



SUOMEN
ILMASTOPANEELI
The Finnish Climate
Change Panel

TEKNOLOGISTEN HIILINIELUJEN MAHDOLLISUUDET JA NIIDEN
EDISTÄMINEN SUOMESSA

Lauri Kujanpää, Kati Koponen, Onni Linjala, Sampo Mäkikouri, Antti Arasto

Suomen ilmastopaneeli
Raportti 5/2023

© Suomen ilmastopaneeli



Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2023

Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa

Tekijät:

Lauri Kujanpää, Kati Koponen, Onni Linjala, Sampo Mäkikouri ja Antti Arasto

ISSN: 2737-0666

ISBN: 978-952-7457-28-3

DOI: [lisätään myöhemmin]

Viittausohje:

Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Mäkikouri, S., Arasto, A. 2023. Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2023.

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia hallituksen ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä otetta ilmastotieteissä. Ilmastopaneelin selvitykset ja kannanotot tehdään tieteellisin perustein.

info@ilmastopaneeli.fi

www.ilmastopaneeli.fi

[X](#) @Ilmastopaneeli1

SISÄLLYS

ILMASTOPANEELIN ESIPUHE JA KESKEISET VIESTIT	IV
TIIVISTELMÄ	VII
SUMMARY	VIII
SAMMANDRAG	IX
ALKUSANAT	X
1. JOHDANTO	1
1.1. Taustaa	1
1.2. Teknologisten hiilinielujen näkymät Suomessa	2
1.3. Tavoite ja rajaukset	2
2. BIOPERÄISEN HIILIDIOKSIDIN TEOLLISET LÄHTEET SUOMESSA	4
3. HIILIDIOKSIDIN KÄYTTÖKOHTEET JA VARASTOINNIN NÄKYMÄT	6
3.1. Hiilidioksidin hyötykäyttö synteettisten polttoaineiden valmistukseen	6
3.2. Geologisen varastoinnin näkymät Pohjois-Euroopassa.....	7
3.2.1. Hiilidioksidin varastointihankkeiden kehitys vuoteen 2035 mennessä	9
3.2.2. Keskeisimmät hankkeet vapaan varastokapasiteetin kannalta	10
4. TEKNOLOGISTEN HIILINIELUJEN KUSTANNUKSET JA KANNATTAVUUS	11
4.1. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannukset	11
4.1.1. Hiilidioksidin talteenoton kustannus	11
4.1.2. Hiilidioksidin paineistuksen kustannus	13
4.1.3. Kuljetus- ja varastointikustannukset	14
4.1.4. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin rajakustannukset Suomen teollisissa päästölähteissä	16
4.2. Teknologisten hiilinielujen ja hiilidioksidin hyötykäytön kannattavuus valituissa tapaustarkasteluissa	20
4.2.1. Talteenotto, kuljetus ja varastointi suurista laitoksista rannikolla ja sisämaassa	21
4.2.2. Hiilidioksidin talteenotto ja jalostus synteettiseksi polttoaineeksi	23
4.3. Soveltuvimmat hiilidioksidin lähteet teknologisille nieluille	24
5. TUKIMEKANISMIT TEKNOLOGISILLE HIILINIELUILLE	26
5.1. Ruotsin malli käänteisestä huutokaupasta BECCS hankkeille	26
5.1.1. Taustaa	26
5.1.2. Huutokauppaan osallistuvat hankkeet	27
5.2. Käänteisen huutokaupan tai vastaavan tukimekanismin soveltuvuus Suomeen	28
5.2.1. Soveltuvuus Suomeen	28
5.2.2. Kuvitteellinen erimerkki toteutusaikataulusta	30
5.2.3. Aiemmat tarjouskilpailumallit Suomessa	31
6. TULOSTEN TARKASTELU	32
6.1. Teknologisten hiilinielujen kustannukset	32
6.2. Varastokapasiteetti	33
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	37
7.1. Bio-CO ₂ :n talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannukset sekä potentiaali Suomessa	37
7.2. Bio-CO ₂ :n hyötykäytön ja varastoinnin näkymät	38

7.3. Bio-CO ₂ :n talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kannattavuus	39
7.4. Teknologisten hiilinielujen tukimekanismit	39
LÄHTEET	40
LIITE 1. SUOMEN PÄÄSTÖREKISTERIIN KUULUVIEN LAITOSTEN CO₂-PÄÄSTÖT.....	45

