hiilidioksidi sidotaan pysyvästi geologiseen muodostumaan tai mineraaleihin. (Verbist et al. 2024, 4–5). Hiilidioksidimarkkinan laajentaminen hiilidioksidiperäisiin tuotteisiin sekä biogeeniseen hiilidioksidiin on kuitenkin välttämätöntä, jotta hiilineutraaliustavoitteet olisi mahdollista saavuttaa ja päästöjen vähentäminen olisi tulevaisuudessakin kaupallisesti houkuttelevaa.

Sekä CCS että CCU ratkaisujen sisällyttämisestä päästökaupan piiriin on ollut keskustelua ja suunnitelmia. Esimerkiksi biogeenisen ja ilmakehäperäisen hiilidioksidin sisällyttämisestä EU ETS päästökauppaan tullaan keskustelemaan vuonna 2026 (Mäkikouri et al. 2024, 124). Lisäksi sisällyttämiskeinoista on tehty lukuisia tutkimuksia, joissa keinoiksi on esitetty esimerkiksi erillisiä BECCS päästökauppayksiköitä, ilmaisten yksiköiden jakoa negatiivisille päästäjille sekä päästökaupasta kertyneiden tulojen ohjaamista CCUS pilottihankkeisiin (Michaelowa et al. 2023, 6). Koska hiilidioksidin sitomismekanismi sekä vaikutus hiilikiertoon vaihtelee huomattavasti hiilidioksidin käyttökohteen tai loppusijoituksen mukaan, on myös tärkeää hahmottaa ero sen välillä, käsittelevätkö päästökauppaan sisällyttämissuunnitelmat varastointia (CCS) vai hyödyntämistä (CCU). Toistaiseksi CCS teknologia vaikuttaisi olevan enemmän keskustelun keskiössä CCU teknologian jäädessä vähemmälle huomiolle. Syitä tähän ovat esimerkiksi orgaanisten CCU tuotteiden sisältämän hiilidioksidin vapautuminen ilmakehään tuotteiden käyttöään lopussa sekä tuotteiden kuluttajien erillisen päästökaupan (EU ETS 2) potentiaalisesti alhaisempi hinta (Verbist et al 2024, 5). CCS teknologian osalta kysymyksiä on myös herättänyt esimerkiksi varastoinnin pysyvyys. Tämä ongelma koskee erityisesti baseline-and-credit järjestelmiä, joiden tarkastelun aikaikkuna on sadan vuoden luokkaa. Osa hiilidioksidista saattaa karata takaisin ilmakehään vuosisatojen aikana ihmisen tai luonnon vaikutuksesta ja näiden tekijöiden huomioiminen hintaa määrittäessä aiheuttaa haasteita hiilidioksidimarkkinoilla. Ratkaisuksi tähän on ehdotettu väliaikaisia, mahdollisesti mitätöitäviä yksiköitä, vakuutuksia, sekä päästöyksiköiden

puskurivarantoja (Michaelowa et al. 2023, 3). Yleisesti täytyy myös ottaa huomioon, että suunnitelmista ovat tähän asti puuttuneet selkeät linjat sekä näkemykset, mikä on hidastanut sisällyttämisprosessia (Carbon Market Watch 2023).

4.3 Hiilidioksidin markkinahinnan arviointi

Moninaisista suunnitelmista ja sääntelyn suunnan puutteesta huolimatta hiilidioksidimarkkina on kuitenkin menossa eteenpäin. Tällöin esimerkiksi EU ETS markkinan hintakehityksestä voidaan vetää alustavia johtopäätöksiä siitä, mikä CCUS teknologioita varten myytävän hiilidioksidin markkinahinta on. EU ETS on valittu hinnan tarkastelun pohjaksi sen kansainvälisestikin suuren markkinavolyymin, sekä Suomen näkökulmasta olevan paikallisuuden vuoksi (World Bank Group 2024). Kuvassa 18 on esitetty EU ETS:n ohella muutamien päästökauppajärjestelmien hintakehitystä.



Kuva 18. EU ETS päästökauppajärjestelmän hintakehitys (sininen) verrattuna Alberta TIER (vihreä) sekä ACCU järjestelmien (oranssi) hintakehitykseen (World Bank Group 2024; Australian Government 2024)

Muut vertailtavat järjestelmät on valittu niin, että ne antavat kuvan päästömarkkinan tilasta myös Euroopan ulkopuolella mahdollisimman globaalilla tasolla. Tällöin voidaan arvioida karkeasti myös paikallisten markkinahäiriöiden vaikutusta päästömarkkinaan. Kuvaajaa

tarkastelemalla huomataan, että viime vuosina EU ETS:n hinta on ollut maailmanlaajuisella tasolla melko korkea vaikkakin vuonna 2024 pudotus on ollut voimakas. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi maakaasun voimakas hinnanvaihtelu, heikentyneet teollisuuden näkymät, lisääntynyt päästöoikeuksien kokonaismäärä sekä yleisesti vähentyneet hiilidioksidipäästöt, jotka vähentävät kysyntää päästöoikeuksille (ESMA 2024, 16). Myös maailmanlaajuisesti suurella markkinavolyymillä saattaa olla vaikutusta. Vuonna 2023 EU ETS kattoi 43 miljardilla eurolla yli puolet kaikista maailman päästökauppatuloista. EU ETS:n pohjalta hiilidioksidin hinnaksi saadaan noin 50–100 €/tCO₂.

Hintoja tarkastellessa on hyvä huomioida, että biogeenisen hiilidioksidin varastoinnin vaikutus hintaan ei näy päästökauppajärjestelmien hintahistoriassa, koska biogeenisen hiilidioksidin varastointi ei sisälly markkinaan. Biogeenisen hiilidioksidin sisällyttämisestä markkinaan on hyvin vähän tietoa, eikä vuorovaikutus markkinan kanssa ole täysin selvä. Vapaaehtoisilta markkinoilta on kuitenkin saatavissa karkeita arvioita biogeenisen hiilidioksidin hinnasta. Biogeenisen hiilidioksidin pysyvän varastoinnin hintatietoa on kartoitettu toteutuneiden hankkeiden pohjalta ja joulukuussa 2024 hinta on ollut keskimäärin 170 US\$/tCO₂ (CDR.fyi 2024). Hintatietoon liittyy kuitenkin suurta epävarmuutta, sillä esimerkiksi vuonna 2023 saman lähteen mukaan toteutuneista hankkeista on maksettu jopa 300 US\$/tCO₂ hintoja ja saatavilla olevan julkisen tiedon osuus kaikista hankkeista on vain 15 %. Lisäksi yksittäisten ostajien tekemät kaupat vaikuttavat merkittävästi hintaan Microsoftin ostamien päästövähennysten ollessa yli puolet kaikista kaupankäynnistä (Mäkikouri et al. 2024, 126; CDR.fyi 2024). Tulevaisuuden hinta-arvioita on vaikea tehdä markkinan kehittymättömyyden vuoksi, mutta esimerkiksi Boston Consulting Group (2024b) on arvioinut biogeenisen hiilidioksidin hintaa vuonna 2050. Markkinan pysyessä pienten ostajien markkinana vähäisellä sääntelyllä hiilidioksiditonin hinta olisi välillä 200–300 US\$/tCO₂. Merkittäväillä poliittisilla tuilla ja kysynnän kasvaessa hinta asettuisi alemmalle, noin 100–200 US\$/tCO₂ tasolle. Hinta kuitenkin seuraa melko vahvasti talteenoton kustannuksia, jolloin esimerkiksi uuden tehokkaamman talteenottoteknologian kaupallistuminen saattaa laskea hintaa merkittävästi.

P2X hankkeisiin liittyen hintaa on myös vaikea arvioida, sillä julkista tietoa on hyvin vähän saatavilla eikä vakiintunutta hintamekanismia ole vielä kehittynyt (Semkin et al. 2023, 96). Menetelmän seurauksena ei muodostu negatiivisia hiilidioksidipäästöjä, mutta menetelmä edistää kiertotaloutta ja hiilineutraalia energiajärjestelmää. Tämän vuoksi P2X-tuotteista saatavat tuotot eivät varsinaisesti noudata yllä mainittuja hintamekanismeja, vaan P2X-

toimijat ostavat hiilidioksidia usein suoraan pistelähteen läheisyydestä, jolloin hinta määräytyy tapauskohtaisesti P2X-tuotteiden markkinan mukaan (Semkin et al. 2023, 93). Tässä työssä oletetaan, että P2X-hankkeiden hinta seuraa läheisesti yllä mainittuja markkinamekanismeja säilyttääkseen kilpailukyvyn varastoinnin kanssa hiilidioksidimarkkinoilla. Tietojen pohjalta voidaan muodostaa karkea arvio hiilidioksidin potentiaalisesta hinnasta lähitulevaisuudessa ja vuonna 2050. Vuoden 2050 arvio perustuu Boston Consulting Groupin (2024b) arvioihin. Arviot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Karkea arvio biogeenisen hiilidioksidin arvosta lähitulevaisuudessa kolmella eri skenaariolla.

	CO ₂ hinta [€/t _{CO2}]	
	2025	2050
maltillinen	50	150
neutraali	100	200
optimistinen	150	250

Maltillisella arviolla hiilidioksidin hinta mukailee säänneltyä päästökaupan mukaisia hintoja, eikä hinnan oleteta kasvavan merkittävästi nykyisestä hintatasosta. Neutraalissa arvioissa hiilidioksidin hinta olisi noin 100 €/t_{CO2} ja hinnan muodostumiseen vaikuttaisi sekä säänneltyt että vapaaehtoiset markkinat. Hintataso olisi hieman korkeampi EU ETS hintaan ja hieman matalampi vapaaehtoisiin markkinoihin verrattuna. Optimistisella arviolla vapaaehtoiset markkinat vaikuttaisivat hintaan merkittävästi ja kysyntä päästöoikeuksille on korkea. Optimistisen skenaarion hinta-arvio voisi olla vielä korkeampikin, mutta arvo on rajoitettu 150 €/t_{CO2} arvoon vapaaehtoisten markkinoiden voimakkaan volatiliteetin ja alhaisen markkinavolyymin vuoksi. Arvioihin liittyy merkittävää epävarmuutta ja esitettyjen hintojen tarkoituksena on havainnollistaa mahdollista hintatasoa karkeasti, jolloin voidaan valita jokin alkuarvo myöhemmin tehtävissä laskuissa.

5 Savon Voiman asema hiilidioksidimarkkinoilla

Savon Voiman asemaa hiilidioksidimarkkinoilla on hyvä tarkastella, jotta saadaan tarkempi kuva markkinaympäristöstä. Arviointi tapahtuu kolmessa vaiheessa perustuen löyhästi SWOT-nelikenttäänalyysin rakenteeseen. Ensin arvioidaan Savon Voiman asemaa mahdollisilla markkinoilla sekä energiayhtiölle tyypillisiä vahvuuksia ja heikkouksia. Tämän jälkeen arvioidaan ulkoisia mahdollisuuksia ja mahdollisuuksia yhteistyölle erilaisten toimijoiden kanssa. Lopuksi arvioidaan vielä yhtiön ulkopuolisia tekijöitä, jotka saattavat heikentää mahdollisuuksia markkinoilla.

Osion lopussa tunnistetaan liiketoimintamahdollisuuksia liiketoiminnan laajentamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa. Tarkasteltavat mahdollisuudet ovat savukaasun myyminen ulkopuoliselle toimijalle ja talteenotossa avustaminen, hiilidioksidin jalostaminen ja myynti voimalaitoksen välittömään läheisyyteen, hiilidioksidin jalostaminen ja kuljetus ulkopuolisille toimijoille sekä hiilidioksidin geologinen varastointi.

5.1 Energiayhtiön ominaispiirteet

Perinteisesti energia-alan yritysten liiketoiminta nähdään muodostuvan energian myynnistä eri muodoissa, kaukolämpönä tai sähköinä. Energiantuotanto on siirtynyt viime vuosikymmeninä voimakkaasti uusiutuvien tuotantomuotojen suuntaan fossiilisten tuotantomuotojen hintojen noustessa ja ilmastonmuutoksen hillitsemisen tarpeesta. Nykyisin suuri osa energiasta tuotetaan bioenergiaa hyödyntävissä CHP-voimalaitoksissa. Bioenergia on houkutteleva lähde biogeenisen hiilidioksidin talteenotolle sen mahdollistamien negatiivisten päästöjen vuoksi. Bioenergian asettamien logistiikan kustannusrajoitteiden vuoksi CHP-voimalaitosten mittakaava on usein rajoittunut noin 200 MW lämpötehoon, kun biomassaa ei ole kannattavaa siirtää pitkiä etäisyyksiä (World Bioenergy Association 2018, 5; Vakkilainen 2017, 212). Usein bioenergian yhteydessä puhutaankin hajautetusta energiantuotannosta. Myös Savon Voiman energiantuotanto on hyvin hajautettua energiantuotannon sijaitessa Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan alueilla, kuten osiossa 2 todettiin.

Hiilidioksidimarkkinoilla toimimisen näkökulmasta Savon Voiman hiilidioksidin korkea biogeenisyysaste antaa mahdollista kilpailuetua toiminnalle. Vapaaehtoisilla markkinoilla on viime vuosina maksettu korkeita hintoja biogeenisestä hiilidioksidista (Boston Consulting Group, 2024a). Lisäksi CCU sovellusten usein CCS sovelluksia pienempi tuotannon mittaluokka saattaa sopia voimalaitosten yhteyteen suuria hiilidioksidin tuottajia paremmin (IEA 2019, 14). Muita mahdollisia kilpailuetuja ovat myös talteenoton helppo integrointi ja jälkiasennettavuus CHP-voimalaitosten infrastruktuuriin. Suurin osa talteenoton tarvitsemista aine- ja energiavirroista on saatavissa voimalaitoksilta. Poikkeuksena on ainoastaan talteenoton mahdollisesti tarvitsemat kemikaalit talteenottomenetelmästä riippuen. Lisäksi talteenoton tarvitsemissa käyttö- ja kunnossapitokuluissa on mahdollisuus saavuttaa synergiaetuja, kun osa työtehtävistä on hyvin samankaltaisia voimalaitoksen käyttö- ja kunnossapitotehtävien kanssa (Moioli et al. 2024, 5).

Pieni mittakaava tuo myös omat haasteensa, kun mittakaavaetujen tuomat kustannusedut jäävät saavuttamatta. Mittakaavan kasvattaminen saattaa olla haastavaa, sillä esimerkiksi biopolttoaineen logistiikan kustannukset kasvaisivat tällöin todennäköisesti säästöjä suuremmiksi. Kaukolämmön tuotannon kausiluontoisuus on myös tekijä, joka tulee ottaa huomioon, sillä hiilidioksidia on kesäisin hyvin vähän saatavissa, mikä laskee talteenoton kannattavuutta. Lisäksi Savon Voiman strategiana on luopua kesänaikaisesta poltosta, jolloin talteenottoa jouduttaisiin mahdollisesti seisottamaan kesäisin.

5.2 Ulkoiset mahdollisuudet

Ulkoiset tekijät ja toimijat tuovat useita mahdollisuuksia hiilidioksidimarkkinalla toimimisen näkökulmasta. Merkittävä mahdollisuus on yhteistyö muiden yritysten kanssa. Kesänaikeisen polttamattomuuden aiheuttamaa hiilidioksidivajetta on mahdollista korvata muiden toimijoiden hiilidioksidivirroilla. Muiden toimijoiden tulisi olla ensisijaisesti voimalaitoksen läheisyydessä logistiikkakustannusten minimoimiseksi. Tällaista toimintaa voitaisiin mahdollisesti toteuttaa yritysklusterin muodossa, joissa useita toimijoita toimii voimalaitoksen läheisyydessä kaikkia toimijoita hyödyttävien synergiaetujen saavuttamiseksi. Tämä saattaisi mahdollistaa esimerkiksi suuremman mittakaavan ja kesän aikaisen hiilidioksidivirran varmistamisen. Esimerkiksi Joensuun voimalaitoksen yhteydessä toimiva Taalerin omistama torrefiointilaitos on yksi vaihtoehto korvata hiilidioksidivirtaa kesäkuukausina.

Lisäksi tulevaisuudessa yhteistyö muiden energiayhtiöiden, sahojen tai biokaasulaitosten kanssa saattaa mahdollistua, jos Suomen laajuista hiilidioksidiputkistoa ja logistiikkaa lähdetään kehittämään ja pienemmän mittakaavan talteenottoteknologiat kehittyvät. Suuremmilla hiilidioksidin siirtokapasiteeteilla saavutetaan kustannusetuja, kuten VTT:n (2024) tutkimuksessa todettiin. Logistiikkainfrastruktuuri lähtee todennäköisesti kehittymään suurimpien pistemäisten hiilidioksidilähteiden, kuten esimerkiksi sellutehtaiden suuntaan (Kearns et al. 2021, 39). Logistiikkainfrastruktuuri tulisi kuitenkin tässäkin tapauksessa osumaan melko lähelle Savon Voiman tuotantolaitoksia (VTT 2024, 6).

Muita ulkoisia mahdollisuuksia ovat esimerkiksi kehittyvät talteenoton teknologiat, halpa sähkö ja vetytalouden kehitys pohjoismaissa sekä mahdollisuus kompensoida omia hiilidioksidipäästöjä talteenotolla. Kehittyvät talteenottoteknologiat tulevat laskemaan talteenoton hintaa ja vetytalouden kehitys tuo pohjoismaihin kysyntää biogeeniselle hiilidioksidille. Päästökaupan kiristyessä mahdollisesti jäljellä olevien varalämpökeskusten päästöjä voidaan myös kompensoida biogeenisen hiilidioksidin myynnistä tulevilla tuotoilla.

5.3 Kilpailu muiden teollisuudenalojen kanssa

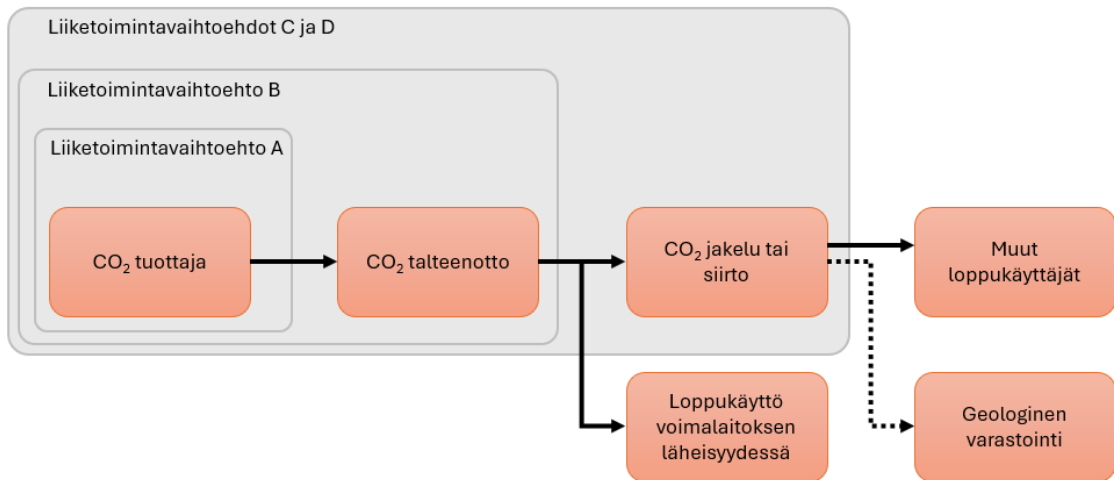
Kuten osiossa 3.1.1 todettiin, metsäteollisuus on merkittävä biogeenisen hiilidioksidin tuottaja Suomessa. Metsäteollisuudella on useita potentiaalisia kilpailuetuja hiilidioksidimarkkinoilla. Näihin kuuluu esimerkiksi erittäin korkea hiilidioksidin biogeenisyysaste, suuri mittaluokka, hiilidioksidivirran vuodenaikainen vakaus, sekä hyvät mahdollisuudet talteenottojärjestelmän integroimiseksi tuotantoprosessiin. Sellutehtaalla voidaan hyödyntää hiilidioksidia myös suoraan esimerkiksi kalsiumkarbonaatin ja mäntyöljyn tuotannossa sekä ligniinin erotuksessa (Kuparinen et al. 2019, 12). Useiden sellutehtaiden yhteyteen ollaan selvittämässä hiilidioksidin talteenoton kannattavuutta Suomessa. Hankkeita on suunnitteilla esimerkiksi Kemijärvelle, Lappeenrantaan sekä Metsä Groupin sellutehtaille. Metsä Group on myös tehnyt Andritzin kanssa yhteistyössä selvityksen hiilidioksidin talteenotosta sellutehtaiden yhteydessä (Metsä Group 2024). Selvityksen yhteydessä selvitettiin jopa 4 miljoonan hiilidioksiditonin talteenottoa Kemin biotuotetehtaan yhteydessä, sekä talteenoton vaatiman lämpöenergian optimointia. Selvityksessä havaittiin talteenoton toteuttaminen mahdolliseksi, mutta toteutuksen ongelmiksi nousivat markkinan kehittymättömyys, kallis talteenottoteknologia sekä suuret investointikustannukset. Muita yleisiä ongelmia ovat myös

talteenoton aiheuttama heikentynyt energiaomavaraisuus sekä menetetty sähkönmyynti (Onarheim et al. 2017, 16). Sellutehtaissa talteenotossa on mahdollista hyödyntää kolmea eri hiilidioksidivirtaa, joiden lähteet ovat soodakattila, meesauuni ja kuorikattila (Kuparinen et al. 2016, 4–6).

Toinen tulevaisuudessa mahdollisesti kilpailua muodostava tekijä on hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmasta. Menetelmä on vielä kaukana kaupallisesta kannattavuudesta, mutta ennusteiden mukaan ilmakehäperäinen hiilidioksidi kattaa jo noin 60 % P2X-sektorin hiilidioksidin tarpeesta vuoteen 2050 mennessä (Galimova et al. 2022, 12). Lisäksi poliittinen epävarmuus heikentää mahdollisuuksia toimia hiilidioksidimarkkinoilla. Nykytilanteessa hiilidioksidin hyödyntäminen ja varastointi on vielä taloudellisesti kannattamatonta, jolloin markkinakehitys ja projektien toteutus riippuu myös poliittisista kannustimista (IEA 2019, 4).

5.4 Liiketoimintamahdollisuudet hiilidioksidin arvoketjussa

Perinteisesti energiayhtiöt ja niiden omistamat voimalaitokset on nähty pistemäisenä hiilidioksidin lähteenä, jotka tuottavat hiilidioksidia ulkopuolisille toimijoille. Tässä työssä arvioidaan Savon Voiman mahdollisuuksia laajentaa liiketoimintaa hiilidioksidin talteenottoon ja jakeluun. Hiilidioksidin arvoketjua ja sen pohjalta tunnistettavia liiketoimintamahdollisuuksia on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Biogeenisen hiilidioksidin arvoketju ja liiketoimintamahdollisuudet

Tähän asti käsitellyn tiedon pohjalta on tunnistettavissa neljän tyyppisiä liiketoimintamahdollisuuksia sekä muita pienempiä liiketoimintamahdollisuuksia. Nämä mahdollisuudet on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Tunnistetut liiketoimintamahdollisuudet

Liiketoimintavaihtoehto A	Savukaasun tuottaminen ja myynti jalostettavaksi
Liiketoimintavaihtoehto B	Hiilidioksidin jalostaminen ja myynti voimalaitoksen läheisyyteen
Liiketoimintavaihtoehto C	Hiilidioksidin jalostaminen ja jakelu ulkopuolisille toimijoille
Liiketoimintavaihtoehto D	Hiilidioksidin jalostaminen ja geologinen varastointi
Muut mahdollisuudet	Muita pienempiä mahdollisuuksia

Liiketoimintavaihtoehto A on savukaasun myynti ulkopuoliselle toimijalle, jonka omistamalle talteenottojärjestelmälle tarjotaan sen tarvitsemia energia- ja ainevirtoja. Vaihtoehto kuvastaa Savon Voiman nykyistä tilannetta ja toimii tarkastelun pohjana. Tällä mahdollisuudella saatava hinta savukaasusta on oletettavasti alhaisempi kuin muilla vaihtoehdoilla, mutta vaihtoehtoon liittyvät liiketoimintariskit ovat huomattavasti pienemmät. Talteenoton tarvitsemat investoinnit voidaan myös tehdä yhteistyössä ulkopuolisen toimijan kanssa, jolloin riskit jaetaan ja voidaan saavuttaa mahdollisia synergiaetuja prosessi-integraatiossa. Vaihtoehdon laskennallinen tarkastelu on haastavaa savukaasusta saatavan hinnan epävarmuuden vuoksi.

Liiketoimintavaihtoehto B on savukaasun jalostaminen itse biogeeniseksi hiilidioksidiksi ja tämän myyminen esimerkiksi P2X-toimijalle voimalaitoksen välittömään läheisyyteen. Tämän vaihtoehdon etuina ovat käytännössä olemattomat logistiikkakustannukset Savon Voimalle sekä käytettävissä olevat synergiaedut. Toisaalta hiilidioksidin ostajan tulee tuottaa kaupallisesti kannattavaa lopputuotetta, jolloin hiilidioksidista maksettavaan hintaan vaikuttaa myös hiilidioksidimarkkinan ulkopuolisia markkinamekanismeja ja kustannuksia (Semkin et al. 2023, 93). Lisäksi menetelmässä vaadittava hiilidioksidin talteenotto vaatii suuria investointeja, jotka lisäävät vaihtoehdon liiketoimintariskiä.

Liiketoimintavaihtoehto C on samankaltainen vaihtoehdon B kanssa, kun savukaasu jalostetaan itse hiilidioksidiksi. Tällä kertaa hiilidioksidi kuljetetaan lisäksi potentiaalisille ostajille lähialueella. Jakelualan säteeksi on oletettu noin 50 km, sillä se kattaisi Savon Voiman tapauksessa tulevaisuudessa potentiaalisia mineralisointitoimijoita ja muita hiilidioksidin ostajia, kuten potentiaalisesti kehittyviä hiilidioksidin käyttökeskittymiä. Logistiikkakustannusten vuoksi potentiaalisilla ostajilla tulee olla korkeampi maksukyky liiketoimintavaihtoehtoon B verrattuna. Vaihtoehtoon liittyvät logistiikkakustannukset on arvioitu VTT:n Suomen oloissa tehdyn tutkimuksen mukaan, joka ottaa huomioon siirtokustannusten lisäksi myös tarvittavan käsittelyinfrastruktuurin.

Liiketoimintavaihtoehto D kuvaa geologista varastointia, jossa hiilidioksidi kuljetetaan satamaan VTT:n (2024) tutkimuksen mukaisesti. Skenaariota tarkastellaan siltä varalta, että geologinen varastointi yleistyy lähitulevaisuudessa ja vapaaehtoisilta markkinoilta saatava hintataso pysyy korkeana. Talteenoton ja logistiikan yhteiskustannuksen tulee alittaa vapaaehtoisilta hiilidioksidimarkkinoilta saatava hiilidioksidin hinta. Savon Voiman keskittymisen on kuitenkin lähtökohtaisesti muissa liiketoimintavaihtoehtoissa, sillä ne luovat arvoa paikallisesti Suomessa. Lisäksi siirtoetäisyydet sisämaasta ovat pitkiä.

Muihin liiketoimintavaihtoehtoihin sisältyy muita pienempiä mahdollisuuksia, joilla on mahdollista saada ylimääräistä tuottoa tai parantaa muiden liiketoimintojen tuottoa. Näitä mahdollisuuksia tarkastellaan tarkemmin osiossa 7. Liiketoimintavaihtoehtoihin lukeutuu muun muassa mahdollisuus kompensoida yrityksen sisäisiä hiilidioksidipäästöjä, jos hiilidioksidia varastoidaan, sekä synergiaetujen tavoittelemiseksi tarjottavat palvelut hiilidioksidia tai savukaasua käyttäville asiakkaille. Liiketoimintavaihtoehdosta riippuen asiakkaille voidaan myös tarjota palveluita lisäarvon tuottamiseksi. Fossiilinen hiilidioksidi kuuluu jo nykytilanteessa päästökaupan piiriin. Tämän hyödyntäminen on kuitenkin epätodennäköistä,

sillä Joensuun voimalaitoksella luovutaan turpeen poltosta vuoden 2026 loppuun mennessä. Pienempien öljykäyttöisten varalämpökeskusten päästöjä on myös mahdollista kompensoida tulevaisuudessa, mikäli biogeeninen hiilidioksidi sisällytetään päästökaupan piiriin. Tällöin tarvittavat päästöoikeudet on hyvä ostaa markkinan kautta toiminnan läpinäkyvyyden säilyttämiseksi (Carbon Market Watch 2023, 32).

6 Liiketoimintavaihtoehtojen kannattavuuden arviointi

Kannattavuuden arviointi on tärkeää, jotta tiedetään, mihin liiketoimintavaihtoehtoihin kannattaa kiinnittää huomiota nykyhetkessä ja tulevaisuudessa. Osiossa arvioidaan liiketoimintavaihtoehtojen B-D kannattavuutta laskennallisilla menetelmin. Ensin tarkastellaan laskennan lähtökohtia sekä tehtyjä oletuksia. Tämän jälkeen esitellään käytetyt laskentamenetelmät sekä laskennassa käytetyt alkuarvot. Lopuksi tarkastellaan saatuja tuloksia, sekä suoritetaan herkkyysanalyysi laskennan epävarmuuksien arvioimiseksi. Tulosten pohjalta voidaan arvioida karkeasti hiilidioksidin käyttäjiltä vaadittavaa maksukykyä kannattavan hiilidioksidiliiketoiminnan mahdollistamiseksi.

6.1 Laskennan lähtökohdat

Edellisen osion lopussa esiteltiin liiketoimintavaihtoehtot A, B, C ja D. Tässä osiossa luodaan vaihtoehtojen pohjalta viisi eri laskentaskenaariota, joilla suoritetaan investointilaskelmat. Laskelmien tarkoituksena on arvioida talteenoton kannattavuutta, sekä parhaita liiketoimintavaihtoehtoja tulevaisuutta varten. Laskuskenaariot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Liiketoimintavaihtoehtojen pohjalta tehdyt laskuskenaariot

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4	Skenaario 5
Liiketoimintavaihtoehto	B	B	B	C	D
Sijainti	Joensuu	Joensuu	Iisalmi	Joensuu	Joensuu
Kesänaikainen poltto	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Talteenottoon osallistuminen	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Logistiikkaan osallistuminen	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Hiilidioksidin käytön luonne	CCU	CCU	CCU	CCUS	CCS
Hiilidioksidin kohde	P2X	P2X	P2X	P2X ja minalisointi	Geologinen varastointi

Skenaariossa 1 tarkastellaan hiilidioksidin talteenottoa ja hyödyntämistä P2X tuotteiksi Joensuun voimalaitoksella. Skenaariossa oletetaan, että kesäkuukausina hiilidioksidia ei ole

saatavilla Savon Voiman strategian mukaisesti. Skenaario 1 toimii tarkastelun pohjaskenaariona. Skenaariossa 2 tarkastellaan samaa liiketoimintavaihtoehtoa, mutta tällä kertaa myös kesäkuukausina on hiilidioksidia saatavilla. Skenaarion tarkoituksena on arvioida kesän aikaisen polttamattomuuden strategian vaikutusta liiketoimintaan. Skenaariossa 3 liiketoimintavaihtoehto on edelleen sama, mutta tarkastelun kohteena on Iisalmen voimalaitos. Skenaarion tarkoituksena on tarkastella, onko hiilidioksidin hyödyntäminen mahdollista myös pienemmässä voimalaitosmittakaavassa. Skenaariossa 4 tarkastellaan hiilidioksidin jalostamista ja kuljetusta toimijoille, joita on vaikeampi tuoda voimalaitoksen läheisyyteen. Näihin toimijoihin kuuluu esimerkiksi mineralisointitoimijoita sekä mahdollisesti tulevaisuudessa kehittyviä P2X-käyttökeskittymiä, joilla on potentiaalisesti korkeampi maksukyky biogeenisestä hiilidioksidista. Skenaariossa 5 tarkastellaan hiilidioksidin geologista varastointia, jossa hiilidioksidi siirretään ensin satamaan, ja sieltä soveltuvaan varastointisijaintiin Suomen ulkopuolella.