ILMASTOPANEELIN ESIPUHE JA KESKEISET VIESTIT

Teknologiaan hiilinieluihin liittyy paljon kiinnostusta ja myös taloudellisia mahdollisuuksia. Ilmastopaneeli on tuottanut ilmastopolitiikan ja alan toimijoiden suunnittelun tueksi tämän raportin yhteistyössä VTT:n asiantuntijoiden kanssa nojaten heidän vahvaan asiantuntemukseensa. Raportissa käsitellään hiilidioksidin poistoa ja negatiivisten päästöjen tuottamista teollisen kokoluokan biogeenisistä savukaasuvirroista sekä keskustellaan myös hiilidioksidin hyötykäytöstä ja sen kustannuksista. Muut tavat, esimerkiksi biohiilen tuottaminen, ansaitsevat jatkossa oman tarkastelunsa.

Raportin tulosten nojalla Ilmastopaneeli korostaa seuraavaa.

Pariisin ilmastopöytäkirjassa sovittiin, että maapallon keskilämpötilan nousu rajataan selvästi alle kahden asteen pyrkien toimiin, joilla päästäisiin 1,5 asteen tavoitteeseen. Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin IPCC:n 1,5 asteen raportin mukaan ilmastomuutoksen haitat jäävät merkittävästi pienemmiksi, jos lämpeneminen rajoitetaan 1,5 asteeseen. Tämä tavoite on sittemmin omaksuttu lukuisten maiden ja myös EU:n ilmastotyön lähtökohdaksi. IPCC on viimeisimmässä päästövähennyksiä käsitelleessä raportissaan (IPCC AR6, WG3, 2022) tuonut esille tarpeen dramaattisille ja välittömille päästövähennystoimille, jotta 1,5 asteen lämpenemistavoitteen saavuttaminen on mahdollista. Tämä edellyttää, että kuluvan vuosisadan puolivälissä ihmisen aikaansaamat hiilidioksidipäästöt ja -poistumat ovat yhtä suuret. Tämän jälkeen, vuosisadan jälkipuoliskolla, poistumien tulisi olla päästöjä suuremmat (IPCC 2022). Täten fossiilisten ja prosessipäästöjen vähentämisen lisäksi tarvitaan negatiivisia päästöjä, joita voidaan tuottaa poistamalla hiilidioksidia ilmasta joko luonnon nielua voimistamalla tai teknologisin keinoin. Kun hiilidioksidia poistetaan ilmakehästä pysyvästi teknologisin keinoin, puhutaan teknologisista hiilinieluista.

Kuten raportissa todetaan, teknologisilla hiilinieluilla voidaan viitata useaan eri teknologiaan pohjautuvaan keinoon poistaa hiilidioksidia ilmakehästä pysyvästi. Näistä Suomen kannalta keskipitkällä aikavälillä varteenotettavin vaihtoehto niin päästövähennysten mittakaavan kuin teknisen toteutettavuuden näkökulmasta, on bioperäisen hiilidioksidin talteenotto kestävästi tuotetun metsä- tai muun biomassan poltosta, yhdistettynä hiilidioksidin varastointiin geologisesti tai mineraaleihin sitouttamalla (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS). Biomassa on kasvaessaan sitonut ilmakehästä hiilidioksidia, joka vapautuu biomassaa poltettaessa. Kun biomassan poltossa vapautuva bioperäinen hiilidioksidi otetaan polton savukaasuista talteen, nesteytetään ja kuljetetaan sijoitettavaksi pysyviin varastoihin, esimerkiksi merenalaisiin geologisiin muodostumiin, voidaan biologisessa kierrossa olevaa hiiltä poistaa pysyvästi ilmakehästä ja saavuttaa negatiivisia päästöjä. Talteen otettua hiilidioksidia on mahdollista myös hyötykäyttää erilaisiin tuotteisiin. Lyhytikäiset tuotteet eivät kuitenkaan voi toimia teknologisina hiilinieluinä, sillä hiilidioksidi vapautuu niistä nopeasti takaisin ilmakehään. Niiden synnyttämä ilmastohyöty perustuu fossiilisten resurssien käyttämättä jättämiseen. Fossiilisista polttoaineista vapautuvan hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin avulla ei myöskään voida tuottaa teknologisia hiilinieluja, sillä tällöin ei poisteta hiilidioksidia ilmakehästä, ainoastaan estetään sen pääsy sinne.