Laskennan ja skenaarioiden muodostamisen mahdollistamiseksi on myös tehty joitain oletuksia ja yksinkertaisuuksia. Oletukset ovat seuraavanlaisia.

- Hiilidioksidin jakelualue 50 km voimalaitoksen ympäristössä
- Hiilidioksidin hinta pysyy vakaana tarkasteluajanjakson aikana
- Amiinipesuria ei tarvitse ajaa alas vähäisen hiilidioksidikapasiteetin vuoksi
- Kaikki mitoituksen puitteissa oleva hiilidioksidi hyödynnetään
- P2X toimijoiden tarjoama hinta seuraa hiilidioksidimarkkinoiden hintaa

Jakelualueeksi oletetaan 50 km voimalaitoksen ympäristöstä, sillä tällöin jakelualue sisältää monipuolisesti potentiaalisia loppukäyttäjiä tulevaisuudessa. Näihin sisältyy tulevaisuuden kehityksestä riippuen P2X-käyttökeskittymiä, hiilinegatiivisia betonitehtaita, sekä mahdollisesti kaivosteollisuutta. Hiilidioksidin hinnan oletetaan pysyvän vakiona tarkasteluajanjakson ajan, koska hinnan tulevaisuuden kehitystä ja suuntaa on vaikea ennustaa. Hinnan vaihtelun vaikutusta arvioidaan myöhemmin herkkyysanalyysillä. Amiinipesurin vaatimuksena on myös minimissään 30 % käyttöteho, joka saattaa vaikuttaa skenaarion 2 tuloksiin, mutta alitukset ovat niin pieniä, että niiden vaikutusta ei oteta huomioon. Laskennassa oletetaan myös, että P2X-toimijoiden tarjoama hinta hiilidioksidista seuraa hiilidioksidimarkkinoiden hintaa säilyttääkseen kilpailukyvyyn markkinoilla. Näin saadut tulokset ovat paremmin

vertailtavissa. Todellisuudessa myös P2X-tuotteiden markkinalla on vaikutusta näiden skenaarioiden hintaan.

6.2 Laskentamenetelmät

Tässä työssä laskentamenetelmäksi on valittu investointilaskelma. Hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyvän liiketoiminnan arvo sekä loppukäyttäjiltä vaadittava maksukyky tulevaisuudessa voidaan arvioida karkeasti suorittamalla investointilaskelmat skenaarioille 1–5. Lisäksi laskemista saatujen tulosten avulla voidaan arvioida karkeasti liiketoiminnan arvoa tulevaisuudessa. Investointilaskentamenetelmät voidaan jakaa yksinkertaistettuihin menetelmiin ja peruslaskentamenetelmiin. Yksinkertaistuilla menetelmillä tehdyt laskelmat ovat nopeampia, mutta ne eivät ota huomioon esimerkiksi rahan aika-arvoa. Yksinkertaisiin menetelmiin kuuluvat muun muassa pääoman tuottoaste- sekä takaisinmaksuajan menetelmät. Peruslaskentamenetelmiin kuuluvat esimerkiksi nykyarvo-, annuiteetti-, sekä sisäisen korkokannan menetelmät. Tässä työssä käytetään nykyarvomenetelmää ja sisäisen korkokannan menetelmää skenaarioiden arvioimiseksi, sillä ne ottavat huomioon rahan aika-arvon. Menetelmät perustuvat diskontattujen kassavirtojen laskentaan. (Neilimo & Uusi-Rauva 2010, 213; Puolamäki & Ruusunen 2009, 214.)

Nykyarvomenetelmä kertoo, onko investointi kannattava, kun huomioidaan investointiin liittyvät epävarmuustekijät sekä rahan aika-arvo. Epävarmuustekijät voidaan ottaa huomioon valitsemalla sopiva laskentakorkokanta ja rahan aika-arvo otetaan huomioon diskonttauksella. Menetelmässä liiketoiminnalle arvioidaan vuotuiset kassavirrat, jotka diskontataan valitulla laskentakorkokannalla, jotta tulevaisuuden kassavirtojen arvot saadaan arvioitua nykyhetkessä. Yhteenlasketuista ja diskontatuista kassavirroista vähennetään lopuksi investointikustannukset sekä mahdollisesti investoinnin jäännösarvo, jolloin saadaan investoinnin nettonykyarvo (NPV) (Puolamäki & Ruusunen 2009, 229).

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+k)^t} + \frac{J_n}{(1+k)^n} \quad (2)$$

jossa S_t on kassavirta periodilla t (M€), J_t on jäännösarvo pitoajan lopussa, (M€), n on investoinnin pitoaika vuosina, k on laskentakorkokanta ja I_0 on alkuinvestointi (M€). Laskennassa investointikustannuksen paikalla käytetään aiemmin arvioituja CAPEX-kustannuksia.

Sisäisen korkokannan menetelmässä tavoitteena on arvioida korkokantaa, jolla diskontatut tulot ja menot ovat yhtä suuret eli nettonykyarvo on nolla. Sisäinen korkokanta (IRR) huomioi myös rahan aika-arvon. Investoinnin kannattavuudesta kertoo tavoitetuottoa korkeampi korkokanta. Mitä suurempi sisäisen korkokannan arvo, sen parempi. Sisäisen korkokannan yhtälö perustuu samaan yhtälöön kuin nettonykyarvo, mutta tällä kertaa nettonykyarvo asetetaan nolnaan. Laskentaprosessi on siis käänteinen nettonykyarvon laskennalle (Puolamäki & Ruusunen 2009, 233). Sisäisen korkokannan ratkaiseminen on matemaattisesti haastavaa, joten esimerkiksi Excel laskee sen iteratiivisesti.

$$I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+IRR)^t} \quad (3)$$

jossa IRR on sisäinen korkokanta.

Investointilaskelmia tehtäessä on myös tärkeää suorittaa herkkyysoanalyysi saaduille tuloksille. Herkkyysoanalyysin tarkoituksena on arvioida kassavirtojen tulevaisuuteen liittyviä epävarmuuksia. Herkkyysoanalyysi voidaan toteuttaa tarkastelemalla eri laskentamuuttujia yksitellen, muuttamalla niiden arvoja ja seuraamalla niiden vaikutusta lopputulokseen. Tällöin on mahdollista muodostaa kuvaajia, joiden avulla voidaan tarkastella mahdollisten arviointivirheiden vaikutusta tulokseen. Muuttujien väliset keskinäiset riippuvuudet tulee ottaa huomioon ja tarkasteltavia muuttujia on syytä muuttaa suhteellisesti saman verran luettavuuden parantamiseksi (Puolamäki & Ruusunen 2009, 250). Lisäksi voidaan tarkastella, mitkä muuttujat vaikuttavat lopputulokseen eniten ja vaativat täten tarkempaa tarkastelua tuloksia arvioitaessa. Tässä työssä herkkyysoanalyysiin valitut muuttujat ovat CAPEX-kustannukset, OPEX-kustannukset, logistiikkakustannukset, hiilidioksidin hinta ja amiinipesurin mitoitus. (Puolamäki & Ruusunen 2009, 247.)

Investointilaskelmaa varten tarvittavia keskeisiä alkuarvoja ovat alkuinvestointi, juoksevasti syntyvät kustannukset, juoksevasti syntyvät tuotot, investoinnin pitoaika, laskentakorkokanta sekä investointikohteen jäännösarvo (Neilimo & Uusi-Rauva, 2010, 214). Laskennan

alkuarvoina käytetään kirjallisuusosion avulla määritettyjä kustannusarvioita, sekä amiinipesurin kapasiteetteja. Juoksevasti syntyvien tuottojen arviointiin käytetään hiilidioksidin hintaa ja voimalaitosten vuotuista hiilidioksidikapasiteettia. Hiilidioksidin hinnan arvoksi on valittu 100 €/t_{CO2} ilman vuosittaista hinnan muutosta, koska markkinan tulevaisuuden kehityssuuntaa on vaikea arvioida. Hinta-arvio perustuu vapaaehtoisten ja säänneltyjen markkinoiden tulevaisuuden hinta-arvioihin, jotka vaihtelevat huomattavasti. Epävarmuus otetaan huomioon herkkyysanalyysillä. Laskentaa varten valitut alkuarvot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Laskennan lähtöarvoina käytettyjä arvoja

		Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4	Skenaario 5
Amiinipesuri mitoitus	[t/h]	27,3	27,3	6,8	27,3	27,3
Pesurin hyötysuhde	[%]	90	90	90	90	90
Hyödynnettävä CO ₂	[kt/a]	144	190	40	144	144
CO ₂ hinta	[€/t]	100	100	100	100	100
CAPEX	[M€]	79,7	79,7	30,2	79,7	79,7
OPEX	[M€/a]	8,0	8,0	3,6	8,0	8,0
Logistiikkakustannus	[€/t _{CO2}]	-	-	-	35	60
Laskentakorkokanta	[%]	8	8	8	8	8
Pitoaika	[a]	20	20	20	20	20
Tuloveroprosentti	[%]	20	20	20	20	20
Jäännösarvo	[M€]	0	0	0	0	0

Pitoajaksi on valittu 20 vuotta, ja laskentakorkokannaksi 8 % hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen kannattavuuksiin liittyvän kirjallisuuden perusteella (Choe et al. 2023, 4; Moioli et al. 2024, 6). Tulovirroista vähennetään veroista ja poistoista aiheutuvat kustannukset. Investoinnin jäännösarvoksi on valittu 0 € ja poistot tehdään tasapoistoina.

6.3 Laskennan tulokset

Laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 11. Tuloksissa on esitetty saadut nettonykyarvot ja sisäisen korkokannan arvot. Lisäksi hiilidioksidille on laskettu hiilidioksidin käyttäjältä vaadittu hinta, jolla liiketoiminta alkaa olla kannattavaa. Tuloksia tulkitaan vertaamalla skenaarioita keskenään sekä osiossa 4 saatuihin hiilidioksidin hintaennusteisiin.

Taulukko 11. Laskennan tulokset

		Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3	Skenaario 4	Skenaario 5
NPV	[M€]	-56,0	-36,4	-41,9	-102,5	-138,9
IRR	[%]	-6,0	0,3	-	-	-
CO ₂ hinta	[€/tCO ₂]	154	130	250	193	221

Kuten tuloksista huomataan, skenaariot eivät tuota kannattavaa liiketoimintaa valituilla alkuarvoilla. Tämä on todennäköisesti seurausta nykyhetken perusteella valituista alkuarvoista ja tarvittavien kannustimien puutteesta. Skenaarioilla 1 ja 2 nettonykyarvo sijoittuu välille -60 ja -30 M€ välille. Sisäisen korkokannan arvot ovat myös negatiivisia tai matalia. Nämä skenaariot kuitenkin tuottivat positiivisen kassavirran hiilidioksidin hyödyntämisestä. Skenaariot ovat herkkiä hiilidioksidin hinnalle skenaarion 1 tullessa kannattavaksi hinnalla 154 €/tCO₂ ja skenaarion 2 tullessa kannattavaksi hinnalla 130 €/tCO₂. Savon Voiman liiketoiminnan laajentaminen hiilidioksidin talteenottoon P2X-toimijoiden kanssa voi olla kuitenkin mahdollista, jos toimijoiden hiilidioksidista tarjoamat hinnat ja kannustimet nousevat esiteytille tasolle. Osiossa 4 arvioidulla hiilidioksidin hintakehityksellä tämä skenaario saattaisi tulla mahdolliseksi 2030-luvun puolivälin paikkeilla. Kesän aikaisen biomassan polttamattomuuden vaikutus näkyy skenaarioiden tulosten välisenä erotuksena. Jos kesällä ei polteta biomassaa, täytyy hiilidioksidista saatavan hinnan olla siis noin 24 €/tCO₂ korkeampi, jotta investoinnista tulee kannattava.

Skenaario 3 kuvastaa Iisalmen voimalaitoksen talteenoton kannattavuutta. Kuten huomataan, talteenottoon investointi Iisalmen mittaluokan laitokselle on epäkannattavaa. Tähän vaikuttavat muun muassa menetetyt mittakaavaedut. Nettonykyarvo on vähemmän negatiivinen kuin skenaarioilla 4 ja 5, mutta tämä johtuu pienemmästä alkuinvestoinnista verrattuna muihin skenaarioihin. Sisäiselle korkokannalle ei saatu arvoa, sillä kassavirrat jäävät negatiivisiksi. Investointi tulisi kannattavaksi hiilidioksidin hintatason ollessa 250 €/tCO₂. Lisäksi toimijoiden tuominen tämän kokoisen hiilidioksidivirran luo voi olla haastavaa. Voidaan siis olettaa, että talteenottoa tämän mittaluokan laitokselle ei kannata tarkastella lähitulevaisuudessa. Savon Voiman hiilidioksidin hyödyntäminen kannattaa siis keskittää aluksi Joensuun voimalaitoksen yhteyteen.

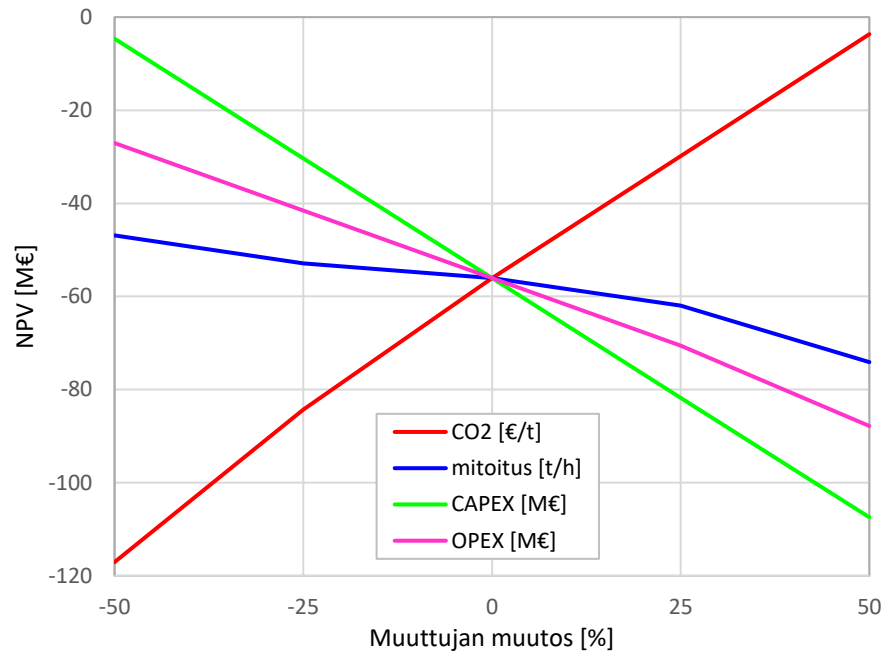
Skenaario 4 kuvastaa hiilidioksidin talteenottoa ja jakelua lähialueilla. Skenaario on hieman epäkannattavampi kuin perusskenaario. Nettonykyarvo on noin kaksi kertaa negatiivisempi

kuin perusskenaariolla eikä sisäistä korkokantaa voida määrittää skenaarion negatiivisen nettonykyarvon vuoksi. Skenaario tulee kannattavaksi hiilidioksidin hinnan ollessa 193 €/tCO₂. Tähän vaikuttavat talteenottokustannusten lisäksi tulevat logistiikkakustannukset. Hiilidioksidin hintatason kehityksen puolesta skenaario saattaisi tulla kannattavaksi vuosien 2040–2050 paikkeilla, mutta hintatasoon liittyy merkittävää epävarmuutta. Mineralisointituotteet saattavat mahdollistaa skenaarion mukaisen toiminnan tulevaisuudessa, jos menetelmä kaupallistuu odotusten mukaan ja sisällytetään päästökaupan piiriin.

Skenaario 5 kuvastaa hiilidioksidin varastointia geologisiin muodostumiin ja on kaikista epäkannattavin. Pitkät kuljetusmatkat nostavat kustannuksia merkittävästi. Skenaarioihin 1 ja 2 verrattuna nettonykyarvot olivat yli 2 kertaa negatiivisempia investoinnin tullessa kannattavaksi hiilidioksidin hinnan ollessa vasta noin 221 €/tCO₂. Skenaarioiden 3 ja 4 tapaan kassavirrat olivat negatiivisia. Nykylogistiikalla kannattavuus on vielä heikompi, kun VTT:n (2024) tutkimuksen mukainen infrastruktuuri ei ole kehittynyt. Vaikutus on otettu huomioon herkkyysanalyysillä. Geologinen varastointi saattaa olla mahdollista, mikäli vapaaehtoisilta hiilidioksidimarkkinoilta tarjotaan kustannuksia korkeampaa hintaa. Tämän liiketoiminnan toteutuminen vaikuttaa kuitenkin hyvin epätodennäköiseltä korkeiden kustannusten ja Savon Voiman strategian vuoksi.

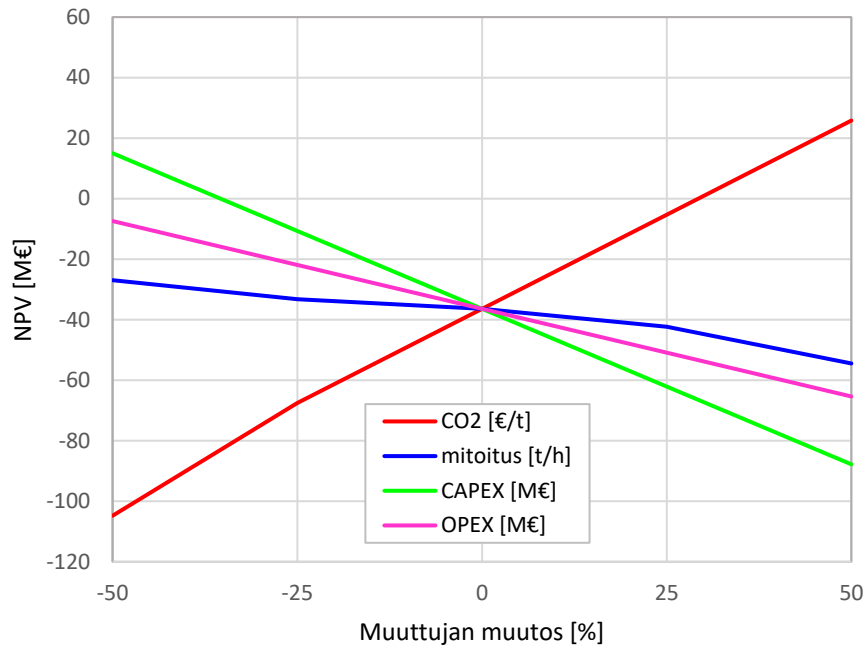
6.4 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysi tehdään jokaiselle skenaariorille erikseen ja tarkastellaan muuttujien vaikutusta nettonykyarvoon. Tulokset on esitetty kuvaajissa, joiden pystyakselilla on nettonykyarvo ja vaaka-akselilla muuttujien arvon muutos. Jokaista muuttujaa on muutettu saman verran, jotta muuttujien välinen vertailukelpoisuus säilyy. Saaduista tuloksista tehdään myös nopeat päätelmät, mitkä tekijät saattavat aiheuttaa esitettyjä muutoksia muuttujiin. Näihin tekijöihin kuuluu muun muassa teknologian ja hiilidioksidimarkkinan kehitys. Hiilidioksidin hinta on tärkeä tarkasteltava tekijä herkkyysanalyysiä tulkitessa, joten +50 % muutoksen sijasta tulkinnassa käytetään konkreettista hintaa, joka on tällä muutoksella 150 €/tCO₂. Herkkyysanalyysiä voidaan myös käyttää apuna myöhemmin tulkittaessa keinoja kannattavuuden parantamiseksi. Skenaarioiden 1–5 herkkyysanalyysien tulokset on esitetty kuvissa 20–24.



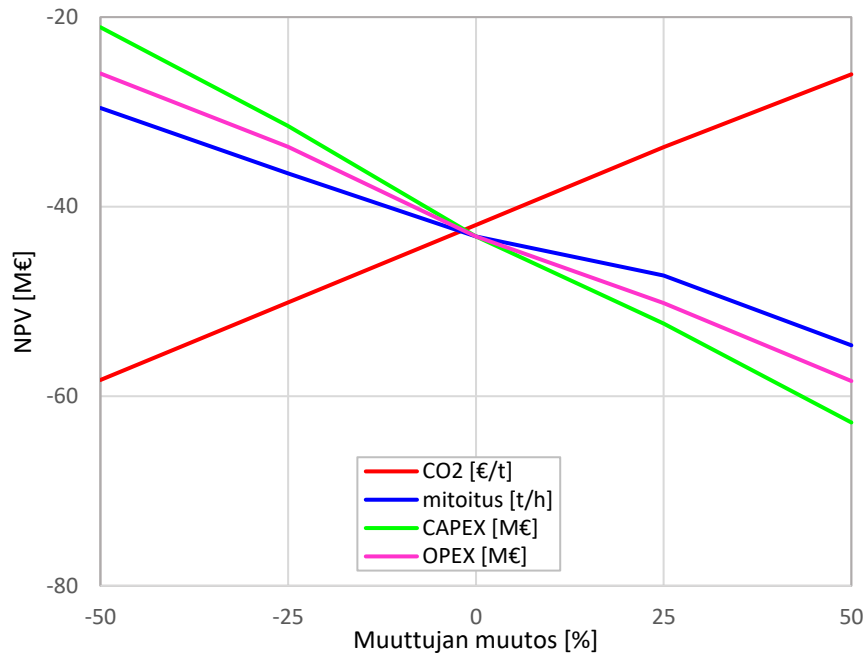
Kuva 20. Skenaario 1 herkkyyksanalyysi

Skenaarion 1 herkkyyksanalyysistä huomataan, että merkittävimmät muuttujat kustannusten kannalta ovat investointikustannukset sekä hiilidioksidin hinta. Tämä vaikuttaa olevan sama kaikilla skenaarioilla. Operatiivisten kustannusten vaikutus jää pienemmäksi amiinipesurin mitoituksen vaikutuksen ollessa pienin. Hiilidioksidin hinnan ollessa 150 €/tCO₂ tai investointikustannusten laskiessa 50 % nettonykyarvo nousee hyvin lähelle nollaa, joten suotuisalla hiilidioksidimarkkinan tai teknologian kehityksellä investointi talteenottoon saattaa olla kannattava. Potentiaalinen teknologian kehitys on mahdollista esimerkiksi happipolttotekniikalla. Amiinipesurin mitoituksessa on hyvä huomioida kaikkien skenaarioiden osalta, että muuttujan pienentäminen johtaa usein vähemmän negatiiviseen nettonykyarvoon, koska pienempi mitoitus laskee talteenoton CAPEX- ja OPEX-kustannuksia. Jos nettonykyarvo olisi positiivinen, mitoituksen vaikutus on todennäköisesti päinvastainen.



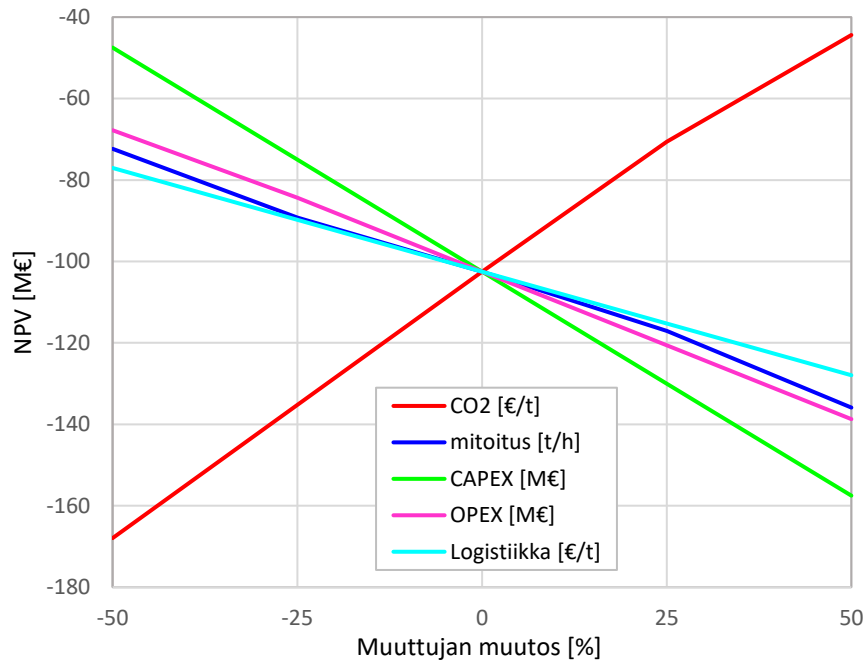
Kuva 21. Skenaario 2 herkkyyksanalyysi

Skenaariossa 2 Joensuun voimalaitoksella tuotettaisiin hiilidioksidia myös kesällä. Skenaariion herkkyyksanalyysistä huomataan, että investointikustannusten vaikutus nettonykyarvoon on pienempi hiilidioksidin hinnan vaikutukseen verrattuna. Operatiiviset kustannukset ja amiinipesurin mitoitus vaikuttavat nettonykyarvoon samankaltaisesti skenaarioon 1 verrattuna. Lisääntynyt vuotuinen hiilidioksidikapasiteetti on myös nostanut skenaariion kannattavuutta. Hiilidioksidin hinnan ollessa 150 €/t_{CO2} tai investointikustannusten laskiessa 50 % nettonykyarvo nousee 20 M€ paikkeille, joten suotuisalla hiilidioksidimarkkinan tai teknologian kehityksellä investointi olisi kannattava.



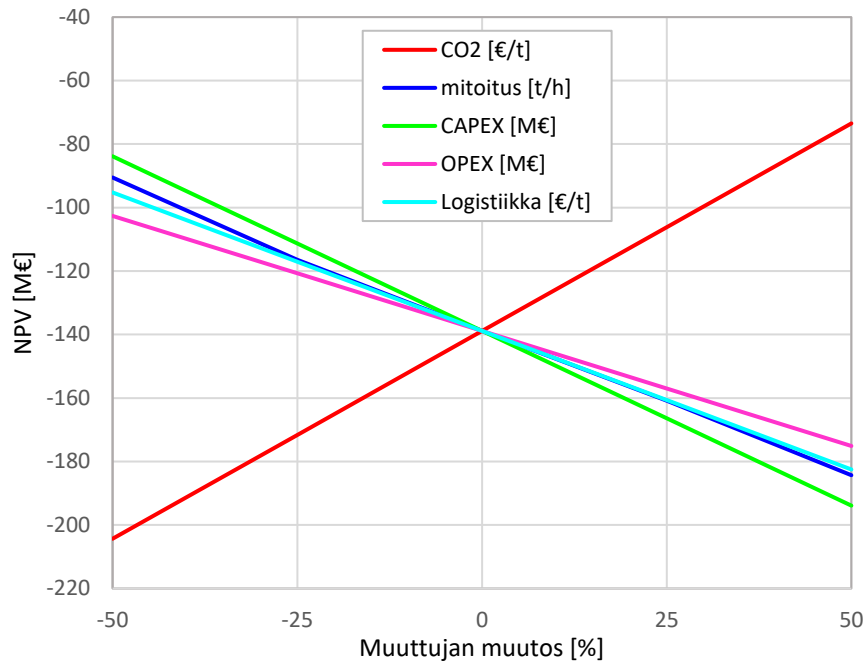
Kuva 22. Skenaario 3 herkkyysanalyysi

Skenaariossa 3 hiilidioksidin talteenotto sijoitettaisiin Iisalmen voimalaitokselle ja skenaarion tarkoitus on verrata pienemmän voimalaitoksen kilpailukykyä suurempien laitosten kanssa. Skenaarion herkkyysanalyysistä huomataan, että hiilidioksidin hinnan vaikutus kannattavuuteen on samaa luokkaa muiden muuttujien kanssa. Eri kustannusmuuttujat ovat lisäksi lähempänä toisiaan kuin aiemmilla skenaarioilla. Pienemmän mittakaavan aiheuttama mittakaavaetujen menetys kustannuksissa vaikuttaa negatiivisesti skenaarion kannattavuuteen. Hiilidioksidin hinnan ollessa 150 €/t_{CO2} tai investointikustannusten laskiessa 50 % nettonykyarvo jää vieläkin hyvin negatiiviseksi.



Kuva 23. Skenaarion 4 herkkyysanalyysi

Skenaariossa 4 Joensuun voimalaitoksella tuotettava hiilidioksidi otetaan talteen ja kuljetaan korkeamman maksupotentiaalisiin toimijoiden luo. Laskentamuuttujien muutosten vaikutus nettonykyarvoon on samankaltainen kuin skenaarioilla 1 ja 5. Logistiikkakustannusten vaikutus kannattavuuteen on samaa luokkaa talteenoton mitoituksen ja OPEX-kustannusten kanssa. Hiilidioksidin hinnan ollessa 150 €/t_{CO2} tai investointikustannusten laskiessa 50 % nettonykyarvo jää kuitenkin -50 M€ paikkeille, joten hiilidioksidin jakelu vaikuttaisi vaativan toimijoilta huomattavan korkeaa maksukykyä.



Kuva 24. Skenaarion 5 herkkyysanalyysi

Skenaariossa 5 Joensuun voimalaitoksella tuotettava hiilidioksidi varastoidaan varastointiin sopiviin geologisiin muodostumiin. Skenaarion herkkyysanalyysistä huomataan, että laskentamuuttujien muutosten vaikutus nettonykyarvoon on hyvin samankaltainen kuin skenaariossa 1. Logistiikkakustannusten vaikutus osuu suunnilleen CAPEX- ja OPEX-kustannusten vaikutusten välille. Skenaarioon 1 verrattuna lisäksi olevat logistiikkakustannukset heikentävät skenaarion kannattavuutta. Hiilidioksidin hinnan ollessa 150 €/t_{CO2} tai investointikustannusten laskiessa 50 % nettonykyarvo jää -80 M€ paikkeille, joten skenaarion mukainen liiketoiminta olisi hyvin kaukana kannattavasta liiketoiminnasta. Logistiikkakustannusten nykytilanne on kuitenkin lähempänä herkkyysanalyysin kalliimpaa päätä, jolloin kannattavuus heikkenisi entisestään. Vuoteen 2050 mennessä logistiikkakustannusten voidaan olettaa sijoittuvan lähemmäs herkkyysanalyysin halvempaa päätä, jos hiilidioksidin putkisiirtoon investoidaan kansallisella tasolla. Liiketoiminta olisi tässäkin tapauksessa kuitenkin vielä kannattamatonta ja haastavaa.

7 Biogeenisen hiilidioksidin luomat mahdollisuudet

Biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyvien mahdollisuuksien arviointi ja tunnistaminen on tärkeää, jotta tiedetään, millaista liiketoimintaa hiilidioksidin osalta on tehtävissä nykyhetken lisäksi myös tulevaisuudessa. Osiossa esitetään arviot liiketoiminnan arvosta tulevaisuudessa, pohditaan biogeenisen hiilidioksidin luomia mahdollisuuksia nykyhetkestä 2050-luvulle ja esitetään keinoja haasteiden huomioimiseksi, jotta voidaan mahdollistaa liiketoiminnan laajentaminen arvoketjussa mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi arvioidaan keinoja luoda lisää arvoa asiakaskeisellä lähestymistavalla ja päästökaupan avulla, jotta voidaan kuroa kiinni teknologian nykytilanteen ja kannattavan liiketoiminnan välistä erotusta mahdollisimman aktiivisesti. Osion pohdinnan pohjalta on myös luotu yhteenvetotaulukko, jossa on arvioitu tarvittavia toimenpiteitä liiketoiminnan laajentamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa. Yhteenvetotaulukko on esitetty liitteessä 1.