Kaikkeen hiilidioksidin poistoon liittyy erilaisia riskejä ja epävarmuuksia, joiden takia on tärkeää vahvistaa ja edistää sekä luonnon että teknologisia hiilinieluja. Luonnonnielujen osalta epävarmuutena on nielun pysyvyys ilmastomuutoksen edetessä. BECCS tuottaa oletusarvoisesti pysyvää hiilinielua, mutta hiilidioksidivaraston vuotoriskin mahdollisuutta ei voida sulkea kokonaan pois. BECCS-teknologiassa käytettävän bioperäisen hiilidioksidin lähteenä olevan biomassan alkuperään, kestävytyteen ja kilpaileviin käyttötarkoituksiin tulee kiinnittää myös huomiota.

Keskeisiä johtopäätöksiä ilmastopolitikan suunnittelun ja toteuttamisen kannalta:

Lähtökohdat BECCS-tekniikkaan perustuvilla hiilinielulla Suomessa:

- Suomessa syntyy nykyisin vuosittain noin 28 Mt bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä. Bioperäisen hiilidioksidin lähteistä merkittävimmät ovat metsäteollisuus (19,6 Mt_{bio}), lämpövoimalaitokset ja muut polttolaitokset (8,0 Mt_{bio}) sekä jätteenpolto (0,6 Mt_{bio}). Oletettavissa oleva teknis-taloudellinen potentiaali on kuitenkin merkittävästi tätä alhaisempi.
- Suomessa ei ole hiilidioksidin pysyvään varastointiin soveltuvia geologisia muodostumia, kuten syvällä sijaitsevia suolavesikerrostumia tai tiiviin kerroksen sulkemaa huokoista kallioperää. Potentiaalisimmat varastoalueet löytyvät todennäköisesti Pohjanmeren alueelta. Varastoitava hiilidioksidi pitäisi näin ollen kuljettaa ensin satamaan, josta hiilidioksidi kuljetetaan laivakuljetuksena joko suoraan varastoalueelle tai vastaanottavaan satamaan, josta on putkiyhteys varastoalueeseen.

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kustannukset:

- Suomen teollisista päästölähteistä saatavan hiilinielun yksikkökustannus vaihtelee talteenotto-kohteesta riippuen nykyarvion mukaan noin 120–240 €/tCO₂ kaupallisella laitoksella vuoden 2030 tienoilla. Hiilidioksidin geologiseen varastointiin perustuvien teknologioiden hiilinielujen kustannus kattaa hiilidioksidin talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin. Raportissa esitettävät kustannusarviot sisältävät epätarkkuuksia ja niiden tarkoitus on olla vain suuntaa antavia.
- Raportin analyysin perusteella päästövähennysten kannalta biogeenisen hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin ominaispäästövähennyskustannus on alhaisempi kuin hiilidioksidin talteenoton ja hyötykäytön kustannus esimerkiksi synteettisten polttoaineiden valmistamisessa.
- Hyötykäytön kannattavuuteen yritystoiminnassa vaikuttaa kuitenkin myös tuotettavasta hyödykkeestä saatava hinta. Se riippuu hyödykkeen kysynnästä, jota ajaa lähinnä ilmastopolitiikan tiukkuus eri käyttösektoreilla eli hiilidioksidiekvivalenttipäästöjen hinta.

Strategian ja kannustimien luominen hiilidioksidin talteenoton, varastoinnin ja hyötykäytön edistämiseksi on kiireellistä.

- Geologisen varastokapasiteetin rajoitettu määrä voi muodostaa merkittävän pullonkaulan, jonka poistamiseksi Suomessa tulee alkaa valmistella huomattavasti aktiivisemmin hiilidioksidin talteenotto- ja varastointihankkeita. Suomalaisia toimijoita ja teknologioiden hiilinielujen toteuttamista hyödyttää, jos valtion tasolla tehdään strategisia avauksia ja yhdistettäisiin hajanaisia toimia yhdeksi rintamaksi.
- Suomessa ei ole tällä hetkellä suoraa taloudellista kannustimia teknologioiden hiilinielujen tuottamiseksi vapaaehtoisia päästömarkkinoita lukuun ottamatta. Käänteisen huutokaupan (tarjouskilpailu) tai muun taloudellisen kannustinmekanismin selvitystyö tulisi käynnistää pian, jos hankkeita halutaan toteuttaa 2030-luvun alkupuolella.
- Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin hankekehityksen suunnitelmiseen, luvituksineen ja rakennus- sekä käyttöönotto- vaiheeseen on arvioitu vievän vähintään 6–7 vuotta. Hankkeita pitäisi käynnistää nopeasti pitkän valmisteluajan vuoksi.