7.1 Liiketoiminnan arvo tulevaisuudessa

Liiketoiminnan arvon tarkka arviointi tulevaisuudessa on haastavaa hiilidioksidimarkkinan kehittymättömyyden ja epävarmuuden vuoksi. Tämä tulee ottaa huomioon arvon ennusteita tarkastellessa. Lisäksi investointilaskelmia tehdessä liiketoimintavaihtoehtojen netto nykyarvojen huomattiin olevan hyvin herkkiä hiilidioksidin hinnan suhteen. Tämän vuoksi hiilidioksidille laskettiin hinnat, joilla netto nykyarvot saavat arvon nolla. Tällöin voidaan päätellä, millaisilla hiilidioksidista saatavilla hinnoilla liiketoiminta alkaa olla kannattavaa. Herkkyysanalyysien kuvaajia ja osiossa 4 arvioituja hiilidioksidin hintakehityksiä tarkastelemalla voidaan puolestaan arvioida liiketoiminnan arvon kehityssuuntaa karkeasti. Liiketoimintavaihtoehdon A arvoa ei arvioida tässä osiossa, sillä vaihtoehdon arvoon vaikuttaa monia tekijöitä, kun ollaan tekemisissä useiden sidosryhmien kanssa. Asiakasyhteistyön arvonluontimahdollisuuksia tarkastellaan tarkemmin osiossa 7.4. Liiketoimintavaihtoehdon B arvoa arvioidaan skenaarion 1 pohjalta, jossa hiilidioksidi otetaan talteen Joensuun voimalaitokselta, eikä kesäisin polteta polttoaineita.

Liiketoimintavaihtoehto B ei tullut kannattavaksi valituilla alkuarvoilla. Jos kuitenkin katsotaan skenaarion 1 herkkyysanalyysiä kuvasta 20, sekä hiilidioksidin hintaennustetta osion

4 taulukosta 7, huomataan, että liiketoimintaan liittyy merkittävää potentiaalia tulevaisuudessa. Liiketoiminta saavuttaa kannattavuuden hiilidioksidin hinnan ollessa 154 €/tCO₂. Liiketoiminnan arvo on hyvin lähellä kannattavuutta jo nykyhetkessä optimistisella hintakehityksellä. Herkkyysanalyysistä ja hintaennusteesta voidaan päätellä liiketoiminnan nettonykyarvon olevan noin 60 miljoonaa euroa vuodessa vuoteen 2050 mennessä. Liiketoiminnan arvo saattaa saavuttaa 120 miljoonan euron vuotuisen arvon vuoteen 2050 mennessä, jos hiilidioksidin hinta kehittyy optimistisesti. Hiilidioksidin talteenotto liiketoimintaan liittyy todennäköisesti merkittävää potentiaalia tulevaisuudessa, jos hiilidioksidin hintataso kehittyy optimistisesti.

Liiketoimintavaihtoehto C, eli hiilidioksidin talteenotto ja sen jakelu ei ollut investointilaskelmissa yhtä kannattava kuin liiketoimintavaihtoehto B. Kannattavuutta heikensi talteenotokustannusten päälle muodostuvat logistiikkakustannukset. Jakeluliiketoiminta tulisi kannattavaksi, jos hiilidioksidista saatava hinta nousee noin 193 €/tCO₂ tasolle. Jakeluliiketoiminnan kannattavuus lähitulevaisuudessa on siis epäselvää. Liiketoiminnan arvo tulevaisuudessa on hieman talteenottovaihtoehtoa maltillisempi. Liiketoiminnan arvo alkaa osiossa 4 arvioidun hintataseennusteen mukaan kehittyä vuoden 2050 paikkeilla. Jos hinta kehittyy optimistisesti, liiketoiminnan arvo saattaa kuitenkin saavuttaa noin 50 miljoonan euron vuotuisen arvon vuoteen 2050 mennessä. Pelkkää arvoa arvioitaessa on kuitenkin hyvä huomioida, että jakeluliiketoiminta saattaa olla potentiaalinen vaihtoehto, jos hiilidioksidin käyttäjien tuominen voimalaitoksen läheisyyteen osoittautuu haastavaksi.

Liiketoimintavaihtoehto D, eli hiilidioksidin geologinen varastointi osoittautui investointilaskelmissa vähiten kannattavaksi. Liiketoiminnan arvo kääntyisi positiiviseksi hiilidioksidin hinnan ollessa vasta 221 €/tCO₂. Tehtyjä hintaennusteita tarkastellessa huomataan, että liiketoiminta alkaa tuottamaan tuottoja vasta vuoden 2050 hintatason ollessa optimistisella tasolla. Hiilidioksidin kuljettaminen pois Suomesta on myös ristiriidassa Savon Voiman strategian kanssa, joten vaihtoehto ei ole luonteva Savon Voimalle.

7.2 Optimaalinen sijainti sekä ajankohta liiketoiminnalle

Aiemmissa osioissa esitettiin ensin Savon Voiman biogeenisen hiilidioksidin lähteet sekä rajattiin tarkasteltavat sijainnit Savon Voiman omistamiin voimalaitoksiin. Tarkempi tarkastelu suoritettiin laskentaskenaarion 3 avulla. Skenaarioiden 1 ja 3 välisistä tuloksista on

mahdollista päätellä, että optimaalinen sijainti liiketoiminnalle on Joensuun voimalaitos. Voimalaitoksen suurempi hiilidioksidikapasiteetti parantaa talteenoton kannattavuutta merkittävästi saavutettujen mittakaavaetujen vuoksi. Iisalmen voimalaitos ei nykyteknologialla ole suositeltava hiilidioksidiliiketoiminnan tarkasteluun, mutta saattaa olla tulevaisuudessa vaihtoehto, jos pienemmän mittakaavan talteenottoteknologia saavuttaa kaupallisuuden tulevaisuudessa.

Optimaalisen liiketoiminnan aloittamisajankohdan arvioimiseksi on hyvä havainnollistaa oleellisia tapahtumia, joilla voi olla merkittävää vaikutusta liiketoiminnan luonteeseen ja kannattavuuteen. Näitä oleellisia tekijöitä on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämiseen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä tulevaisuudessa

Nykyisessä tilanteessa, jossa hiilidioksidin markkinat ovat kehitymässä ja talteenottoteknologian vaatimat investoinnit suuria, talteenottoon investoiminen yksin vaikuttaa melko epä-kannattavalta. Investointiin liittyy suuria riskejä, joten liiketoimintaa on hyvä harjoittaa yhdessä muiden toimijoiden kanssa. Epävarmuutta ja riskejä lisääviä tekijöitä ovat suuret, kymmenien miljoonien eurojen luokassa liikkuvat investointikustannukset, biogeenisen hiilidioksidin sisältyttäminen päästökaupan piiriin, sekä P2X-toimijoiden kanssa sovitujen hintojen ja hiilidioksidin vapaiden markkinoiden läpinäkymättömyys ja suuri hinnanvaihtelu. Talteenottoon investoimiseen liittyy myös riski teknologian kehityksestä. Jos lähitulevaisuudessa investoidaan nykyhetken mukaiseen talteenottoon, joka perustuu amiinipesurin käyttöön ja muut teknologiat yleistyvät, uusi halvempi teknologia saattaa pudottaa hiilidioksidin

hintatasoa, jolloin nykyhetken mukainen talteenottoteknologia muuttuu epäkannattavaksi (Boston Consulting Group 2024b). Vaihtoehtoisten teknologioiden kehitystä on syytä seurata tarkasti ja suunnitella liiketoimintaan investointia, kun esimerkiksi happipolttoteknologia tai kaliumkiertoteknologia tulee kannattavaksi. Näiden teknologioiden odotetaan saavuttavan demonstraatiomittaluokan 2030-luvun paikkeilla (Kearns et al. 2023, 10). E-metaani ja e-metanoli tarjoavat Suomen oloissa kuitenkin mahdollisen pohjan kannattavalle hiilidioksidiliiketoiminnalle. Yhteistyö näiden toimijoiden kanssa lähitulevaisuudessa saattaa nopeuttaa markkinakehitystä, jolloin kannattava liiketoiminta voi olla tulevaisuudessa mahdollista (IEA 2019, 41). Biogeenisen hiilidioksidin sisällyttämisestä päästökaupan piiriin keskustellaan myös esimerkiksi EU:ssa vuonna 2026, joten markkina on kehittymässä hiljalleen eteenpäin.

Edellä mainittu talteenottoteknologioiden kehittyminen 2030-luvulla laskee todennäköisesti tarvittavia investointikustannuksia ja saattaa mahdollistaa kannattavan liiketoiminnan itse investoidulla talteenotolla P2X-toimijoiden kanssa. Tämän ehtona on kuitenkin lisäksi vakaata, yli 100 €/tCO₂ hintataso sekä suotuisa poliittinen kehitys, jolla kannustetaan siirtymistä fossiilisista tuotteista uusiutuviin vetypohjaisiin tuotteisiin. 2030-luvulla myös mineralisointituotteiden markkinan on ennustettu kasvavan ja tuottajien maksukyky saattaa parantua. 2040-luvulle tultaessa menetelmä saattaa mahdollistaa myös hiilidioksidin jakeluliiketoiminnan, mikäli käyttäjien maksuhalukkuus ylittää vaadittavan, noin 190 €/tCO₂ hintatason. 2040-luvun puolivälissä lentopolttoaineiden kysynnän on ennustettu kasvavan voimakkaasti, mikä lisää mahdollisuuksia kannattavalle hiilidioksidiliiketoiminnalle. Toisaalta 2040-luvun aikana ja 2050-luvulle tultaessa DAC-teknologia lisää mahdollisesti kilpailua alalla ja saattaa heikentää hiilidioksidista saatavaa hintaa, joten pitkällä aikavälillä hiilidioksidin talteenottoon liittyy edelleen epävarmuuksia.

Edellä mainittujen markkinatekijöiden ja osiossa 5 saatujen laskentatulosten avulla voidaan arvioida karkeasti optimaalista ajankohtaa liiketoiminnan aloittamiselle. 2030-luku ja tarkemmin sen puoliväli vaikuttavat lupaavilta ajankohdilta liiketoiminnan aloittamiselle. Hiilidioksidin tuotteiden markkinaennuste sekä teknologioiden kehitysennusteet vaikuttavat molemmat lupaavilta tästä ajankohdasta eteenpäin. Investointilaskelmien tuloksista voidaan arvioida, että hiilidioksidin loppukäyttäjiltä vaadittaisiin noin 150–200 €/tCO₂ maksukykyä liiketoiminnan luonteesta riippuen. Kun verrataan tuloksia osiossa 4 arvioituihin hiilidioksidin hintatasoihin, huomataan, että liiketoiminta saattaisi olla mahdollista jo nykyhetkessä,

jos kustannukset saadaan optimoitua ja löydetään tarvittavan maksuhalukkuuden omaavia käyttäjiä. Nämä käyttäjät ovat todennäköisesti e-metanolin ja e-metaanin tuottajia, jotka on hyvä tuoda voimalaitosalueen läheisyyteen kuten aiemmin mainittiin. 2030-luvulla liiketoiminnan riskit ovat kuitenkin todennäköisesti pienempiä, kun käyttäjien maksukyky on parantunut ja teknologian hinta alempi. Osiossa 4 arvioitujen hiilidioksidin hintojen mukaan maksukyky 2030-luvulla saattaa mahdollistaa myös jakeluliiketoiminnan. Optimaalinen ajankohta liiketoiminnan aloittamiselle on siis nykytiedon varassa 2030-luvun puoliväli.

7.3 Haasteiden huomioiminen

Hiilidioksidin talteenottoon ja hyödyntämiseen liittyy useita haasteita, joiden huomioiminen on tärkeää, jos hiilidioksidiliiketoimintaan päätetään sijoittaa tulevaisuudessa. Haasteita aiheuttaa esimerkiksi voimakas vuodenajan mukainen kapasiteetin vaihtelu, talteenoton yhteensovittaminen CHP-tuotantoon, korkeat kustannukset, taloudellinen ja poliittinen epävarmuus sekä mahdollisesti alalle muodostuva kilpailu. Korkeat kustannukset, taloudellinen ja poliittinen epävarmuus sekä alalla mahdollisesti oleva kilpailu ovat haasteita, joihin suoraan vaikuttaminen on hankalaa. Näiden osalta onkin tärkeää pysyä ajan tasalla, jotta voidaan reagoida nopeasti taloudellisiin, poliittisiin tai teknologisiin muutoksiin. Kilpailun kannalta on suotuisaa löytää Savon Voimalle sopivia markkinarakoja, mikäli sellaisia ilmenee. Yksi potentiaalinen markkinarako ovat pienemmät P2X-toimijat, joiden hiilidioksidin tarve voidaan kokonaisuudessaan kattaa voimalaitoksen hiilidioksidikapasiteetilla (IEA 2019, 14). Mikäli varastointi lähtee tulevaisuudessa kehittymään nopeasti ja valtiotasolla investoidaan hiilidioksidin logistiikkaan, runkolinjan saaminen mahdollisimman lähelle Joensuun voimalaitosta olisi tärkeää logistiikkakustannusten minimoimiseksi. Näitä investointeja vauhdittavana tekijänä saattaa olla muut alueella sijaitsevat suuret pistemäiset hiilidioksidin lähteet.

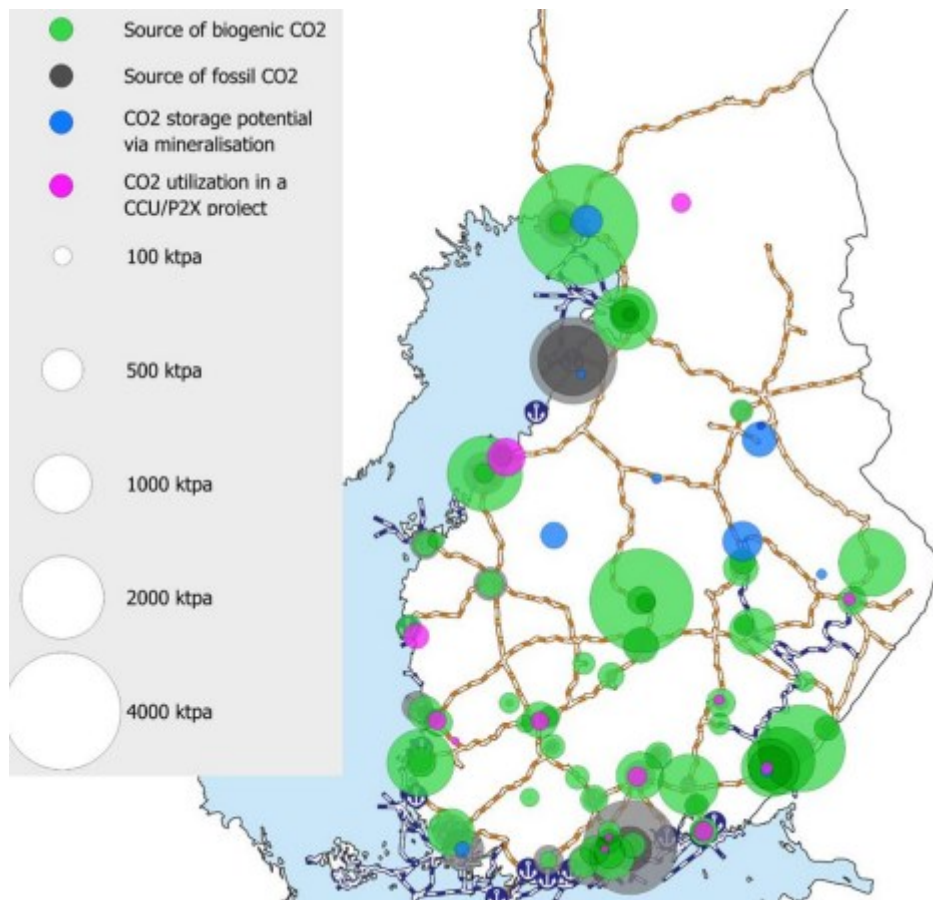
Merkittävin yksittäinen ongelma hiilidioksidin hyödyntämisen kannalta energiayhtiön näkökulmasta vaikuttaisi olevan voimakas tuotantokapasiteetin vaihtelu vuodenajan mukaan. Vaihtelu on ongelmallista, sillä se vaikeuttaa talteenottoteknologian mitoitusta ja toimintaa. Kesänaikaisen polttamattomuuden strategian vaikutusta kannattavuuteen ja liiketoiminnan arvoon tutkittiin laskentaskenaarioiden 1 ja 2 avulla. Suoraan kannattavuuden näkökulmasta kesänaikainen polttamattomuus heikentää kannattavuutta hienoisesti. Kesänajan hiilidioksidikapasiteetin kanssa talteenottoliiketoiminta saavuttaa kannattavuuden hiilidioksidin

hinnan ollessa 130 €/tCO₂ ja ilman kesänajan kapasiteettia 154 €/tCO₂. Heikentynyt kannattavuus johtuu kesänaikaisen hiilidioksidikapasiteetin menetyksestä. Tämä menetys oli kuitenkin kaikilla skenaarioilla pienempi kuin mitoituksen ja tuotantokapasiteetin vuosittaisesta vaihtelusta aiheutuva hiilidioksidikapasiteetin menetys, joten muu vuodenajan mukainen vaihtelu on todennäköisesti jopa suurempi ongelma kuin kesänajan hiilidioksidikapasiteetin menetys. Toisaalta kesänaikainen alhainen tuotantokapasiteetti talven kapasiteettiin verrattuna aiheuttaisi todennäköisesti joka tapauksessa haasteita ainakin amiinipesurin toiminnan kannalta, kun pesurin tulee toimia vähintään 30 % minimiteholla. Talteenoton hyötyjen maksimoimiseksi olisi siis hyvä optimoida voimalaitoksen tuotantoa myös talteenottotoiminnan mukaisesti. Tällöin kaukolämmön tuotannon ja talteenoton vaatimukset tulee huomioida. Talteenotto vaatii toistaiseksi myös suuren määrän höyryä ja sähköä, mikä vaikuttaa epäedullisesti etenkin kaukolämmöntuotantoon. Savon Voiman näkökulmasta eräs ratkaisu ongelmaan voisi olla esimerkiksi sähkökattilakapasiteetin lisääminen Joensuun voimalaitoksella tai lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa. Tällöin hiilidioksidin tuotantokapasiteetin säätely helpottuu ja lämpöpumpuilla voidaan mahdollisesti hyödyntää myös talteenoton lämmönvaihtimissa muodostuvaa hukkalämpöä.

Kun etsitään ratkaisuja kesän ajan hiilidioksidikapasiteetin puutteeseen, on hyvä painottaa ratkaisuja, jotka luovat talteenottoteknologian tarvitseman minimikapasiteetin myös kesäajalle ja mahdollistavat talteenoton toiminnan vuodenajasta riippumatta. Selkein ratkaisu kapasiteetin puutteeseen on voimalaitoksen läheisyyteen tuotavat toimijat, joiden toiminta tuottaisi hiilidioksidia myös kesäaikana. Tämä mahdollistaa suuremman hiilidioksidikapasiteetin talteenottolaitteistolle, jolloin kannattavuus paranee ja hiilidioksidia voidaan myydä alhaisemmalla hintatasolla. Nykytilanteessa Joensuun voimalaitoksen tapauksessa potentiaalinen toimija on esimerkiksi Taalerin omistama biohiilitehdas, jonka tuotanto toimii myös kesän aikana. Biohiilitehtaan selkeimpänä talteenottoliiketoimintaa hyödyntävänä tekijänä on sen tuottaman prosessikaasun savukaasuun verrattuna korkea hiilidioksidipitoisuus (40–60 %), jonka avulla on mahdollista korvata kesänajan menetettyä hiilidioksidikapasiteettia (Wang et al. 2025, 11). Toinen selkeä etu on biohiilitehtaan välitön läheisyys Joensuun voimalaitoksen kanssa. Tämä mahdollistaa synergiaetujen hyödyntämisen voimalaitoksen ja biohiilitehtaan välillä. Näitä synergiaetuja on eritelty tarkemmin osiossa 7.4. Havainnollistavana esimerkkinä kannattavuuden parantamisesta voidaan tarkastella tilannetta, jossa kesän ajan kuukausille saataisiin noin puolet Joensuun voimalaitokselle aiemmin mitoitettun talteenottojärjestelmän kapasiteetista, eli yhteensä noin 40 000 tCO₂. Tämä kapasiteetti

vastaisi noin viidesosaa talteenotossa hyödynnettävästä hiilidioksidista Joensuun voimalaitoksella. Jos talteenottoon investoitaisiin yhteisinvestointina, Savon Voiman osuus investointikustannuksista olisi noin 20 % alhaisempi. Tämän seurauksena myös kannattavuus parani jonkin verran, mitä voidaan arvioida osiossa 6 tehtyjen herkkyystarkastelujen avulla.

Näiden lisäksi vaihtoehtona on myös voimalaitosalueen ulkopuoliset toimijat. Mikäli talteenotto yleistyy tulevaisuuden hiilidioksidimarkkinoilla, hiilidioksidia voidaan ostaa myös voimalaitosalueen ulkopuolelta. Ulkopuolelta ostettu hiilidioksidi ei varsinaisesti paranna talteenoton kannattavuutta, mutta turvaa hiilidioksidin käyttäjien toiminnan kesän ajaksi ja hyödyttää täten Savon Voimaa sekä yhteistyökumppaneita. Hiilidioksidin ostaminen edellyttää kuitenkin, että muualla lähialueella sijaitsevilla toimijoilla muodostuu ylitarjontaa hiilidioksidista. Näitä toimijoita on hyvä tunnistaa jo etukäteen siltä varalta, että markkina kehittyy mahdollistaen hiilidioksidin ostamisen. Potentiaalista ylitarjontaa muodostuu todennäköisesti alueille, joilla on paljon hiilidioksidituotantoa. Biogeenisen hiilidioksidin tuotantoa Suomessa on esitetty kuvassa 26. Merkittävimmät Joensuun läheisyydessä olevat alueet ovat Kuopio, Mikkeli, sekä Etelä-Karjala. Kuopiossa ja Mikkelissä on jonkin verran biogeenisen hiilidioksidin tuotantoa. Selkein vaihtoehto on kuitenkin Etelä-Karjala, johon on keskittynyt merkittävästi metsäteollisuutta Suomessa. Lisäksi Joensuun voimalaitoksen lähellä on Enocellin sellutehdas, josta voisi olla mahdollista ostaa hiilidioksidia, mikäli ylitarjontaa muodostuu.



Kuva 26. Biogeenisen hiilidioksidin lähteitä Suomessa vuonna 2024 (VTT 2024)

Toinen mahdollinen skenaario, jota on myös hyvä pohtia tulevaisuutta varten, on pienemmän talteenottokapasiteetin mahdollistuminen ja yleistyminen. Tämä voisi olla mahdollista myös lähitulevaisuudessa, jos esimerkiksi pilottihankkeille myönnetään tarvittavia kannustimia. Tällöin hiilidioksidia voitaisiin korvata kesän aikana myös pienemmiltä toimijoilta saatavalla hiilidioksidilla. Potentiaalisia toimijoita pohtiessa on hyvä huomata, että hiilidioksidin korkea biogeenisyysaste tulee säilyä, jotta hiilidioksidista saatava arvo ei heikkene. Tällöin potentiaalisia toimijoita voisivat olla metsäteollisuuden lisäksi pienemmät sahat, joiden prosessissa muodostuu hiilidioksidia sekä biokaasulaitokset. Biokaasulaitosten etuna on etenkin niiden tuottama korkea hiilidioksidipitoisuus, mikä pitää talteenoton kustannukset maltillisina (Kearns et al. 2023, 6; Bioenergia ry 2025).

7.4 Mahdollisuudet asiakasrajapinnoissa

Yksi Savon Voiman strategian kulmakivistä on asiakas keskiöön (Savon Voima 2023b). Asiakasnäkökulman huomioimiseksi on hyvä tarkastella biogeeniseen hiilidioksidiin liittyviä mahdollisuuksia, joilla voidaan parantaa asiakaskokemusta, sekä luoda lisäarvoa biogeenisen hiilidioksidin käyttäjille sekä mahdollisesti myös muille asiakkaille. Lisäarvoa luotaessa hyötyvät sekä Savon Voima, että hiilidioksidia käyttävä toimija, eli asiakas. Asiakasrajapinnat sijaitsevat arvoketjun lopussa, kun myytävä hiilidioksidi luovutetaan asiakkaalle. Aiemmissa osioissa on tunnistettu kolmen tyyppisiä toimijoita, joiden kanssa on mahdollista harjoittaa biogeeniseen hiilidioksidiin liittyvää liiketoimintaa. Nämä toimijat voidaan jakaa voimalaitoksen läheisyydessä oleviin toimijoihin, sekä kauempana voimalaitoksesta sijaitseviin toimijoihin. Voimalaitoksen läheisyyteen sijoittuvat toimijat tulevat todennäköisesti olemaan pääasiassa P2X-toimijoita. Savon Voimalla tulee todennäköisesti olemaan myös P2X-toimija asiakkaana, kun P2X Solutionsin hanke lähtee etenemään. Kauempana voimalaitoksesta sijaitseviin potentiaalsiin toimijoihin kuuluvat mineralisointitoimijat, ja mahdollisesti tulevaisuudessa kehittyvät P2X käyttökeskittymät, joille voidaan siirtää hiilidioksidia jakeluliiketoiminnan avulla. Lisäarvon tuottamiskeinoja on esitetty tiivistetysti kuvassa 27.



Kuva 27. Mahdollisuudet lisäarvon tuottamiseksi asiakkaille

Lisäarvon luomisvaihtoehtoja tarkastellessa on syytä huomioida nykyisten asiakkaiden tarve, eli Savon Voiman tapauksessa P2X Solutionsin hanke. Voimalaitosten läheisyydessä sijaitseville toimijoille luotava lisäarvo on hyvä perustaa palveluihin, joilla on saavutettavissa synergiaetuja. Potentiaaliin palveluihin voi kuulua esimerkiksi energia- sekä ainevirtojen tarjoamista toimijoille. Kuten aiemmin todettiin, voimalaitoksella on saatavissa useita ainevirtoja, esimerkiksi eri painetason höyryvirtoja sekä demineralisoitua vettä. Kuten osiossa 3.2 todettiin, nykyiset talteenottoteknologiat tarvitsevat lämpöä, joten höyryvirran tarjoaminen asiakkaan talteenottojärjestelmään on luonteva vaihtoehto huomioida asiakastarpeita. Lisäksi talteenottoteknologia saattaa tarvita esimerkiksi pH:n säätökemikaaleja tai vedenkäsittelyä, jotka on mahdollista suorittaa voimalaitosinfrastruktuurin puitteissa. Voimalaitoksen aine- ja energiavirroilla on mahdollista tuottaa lisäarvoa myös suoraan P2X-prosessiin. Tätä vaihtoehtoa on hyvä tarkastella siitäkin näkökulmasta, että voimalaitoksen läheisyyteen tulee lisää asiakkaita tulevaisuudessakin. P2X-prosesseja tarkastellessa on hyvä huomioida, että prosessien välillä on runsasta vaihtelua osan prosesseista ollessa teoriassa energiaomavaraisia ja osan tarvitessa erityyppisiä aine- ja energiavirtoja riippuen tuotettavasta tuotteesta sekä itse prosessista. Tarkempi selvitys asiakkaan tarpeista on syytä suorittaa tapauskohtaisesti. Tarpeita saattaa muodostua esimerkiksi ulkopuolisesta lämmöstä sekä jäähdytyksestä. Esimerkiksi Atsonios et al. (2023) tekemässä tutkimuksessa tarvittava ulkopuolinen lämpö on arvioitu 125–250 °C lämpöisenä höyrynä. (Rejlers Finland Oy 2021; Atsonios et al. 2023.)

Aine- ja energiavirtojen lisäksi asiakkaille voidaan tuottaa lisäarvoa palveluilla. Tämä on luonteva vaihtoehto luoda lisäarvoa Savon Voimalle, sillä Savon Voimalla on entuudestaan kokemusta palveluiden tuottamisesta voimalaitosalueella sijaitsevalle toimijalle (Taaleri 2022). Voimalaitosalueella palveluihin voidaan sisällyttää esimerkiksi käyttö- ja kunnossapitotoimintaa, jolloin voidaan välttää päällekkäisiä työtehtäviä. Samalla voitaisiin myös tarjota organisaatioihin liittyvää asiantuntijapalvelua, kuten esimerkiksi työnjohtoa ja -suunnittelua. Jakeluliiketoiminnan suhteen nykytilanteessa on epäselvää kenelle jakeluinfrastruktuuriin investoiminen ja infrastruktuurin ylläpitäminen kuuluu. Yksi vaihtoehto jakeluliiketoiminnan kehittämiseksi voisi olla esimerkiksi infrastruktuuriin liittyvien palvelujen, kuten kunnossapidon tarjoaminen asiakkaalle. Potentiaalisille pienemmille asiakkaille voitaisiin myös tarjota infrastruktuuriin liittyvää avaimet käteen -palvelua, jolla voidaan varmistaa uusien asiakassuhteiden muodostumista. Tämä myös nopeuttaisi todennäköisesti hiilidioksidin

käytön kehitystä sekä auttaa sidosryhmiä tunnistamaan hiilidioksidein liittyviä mahdollisuuksia.

7.5 Mahdollisuudet päästökaupassa

Päästökauppa tarjoaa potentiaalisesti joitain mahdollisuuksia biogeenisen hiilidioksidin suhteen jo nykyhetkessä. Päästökauppa keskittyy pääasiassa hiilidioksidin varastointiin liittyviin teknologioihin, joten mahdollisuudet liittyvät geologiseen varastointiin, sekä mahdollisesti mineralisointiin tulevaisuudessa. Savon Voiman strategia huomioiden tarkastelu voidaan kohdentaa mineralisointiin. Mineralisointitoimijat ovat helpoiten saavutettavissa jakeluliiketoiminnan avulla.

Mahdollisuuksia tunnistettaessa on hyvä huomata ero säänneltyjen ja vapaaehtoisten päästökaupamekanismien välillä. Säännellyt päästökaupamekanismit, kuten esimerkiksi EU ETS, ottavat nykyhetkessä huomioon ainoastaan fossiiliset hiilidioksidipäästöt. Tällöin päästökaupamekanismia voidaan käyttää pääasiassa päästöoikeusmaksujen välttämiseen fossiilista hiilidioksidia talteen otettaessa, mikä ei ole relevanttia Savon Voiman kannalta, koska talteenottoon yhteensopivat tuotantolaitokset tuottavat vuodesta 2026 eteenpäin vain biogeenistä hiilidioksidia. On kuitenkin hyvä huomata, että keskustelua biogeenisen hiilidioksidin sisällyttämisestä EU ETS päästökauppaan käydään lähitulevaisuudessa. Lisäksi biogeenisen hiilidioksidin suhteen on pohdittu myös omia päästökaupamenetelmiä. Jos nämä tulevat käyttöön tulevaisuudessa, hiilidioksidia varastoimalla voidaan mahdollisesti luoda liiketoimintaa.

Vapaaehtoisilla hiilidioksidimarkkinoilla on mahdollista hyödyntää myös biogeenistä hiilidioksidia nykytilanteessa. Päästöoikeuden tuottaja sitoutuu varastoimaan biogeenistä hiilidioksidia, jolloin hiilidioksidin määrä ilmakehässä vähenee. Ostajat ovat yleensä suuria säänneltyyn päästökaupan ulkopuolella olevia toimijoita, jotka haluavat kompensoida hiilidioksidipäästöjään. Vapaaehtoisilla markkinoilla päästöoikeuksia ovat ostaneet esimerkiksi Microsoft, Tanskan valtio, sekä Suomessa Finavia, Hesburger sekä LähiTapiola. Merkittävimmät vapaaehtoiset markkinastandardit Suomessa ovat Gold Standard ja Verran VCS. (Michaelowa et al. 2023; Finnwatch 2021, 92). Vapaaehtoisen markkinan merkittävin ongelma on markkinoiden hajanaisuus. Markkinat ovat jakautuneet useisiin rinnakkaisiin standardeihin, joten ostajan ja myyjän kohtaaminen voi olla vaikeampaa. Markkinalta tulee

löytyä toimija, joka on valmis maksamaan varastoinnin ylittävän kustannuksen. Tällöin hiidioksidin mineralisointi tulee myös olla kyseisellä päästömarkkinalla varastointiin hyväksytty varastointimenetelmä.