Teknologioiden nielujen teknologian kehitykseen, kustannuksiin ja niitä koskevaan politiikkaan liittyy paljon epävarmuuksia.

- Biogeenisen hiilidioksidin arvioissa potentiaalisessa määrässä pääosaa näyttelee metsäteollisuuden polttama biomassa. Niukkuus biomassasta kasvaa samalla, kun mahdollisuudet tuottaa erilaisista sivujakeista uusia tuotteita polttamisen sijaan lisääntyvät. Metsäteollisuuden tulevat valinnat vaikuttavat merkittävästi biogeenisen hiilidioksidin potentiaalinielujen kehitykseen.
- Raportoidut kustannukset ovat arvioita demonstraatio- vaiheen jälkeisistä kustannuksista. Niihin sisältyy paljon epävarmuutta. Teknologian ja osaamisen kehitys voi olla nopeampaa tai hitaampaa.

- Raportoitujen kustannusten alaraja vuonna 2030 on lähellä taakanjakosektorille nyt arvioitujen päästövähennyskustannusten tasoa. Merkille pantavaa on, että kustannukset ylittävät selvästi maankäyttösektorin edullisimpien toimien päästövähennyskustannukset (kuten entisten turpeenottoalueiden vettäminen). Jo tunnistetut ilmastotoimet ovat siis tänään selvästi edullisempia kuin teknologisten nielujen tuottaminen tulevaisuudessa.

Teknologiset nielut tarjoavat lisäkeinon Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamiseen vuoden 2030 jälkeen, mutta ne eivät saa syrjäyttää tai hidastaa muita ilmastotoimia.

- Suomi on jäämässä pahasti jälkeen EU:n vuoden 2030 tavoitteista taakanjako- ja maankäyttösektoreille. Niiden saavuttamiseksi tarvitaan jo tunnistettujen toimien merkittävää tehostamista. Teknologisista nieluista ei saada apua näiden tavoitteiden saavuttamiseen.
- Ilmastotoimien tehostaminen on tarpeen myös Suomen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi. Tämäkin tavoite voidaan saavuttaa erittäin määrätietoisilla ja tehostetuilla ilmastotoimilla taakanjako- ja maankäyttösektoreilla, mutta toimiin on ryhdyttävä heti.
- Kuten Ilmastopaneelin Suuntaviivoja Suomen ilmastotoimien tehostamiseen -muistiossa (2023) tunnistettiin, ilmastolain mukaisen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisen varmistamiseksi ja sen jälkeistä nettonegatiivisuutta ajatellen Suomen olisi hyödyllistä tuottaa 5–6 Mt negatiivisia päästöjä tarjouskilpailun tai muiden ohjauskeinojen avulla.
- Raportissa todetaan että, Suomen 2–3 eniten bioperäistä hiilidioksidia tuottavan laitoksen hiilidioksidi riittäisi talteen otettuna ja varastoituna tuottamaan noin 5 Mt teknologisen hiilinielun. Laitokset ovat sellu-, paperi- ja biotuotetehtaita. Jos kansallinen operatiivinen tuki kattaisi koko hiilidioksidin talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksen, 5 MtCO₂-suuruisen teknologisen hiilinielun rahoittaminen vaatisi 605–705 M€/vuosi.

Suomen ilmastopaneeli 12.12.2023.

TIIVISTELMÄ

Tässä selvityksessä on tarkasteltu teknologisten hiilinielujen potentiaalia, kustannuksia ja realistista kokoluokkaa Suomessa keskipitkällä aikavälillä aiempaa julkista kirjallisuutta tarkemmin. Teknologisilla hiilinieluilla voidaan viitata useaan eri teknologiaan pohjautuvaan keinoon poistaa hiilidioksidia pysyvästi ilmakehästä. Työ on rajattu koskemaan ainoastaan bioperäisen hiilidioksidin talteenottoa ja geologista varastointia energiantuotannosta ja teollisista laitoksista Suomessa. Rajauksen taustalla on oletus, että kyseisillä keinoilla voidaan Suomessa saavuttaa suurin teknologinen nielu keskipitkällä aikavälillä.