8 Yhteenveto

Diplomiyön tavoitteena oli tarkastella Savon Voiman mahdollisuuksia luoda uutta liiketoimintaa biogeenisestä hiilidioksidista sekä mahdollisuuksia laajentaa liiketoimintaa hiilidioksidin talteenottoon ja jakeluun. Työssä havaittiin, että liiketoiminnan luominen nykytilanteessa sisältää useita haasteita, mutta lähitulevaisuudessa biogeeniseen hiilidioksidiin liittyy merkittävää liiketoimintapotentiaalia, jota on mahdollista hyödyntää oikeilla toimenpiteillä.

Yksi tutkimuksen tavoitteista oli tutkia talteenoton teknologiaa, logistiikkaa, sekä niihin tarvittavia investointeja ja osaamista Savon Voimalta. Talteenottoteknologioita tarkastellessa huomattiin, että nykytilanteessa selkeä valinta teknologiaksi on absorptiomenetelmään perustuva amiinipesuri. Muut teknologiat eivät sovellu hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista yhtä hyvin tai ne eivät ole vielä saavuttaneet kaupallisen mittakaavan vaatimaa teknologista tasoa. Amiinipesurin etuina on pitkä käyttökokemus teollisessa mittakaavassa, sekä selkeät integrointimahdollisuudet voimalaitosinfrastruktuuriin. Merkittävin haittapuoli nykyteknologiassa on korkeat kustannukset. Kustannukset arvioitiin voimalaitosten hiilidioksididatan ja olemassa olevan tutkimuksen avulla. Arviot tehtiin mitoittamalla talteenotto niin, että kesäkuukausien ulkopuolinen hiilidioksidikapasiteetti tulee mahdollisimman tehokkaasti käyttöön. Tällä menetelmällä investointikustannuksiksi Joensuun ja Iisalmen voimalaitoksille saatiin 80 miljoonaa euroa ja 30 miljoonaa euroa vastaavassa järjestyksessä. Operatiivisten kustannusten arvioitiin aiemman tutkimustiedon perusteella olevan noin 8–10 % investointikustannuksista riippuen mittakaavasta. Korkeat investointikustannukset ovat selkeä ongelma investoinnille nykytilanteessa, mutta vaihtoehtoiset teknologiat, kuten happipoltto ja kalsiumkierto tulevat parantamaan tilannetta tulevaisuudessa. Talteenoton nopean kehityksen vuoksi arviot optimaalisesta teknologiasta ja kustannuksista olisi hyvä tehdä uudelleen esimerkiksi jo 2030-luvulle tultaessa.

Hiilidioksidin logistiikan mahdollistamiseksi tarvitaan joko kompressoreita putkisiirron tapauksessa tai nesteytystä maantie- ja rautatiesiirron tapauksissa. Logistiikkakustannuksia tutkiessa huomattiin, että arviot vaihtelevat voimakkaasti eri lähteiden välillä. Lisäksi nykyhetken tiedolla on vielä epäselvää, kenelle ja missä suhteessa investointikustannukset jakautuvat. Tästä syystä tutkimuksessa päädyttiin arvioimaan kustannukset VTT:n lokakuussa 2024 julkaiseman hiilidioksidin logistiikkaa koskevan kustannuksen pohjalta. Näin saadut

tulokset vastaavat parhaiten Suomen olosuhteita ja nykytilannetta. Arviot sisältävät hiilidioksidin logistiikkaketjun voimalaitokselta loppukäyttäjälle. Tutkimuksen avulla lähialueen jakeluliiketoiminnan kustannukseksi arvioitiin noin 35 €/tCO₂ ja geologisen varastoinnin kustannuksiksi noin 45–90 €/tCO₂ riippuen kansallisen logistiikkainfrastruktuurin kehityksestä.

Tutkimuksessa arvioitiin myös potentiaalisia hiilidioksidin loppukäyttäjiä, sekä hiilidioksidin hyödyntämiseen liittyviä markkinoita. Potentiaalisiksi loppukäyttäjiksi tunnistettiin P2X-toimijat, jotka sijaitsevat lähitulevaisuudessa todennäköisesti pistemäisten hiilidioksidilähteiden läheisyydessä. Lisäksi loppukäyttäjiin kuuluu tulevaisuudessa mahdollisesti mineralisointitoimijoita sekä P2X käyttökeskittymiä, mikäli nämä lähtevät kehittymään. Näille toimijoille voidaan tulevaisuudessa toimittaa hiilidioksidia jakeluliiketoiminnan avulla. Hiilidioksidimarkkinan nykytilanne osoittautui tutkimusta tehdessä kehittymättömäksi ja epävakaaaksi. Markkinalta puuttuu nykytilanteessa biogeenistä hiilidioksidia koskeva sääntely sekä tarvittavat kannustimet. Näiden huomioimiseksi on kuitenkin tehty suunnitelmia, joita on ilmennyt lisää myös tämän tutkimuksen tekemisen aikana. Suomen olosuhteissa on todennäköistä, että markkina lähtee kehittymään 2030-luvulle tultaessa. Hiilidioksidin hinnan arviointi osoittautui edellä mainituista syistä haastavaksi. Lisäksi P2X-tuottajille myytävästä hiilidioksidista saatava tuotto vaihtelee tapauskohtaisesti eikä nykytilanteessa ole vielä julkista tietoa. Näistä syistä hiilidioksidin hinta arvioitiin päästömarkkinoilta saatavien arvioiden avulla nykyhetkestä 2050-luvulle. Hinnan arvioitiin vaihtelevan välillä 100–250 €/tCO₂.

Liiketoiminnan arvon sekä käyttäjiltä vaadittavan maksukyvyyn arvioimiseksi suoritettiin investointilaskelmat eri skenaarioille, joiden tarkoituksena oli arvioida hiilidioksidille asetettavaa hintaa sekä käyttäjiltä vaadittavaa maksukykyä. Alkuarvot valittiin markkinoiden nykytilanne huomioiden, joka osaltaan vaikutti siihen, että tulokset osoittivat liiketoiminnan arvon olevan negatiivista nykytilanteessa. Tämä tulos korreloi vahvasti aiheesta tehdyn tutkimuksen kanssa. Laskelmien yhteydessä tehtiin myös herkkyysanalyysit, jotta voitiin arvioida liiketoiminnan arvoa ja kannattavuutta myös tulevaisuudessa. Herkkyysanalyysiä tehdessä haasteeksi osoittautui hiilidioksidin hinta, joka vaikuttaa herkkyysanalyysiin voimakkaasti. Tästä syystä työssä päädyttiin myös laskemaan hinnat hiilidioksidille, joilla liiketoiminta saavuttaa kannattavuuden. Laskelmien tuloksena käyttäjiltä vaadittavan maksukyvyyn arvioitiin sijoittuvan välille 150–200 €/tCO₂ riippuen liiketoimintamuodosta. Voimalaitoksen läheisyydessä toimijoilta vaaditaan alhaisempaa hintaa. Jakeluliiketoimintaa harjoittaessa hinta on lähempänä 200 €/tCO₂. Verrattaessa näitä arvoja aiemmin esitettyihin hiilidioksidin

hinta-arvioihin liiketoiminnan potentiaalisiksi arvoksi tulevaisuudessa saatiin noin 50–100 M€ vuodessa, mikäli markkinaolosuhteet kehittyvät optimaalisesti. Investointilaskelmien avulla arvioitiin myös kesän ajan polttamattomuuden ja voimalaitosvalinnan vaikutusta kannattavuuteen. Kesän ajan polttamattomuus heikensi kannattavuutta odotetusti hienoisesti ja talteenoton tarkastelu Iisalmen voimalaitoksen mittaluokassa osoittautui haastavaksi nykyteknologialla. Tilanne saattaa kuitenkin muuttua tulevaisuudessa nopeasti.

Liiketoiminnan aloittamisajankohdan arviointi osoittautui haastavaksi, sillä optimaaliseen ajankohtaan vaikuttaa useita tekijöitä. Todennäköisin ajankohta kannattavan liiketoiminnan aloittamiseksi vaikuttaisi nykytiedon valossa olevan kuitenkin 2030-luvun puoliväli. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat talteenottoteknologian kehitys, lopputuotemarkkinan kehitys sekä näkymät poliittisten kannustimien kehityksestä.

Edellä mainittuja tietoja käytettiin tutkimuksen lopussa liiketoiminnan laajentamismahdollisuuksien arviointiin hiilidioksidin arvoketjussa. Merkittäviksi haasteiksi tunnistettiin kesän ajan polttamattomuus sekä korkeat kustannukset ja markkinan kehittymättömyys nykytilanteessa. Liiketoiminnan kannattavuuden parantamiseksi ja toiminnan aloittamiseksi on suositeltavaa pyrkiä ensisijaisesti muodostamaan yritysclusterin tapaista yritysinfrastruktuuria, jossa muita hiilidioksidia tuottavia toimijoita tuodaan voimalaitoksen läheisyyteen. Näin voidaan hyödyntää synergiaetuja laitosten välillä ja jakaa talteenottoon liittyvää investointiriskiä. Savon Voimalla on jo nykytilanteessa vahva alku tämän kaltaiselle toiminnalle, kun Joensuun voimalaitoksen läheisyydessä toimii biohiilitehdas sekä tulevaisuudessa myös P2X-hanke. Markkinan kehityksen alkuvaiheilla on suositeltavaa tehdä yhteistyötä e-metania ja e-metanolia tuottavien toimijoiden kanssa, sillä näiden teknologioiden kehittyminen edistää markkinakehitystä. Talteenoton integroimisesta voimalaitosinfrastruktuuriin kannattaa myös tehdä lisätutkimusta, sillä hyvin tehdyllä prosessi-integraatiolla voidaan parantaa kannattavuutta esimerkiksi lämpöpumppujen avulla. Toinen selkeä keino kesän ajan polttamattomuuden huomioimiseksi on hiilidioksidin ostaminen kesäisin voimalaitoksen ulkopuolelta. Tämä ei vaikuta merkittävästi itse talteenoton kannattavuuteen, mutta palvelee Savon Voiman asiakkaita. Potentiaalisiksi sijainneiksi tunnistettiin Kuopio, Mikkeli, Etelä-Karjala sekä Enocellin sellutehdas, joka sijaitsee melko lähellä Joensuun voimalaitosta. Mikäli talteenottoteknologian kehitys sallii pienemmän mittakaavan talteenoton tulevaisuudessa, hiilidioksidia voidaan tuoda myös pienemmiltä toimijoilta, kuten esimerkiksi sahoilta ja bio-kaasulaitoksilta. Hiilidioksidin ostaminen voimalaitosalueen ulkopuolelta vauhdittaa

todennäköisesti myös jakeluliiketoiminnan käynnistämistä. Tämän tarkastelu on aiheellista aloittaa, kun liiketoiminta voimalaitoksen läheisyydessä on saavuttanut kannattavuuden. Jakeluliiketoiminta edellyttää lisäinvestointeja logistiikkaan, selkeiden loppukäyttäjien kehitystä sekä loppukäyttäjien tuntemusta biogeenisen hiilidioksidin potentiaalista.

Työssä tunnistettiin myös mahdollisuuksia lisäarvon luomiseksi liiketoiminnassa. Asiakasnäkökulman tuominen liiketoimintaan parantaa liiketoiminnan kannattavuutta ja sopii Savon Voiman strategiaan, jonka yksi kulmakivistä on asiakas keskiöön. Lisäarvoa luomalla voidaan pienentää nykyhetken talteenoton kustannusten ja markkinan kehittymättömyyden aiheuttamaa erotusta kannattavuudessa. Voimalaitosalueella asiakkaille voidaan tarjota aine- ja energiavirtoja sekä käyttöön ja kunnossapitoon liittyviä palveluja tarjoutuvien synergiaetujen hyödyntämiseksi. Jakeluliiketoiminnan yhteydessä voidaan tarjota myös logistiikkainfrastruktuuriin liittyviä palveluja. Toinen lisämahdollisuus on päästökaupasta saatavat tuotot. Nämä tuotot voidaan realisoida tulevaisuudessa hiilidioksidin mineralisoinnin tai geologisen varastoinnin avulla. Savon Voiman strategia huomioiden liiketoiminta kannattaa tulevaisuudessa kohdentaa mineralistointitoimijoihin.

Tehty tutkimus sisältää muutamia rajoitteita, jotka on hyvä ottaa huomioon tuloksia tarkastellessa. Logistiikkakustannuksia arvioitaessa logistiikkaketjun kustannus kokonaisuudessaan otettiin mukaan kustannuksiin, jotta tiedot vastaisivat Suomen olosuhteita. Todellisuudessa jakeluskenaarion kustannukset voivat olla alhaisempia, jos investointeja tehdään yhteisinvestointeina toimijoiden välillä. Arvioidut hiilidioksidin hintatasot sisältävät myös merkittävää epävarmuutta hiilidioksidi- ja P2X-markkinoiden nykytilanteen vuoksi. Laskenta suoritettiin tämän takia vakaalla hintatasolla. Todellisuudessa hintataso nousee todennäköisesti investoinnin pitoajan aikana. Tutkimusta tehdessä on herännyt myös useita aiheita jatkotutkimukselle, joita olisi hyvä tutkia, mikäli liiketoimintaa päätetään lähteä laajentamaan. Biogeenisen hiilidioksidin suunniteltujen sisällyttämiskeinojen vaikutusta päästökauppaan olisi hyvä tutkia, jotta voidaan arvioida vaikutusta päästökaupasta saataviin tuottoihin. Talteenottoteknologian tarvitsemat aine- ja energiavirrat vaikuttavat merkittävästi voimalaitosprosessiin, joten myös prosessi-integraatiosta olisi hyvä tehdä tarkempi mallinnus. Lähtitulevaisuudessa vaihtoehtoisia talteenottoteknologioita tulee myös tutkia tarkemmin. Lisäksi olisi hyvä suorittaa laaja kartoitus tulevaisuuden asiakkaiden maksukyvyistä, sekä halukkuudesta osallistua biogeenisen hiilidioksidin arvoketjuun.

Lähteet

- Aaron, D. & Tsouris, C. 2005. Separation of CO₂ from Flue Gas: A Review. *Separation Science and Technology*. Volume 40. s. 321-348.
- Akeeb, O., Wang, L., Xie, W., Davis, R. & Alkasrawi, M. 2022. Post-combustion CO₂ capture via a variety of temperature ranges and material adsorption process: A review. *Journal of environmental management*. Volume 313. 115026.
- Alagu, A. R. Boumrifak, C. & Lopez Gonzales, L. F. 2024. Carbon for Power-to-X – Suitable CO₂ sources and integration in PtX value chains. Dechema. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 26.9.2024]. Saatavilla: [Carbon for Power-to-X - Suitable CO2 sources and integration in PtX value chains DECHEMA PtX-Hub](#)
- Aminu, M. D. et al. 2017. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied energy*. Volume 208. s. 1389–1419.
- Arasto, A., Kohl, J., Kujanpää, L., Lehto, J., Lehtonen, J., Lintunen, J. & Mäkikouri, S. 2024. Päästäjästä tuottajaksi – Hiilidioksiditaloudella arvonlisää Suomen metsäsektorille. VTT. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.10.2024]. Saatavilla: https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2024/VTT_Luke_Hiilidioksiditalous.pdf
- Atsonios K. et al. 2023. Process analysis and comparative assessment of advanced thermochemical pathways for e-kerosene production. *Energy*. Volume 278. 127868.
- Australian Government. 2024. Quarterly Carbon Market Report March Quarter 2024. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.12.2024]. Saatavilla: <https://cer.gov.au/markets/reports-and-data/quarterly-carbon-market-reports/quarterly-carbon-market-report-march-quarter-2024/australian-carbon-credit-units-accus>
- Bennett, J. A., Abotalib, M., Zhao, F. & Clarens, A. F. 2021. Life cycle meta-analysis of carbon capture pathways in power plants: Implications for bioenergy with carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 111. 103468.

Berghout, N., van den Broek, M. & Faaij, A. 2013. Techno-economic performance and challenges of applying CO₂ capture in the industry: A case study of five industrial plants. *International journal of greenhouse gas control*. Volume 17. s. 259-279.

Betoni-lehti. 2024. Carbonaide-teknologia kaupallistumisvaiheessa, nopeaa skaalautumista selittää betoniteollisuuden hyvä ekosysteemi. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 18.11.2024]. Saatavilla: <https://betoni.com/lehti/2024/06/10/carbonaide-teknologia-kaupallistumisvaiheessa-nopeaa-skaalautumista-selittaa-betoniteollisuuden-hyva-ekosysteemi/>

BioCO₂. Uutta kestäväää liiketoimintaa bioperäisestä hiilidioksidista – Kooste projektin päätuloksista. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 14.10.2024]. Saatavilla: <https://projectsites.vtt.fi/sites/BioCO2/www.vtt.fi/sites/BioCO2/PublishingImages/tiedotteet/BioCO2%20kooste.pdf>

Bioenergia ry. 2025. Commercial Development of CCUS Projects in the Nordics. [Jäsenwebinaari]. [Viitattu 1.3.2025]. Sisäinen dokumentti.

Boston Consulting Group. 2024a. The Big Opportunities in Biogenic Emissions. [Verkkootikkeli]. [Viitattu 31.12.2024]. Saatavilla: <https://www.bcg.com/publications/2024/big-opportunities-in-biogenic-emissions>

Boston Consulting Group. 2024b. Boosting Demand for Carbon Dioxide Removal. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 31.12.2024]. Saatavilla: <https://www.bcg.com/publications/2024/boosting-demand-for-carbon-dioxide-removal>

Bryngelsson, M. & Westermark, M. CO₂ capture pilot test at pressurized coal fired CHP plant. *Energy Procedia*. Volume 1. s. 1403-1410.

Carbon Market Watch. 2020. Carbon markets 101, the ultimate guide to global offsetting mechanisms. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 4.12.2024]. Saatavilla: <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2020/07/CMW-ENGLISH-CARBON-MARKETS-101-THE-ULTIMATE-GUIDE-TO-MARKET-BASED-CLIMATE-MECHANISMS-FINAL-2020-WEB.pdf>

Carbon Market Watch. 2023. Poor Framing, the role of negative emissions technologies in existing climate policy frameworks. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 5.12.2024]. Saatavilla: <https://carbonmarketwatch.org/publications/poor-framing-the-role-of-negative-emissions-technology-in-climate-policy-frameworks/>

CDR.fyi. 2024. Price Index. [Verkkosivu]. [Viitattu 31.12.2024]. Saatavilla: <https://www.cdr.fyi/>

Choe, C., Kim, H., Lim, H. Feasibility study of power-to-gas as simultaneous renewable energy storage and CO₂ utilization: Direction toward economic viability of synthetic methane production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Volume 57. 103261.

Deknatel, N & van der Loos, A. 2025. The intangible technological innovation system: The role and influence of voluntary and compliance carbon markets on carbon dioxide removal on the European Union. *Energy Research and Social Science*. Volume 119. 103851.

Durusut et al. 2020. Future Role of CCS Technologies in the Power Sector. IEAGHG. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 30.9.2024]. Saatavilla: <https://ieaghg.org/publications/future-role-of-ccs-technologies-in-the-power-sector/>

Dziejarski, B., Krzyżyńska, R. & Andersson, K. 2023. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*. Volume 342. 127776.

Erdöl, H., Şahin, F. & Acarali, N. 2024. Novel Study on Cryogenic Distillation Process and Application by Using CHEMCAD Simulation. *ACS Omega*. Volume 9, s. 15165–15174.

ESMA. 2024. EU carbon markets 2024. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 14.11.2024]. Saatavilla: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/2024-10/ESMA50-43599798-10379_Carbon_markets_report_2024.pdf

Finnwatch. 2021. Anekauppaa vai ilmastotekoja? Vapaaehtoisen päästökompensaation kysyntä, tarjonta ja laatu Suomessa. [Verkköjulkaisu]. [Viitattu 5.12.2025]. Saatavilla: https://finnwatch.org/images/reports_pdf/Anekauppaa_vai_ilmastotekoja_small_size.pdf

Galimova, T., Ram, M., Bogdanov, D., Fasihi, M., Khalili, S., Gulagi, A., Karjunen, H., Mensah, T. N. I., & Breyer, C. 2022. Global demand analysis for carbon dioxide as raw material from key industrial sources and direct air capture to produce renewable electricity-based fuels and chemicals. *Journal of cleaner production*. Volume 373 s. 133920.

Hsiao, Y.-D. & Chang, C.-T. 2024. Efficient multi-objective optimization and operational analysis of amine scrubbing CO₂ capture process with artificial neural network. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 138. s. 104242.

- Huhtinen, M. et al. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusi painos. Helsinki: Edita.
- Huhtinen, M. et al. 2013. Voimalaitostekniikka. 2. tarkennettu painos. Helsinki: Opetushallitus.
- ICAP. 2022. EU Emissions Trading System (EU ETS). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.12.2024]. Saatavilla: https://icapcarbonaction.com/system/files/ets_pdfs/icap-etsmap-factsheet-43.pdf
- IEA. 2020. CCUS in clean energy transitions. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.10.2024]. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>
- IEA. 2019. Putting CO₂ to Use. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.1.2025]. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>
- IEAGHG. 2019. Towards Zero Emissions CCS in Power Plants Using Higher Capture Rates or Biomass. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.10.2024]. Saatavilla: <https://ieaghg.org/publications/towards-zero-emissions-ccs-from-power-stations-using-higher-capture-rates-or-biomass/>
- Kearns, D., Liu, H. & Consoli, C. 2021. Technology readiness and costs of CCS. Global CCS Institute. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.12.2024]. Saatavilla: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-and-costs-of-ccs/>
- Kujanpää, L., Reznichenko, A., Saastamoinen, H., Mäkikouri, S., Soimakallio, S., Tynkkynen, O., Lehtonen, J., Wirtanen, T., Linjala, O., Similä, L., Keränen, J., Salo, E., Elfving, J. & Koponen, K. 2023. Carbon dioxide use and removal: Prospects and policies. Valtioneuvoston kanslia. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.9.2024]. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164795/VNTEAS_2023_19.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kuparinen, K., Vakkilainen E. Tynjälä, T. 2019. Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.
- Leckner, B. 2023. Negative CO₂ emission from oxy-fuel combustion in CFB boilers. Fuel. Volume 333. 126425.

Liszka, M., Malik, T., Budnik, M. & Ziebig, A. 2013. Comparison of IGCC (integrated gasification combined cycle) and CFB (circulated fluidized bed cogeneration plants equipped with CO₂ removal). *Energy*. Volume 58. s. 86-96.

Li, Q., Khosravi, A., Farsaei, A. & Sun, L. 2024. Thermodynamics, economic and carbon emission analysis of power-to-methanol process through alkaline electrolysis and monoethanolamine (MEA) carbon capture. *Chemical Engineering Science*. Volume 293. 120029.

Metsä Group. 2024. Puuperäisen hiilidioksidin talteenotto on iso mahdollisuus Suomelle – ja ilmastolle. [Lehdistötiedote]. [Viitattu: 2.1.2025]. Saatavilla: <https://www.metsagroup.com/fi/uutiset-ja-julkaisut/tiedotteet/2024/puuperaisen-hiilidioksidin-talteenotto-on-iso-mahdollisuus-suomelle--ja-ilmastolle/>

Michaelova, A., Honegger, M., Poralla, M., Winkler, M., Dalfiume, S. & Nayak, A. 2023. International carbon markets for carbon dioxide removal. *PLOS Clim* 2(5): e0000118.

Myers, C., Wenqin, L. & Markham, G. 2024. The cost of CO₂ transport by truck and rail in the United States. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 134, 104123.

Mäkikouri, S. Kujanpää, L. Lehtonen, J. Heikkinen, N. Linjala, O. Jutila, E. Koponen, K. & Reinikainen, M. 2024. Selvitys hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön kansallisesta ilmasto- ja talouspotentiaalista. VTT Asiakasraportti, no. VTT-CR-00468-24. Teknologiateollisuus ry. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 26.9.2024]. Saatavilla: https://teknologiateollisuus.fi/wp-content/uploads/2024/09/VTT-projektiraportti_Selvitys-hiilidioksidin-talteenoton-ja-hyotykayton-potentiaalista.pdf

Neilimo, K. & Uusi-Rauva, E. 2010. Johdon laskentatoimi. 6.–10. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

Nemitallah, M. A., Habib, M. A., Badr, H. M. 2019. Oxyfuel Combustion for Clean Energy Applications. 1. painos. Cham: Springer International Publishing.

OECD. 2021. Emission trading systems. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.12.2024]. Saatavilla: <https://web-archive.oecd.org/temp/2021-07-20/213777-emissiontradingsystems.htm>

Olsson, O. Bang, C. Borchers, M. Hahn, A. Karjunen, H. Thrän, D. Tynjälä, T. 2020. Deployment of BECCS/U value chains. Technological pathways, policy options and business models. IEA Bioenergy: Task 40. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 26.9.2024]. Saatavilla:

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/06/Deployment-of-BECCS-Value-Chains-IEA-Bioenergy-Task-40.pdf>

Onarheim, K., Santos, S., Kangas, P. & Hankalin, V. 2017. Performance and cost of CCS in the pulp and paper industry part 2: Economic feasibility of amine-based post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 66. s. 60-75.

Panja, P., McPherson, B. & Deo, M. 2022. Techno-Economic Analysis of Amine-based CO₂ Capture Technology: Hunter Plant Case Study. *Carbon Capture Science & Technology*. Volume 3. 100041.

Puolamäki, E. & Ruusunen, P. 2009. Strategiset Investoinnit: Johtaminen, prosessit ja talouden ohjaus. Helsinki: Tietosanoma Oy.

Raiko, R. et al. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit.

Rejlers Finland Oy. 2021. Methanation plant – Meri-Pori. Pre-Study. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.2.2025]. Saatavilla: https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/final-report_rev2.pdf

Romeo, L., Bolea, I. & Escosa, J. 2008. Integration of power plant and amine scrubbing to reduce CO₂ capture costs. *Applied Thermal Engineering*. Volume 28. s. 1039–1046.

Savon Voima. 2023. Once. [Toimitusketjun hallintajärjestelmä]. [Viitattu 26.9.2024]. Sisäinen dokumentti.

Savon Voima. 2024a. Historiaa. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.9.2024]. Saatavilla: <https://savonvoima.fi/tietoa/savonvoima/>

Savon Voima 2024b. Vuosikatsaus 2023. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 25.9.2024]. Saatavilla: https://savonvoima.fi/wp-content/uploads/2024/04/SV_Vuosikatsaus_2023_web.pdf

Savon Voima 2024c. Tuotantolaitokset 2023. [Excel-taulukko]. [Viitattu 26.9.2024]. Sisäinen dokumentti.

Semkin, N., Ketonen, M-M., Takamäki, S., Tuominen, K., Mahlamäki, Rättö, S. & AFRY Management Consulting. 2023. Energiaintensiivisen teollisuuden vihreän siirtymän investointitarpeet ja niiden toteutumisedellytykset. Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki.

Sick, V., Stokes, G., Mason, F., Yu, Y., Van Berkel, A., Daliah, R., Gamez, O., Gee, C. & Kaushik, M. 2022. Implementing CO₂ capture and utilization at scale and speed. University of Michigan. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 25.11.2024]. Saatavilla: <https://deep-blue.lib.umich.edu/handle/2027.42/174094>

Taaleri. 2022. Taalerin sijoituskohde Joensuu Biocoal Oy rakentaa Joensuuhun torrefioitua biomassaa valmistavan bioteollisuuslaitoksen. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.2.2025] Saatavilla: <https://www.taaleri.com/ajankohtaista/taalerin-sijoituskohde-joensuu-biocoal-oy-rakentaa-joensuuhun-torrefioitua-biomassaa-valmistavan-bioteollisuuslaitoksen>

Teir, S. Arasto, A. Tsupari, E. Koljonen, T. Kärki, J. Kujanpää, L. Lehtilä, A. Nieminen, M. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCSn) soveltaminen Suomen olosuhteissa. VTT Tiedotteita - Research Notes, no. 2576, VTT Technical Research Centre of Finland. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu: 28.9.2024]. Saatavilla: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2011/T2576.pdf>

Turton, R., Bailie, R., Whiting, W., Shaeiwitz, J. & Bhattacharyya, D. 2018. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. 5th edition. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences. Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Verbist, F., Meus, J., Moncada, J. A., Valkering, P & Delarue, E. 2024. Implications of the EU ETS on the level-playing field between carbon capture storage & utilization. International Journal of Greenhouse Gas Control. Volume 136. 104165.

VTT. 2024. Outlook of CO₂ logistics in Finland for CCUS. [Raporttikooste]. [Viitattu 10.10.2024]. Saatavilla: https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2024/10/PUBLIC-SUMMARY-REPORT-CO2-LOGISTICS_Bioenergy-VTT-04-10-2024.pdf

Wang, Y., Guo, S., Qin, Y., Wang, W., Vassilev, C. H., Wei, Y. & Vassileva, C. G. Insights into chemical evolution mechanism of different biomass during torrefaction based on the properties of torrefied solid, liquid, and gaseous products. Energy. Volume 318. 134912.

World Bank Group. 2024. State and Trends of Carbon Pricing Dashboard. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.12.2024]. Saatavilla: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

World Bioenergy Association. 2018. Biomass supply chains. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 2.1.2015]. Saatavilla: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biomass%20Supply%20Chains.pdf>

Liite 1. Mahdollisuudet liiketoiminnan laajentamiseksi hiilidioksidin arvoketjussa.

	Talteenotto liiketoiminta	Jakeluliiketoiminta
Etuja	<p>Hiilidioksidimarkkinoiden luoman liiketoimintapotentiaalin hyödyntäminen</p> <p>Liiketoiminnan monipuolistaminen</p> <p>Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen kansallisella tasolla</p> <p>Yhteensopivuus Savon Voiman strategian kanssa</p> <p>Lisäarvon luominen voimalaitoksen läheisyydessä</p>	<p>Lisäarvon luonti myös voimalaitoksen ulkopuolella</p> <p>Hiilidioksidin käyttäjien parempi saavutettavuus</p> <p>Liiketoiminnan laajentaminen</p>
Riskejä	<p>Korkeat investointikustannukset</p> <p>Hiilidioksidin hinnan epävakaus</p> <p>Lopputuotemarkkinan kehittymättömyys</p> <p>Tuotantokapasiteetin vuodenaikainen vaihtelu</p> <p>Talteenoton yhteensovittaminen KL-tuotannon kanssa</p> <p>Suurten toimijoiden muodostama kilpailu</p>	<p>Hiilidioksidin korkeampi kokonaiskustannus</p> <p>Käyttäjiltä vaadittava korkeampi maksukyky</p> <p>Menetetty synergiaedut</p>
Ulkopuolisia ehtoja	<p>Hiilidioksidille muodostuva konkreettinen hinta</p> <p>Lopputuotemarkkinoiden suotuisa kehitys</p> <p>Vaihtoehtoisten talteenottoteknologioiden kehitys</p> <p>Poliittinen vakaus ja kannustimet</p>	<p>Tarve hiilidioksidille voimalaitoksen ulkopuolella</p> <p>P2X-hyödyntämiskeskittymien kehitys</p> <p>Mineralisointitekniologian kehitys</p>
Toimintamahdollisuuksia	<p>Asiakkaiden tarpeiden huomiointi</p> <p>Yhteisinvestoinnit muiden toimijoiden kanssa ja riskin jakaminen</p> <p>Pienemmät, voimalaitosmittakaavaan sopivat hiilidioksidin käyttäjät</p> <p>Käyttäjien tuominen voimalaitoksen läheisyyteen ja synergiaetujen hyödyntäminen</p> <p>Alan edelläkävijöiden kanssa toteutettava yhteistyö lähitulevaisuudessa (e-metaani, e-metanoli)</p> <p>Talteenoton ja KL-tuotannon yhteensovittaminen lämpöpumpuilla</p> <p>Yritysklustereilla parannettava kesänajan hiilidioksidin saatavuus</p> <p>Muilta toimijoilta hankittava hiilidioksidi kesällä</p>	<p>Kunnossapitopalvelun tarjoaminen käyttäjille</p> <p>Yhteisinvestoinnit jakeluinfrastruktuuriin</p> <p>P2X-hyödyntämiskeskittymien kehityksen seuraaminen</p> <p>Toimijoiden maksukyvyyn kartoittaminen</p>