Selvityksessä on koostettu ajantasainen tieto kokonaisuutensa yli 0,1 MtCO₂/vuosi suuruista bioperäistä hiilidioksidia päästävistä laitoksista Suomessa sekä laskettu laitospohjaiset kustannukset hiilidioksidin talteenottoon, kuljetukselle ja varastoinnille Pohjanmeren alueelle. Lisäksi hiilidioksidin geologisen varastokapasiteetin näkymiä on tarkasteltu julkisten hankkeiden osalta ja näin ennakoitu mahdollisesti vapaan kapasiteetin määrää Suomen teknologisille nieluille. Työssä tarkasteltiin myös käänteistä huutokauppaa, eli tarjouskilpailua, mahdollisena tukimekanismina teknologisille hiilinieluille, joiden tuottamiseksi ei Suomessa ole tällä hetkellä suoraa taloudellista kannustimia, lukuun ottamatta vapaaehtoisia päästömarkkinoita.

Laitosten yhteenlaskettu bioperäinen päästö on n. 28 MtCO₂/vuosi. Yhdeksässä laitoksessa bioperäiset hiilidioksidipäästöt ovat suuruudeltaan yli 1,0 MtCO₂/vuosi, jolloin mittakaavaedut laskevat teknologisen nielen kustannuksia. Kyseisistä suuremmista laitoksista voitaisiin talteenottaa yhteensä 7,3 MtCO₂/vuosi bioperäistä hiilidioksidia rannikolta ja 8,4 MtCO₂/vuosi sisämaasta. Hiilinielun tuottamisen yksikkökustannus Suomen teollisista päästölähteistä vaihtelee välillä n. 120–240 €/tCO₂ tapauskohtaisesti. Kustannukset ovat edullisimpia suurista rannikolla sijaitsevista laitoksista. Kustannuksiltaan edullisimmat laitokset ovatkin pitkälti valmistavan teollisuuden laitoksia, joissa suuri laitospäästö on tuotannon mittakaavaedun takia yleistä. Bioperäisten laitosten osalta erityisesti metsäteollisuus korostuu edullisimpien laitosten joukossa. Pienten laitosten osalta kustannuksia alentaisi merkittävästi kuljetusinfrastruktuurin jakaminen muiden laitosten kanssa.

Hiilidioksidin varastokapasiteettia alkaa nykytiedon valossa olla merkittävästi tarjolla kilpailtavaksi vuodesta 2030 alkaen. Julkisten lähteiden varastohankekartoitusten perusteella vapaata varastokapasiteettia Pohjois-Euroopassa on tuolloin odotettavissa noin 10 MtCO₂/vuosi, joskin viimeisimmät Tanskasta julkaistut hankesuunnitelmat voivat kasvattaa arviota vapaasta varastokapasiteetista. Varastokapasiteetti voi asettaa merkittävän rajoitteen Suomen teknologisille nieluille tarkasteluajakaksolla vuoteen 2035 asti, ellei tapahdu merkittävää lisäystä neuvottelu- ja hankevalmisteluaktiivisuudessa.

Käänteisen huutokaupan tai muun tukimekanismin selvitystyö tulisi käynnistää pian, jos hankkeita halutaan toteuttaa 2030-luvun alkupuolella. Suomessa on useita laitoksia, jotka potentiaalisesti voisivat osallistua tarjouskilpailuun ja joissa teknologisen nielen toteuttamisen alustavat kustannusarviot vaihtelevat välillä 120–150 €/tCO₂. Toteutuvien hintapyyntöjen suuruutta ja siten tarvittavaa budjettia on vaikea arvioida, sillä teknologian sekä hiilidioksidin kuljetus- ja varastointiketjun toimivuudesta ja kustannuksista ei ole vielä kokemuksia.

SUMMARY

This study examines more closely the potential, costs, and realistic scale of technological carbon sinks in Finland over the medium term than in previous publicly available literature. Technological carbon sinks can refer to various technologies aimed at permanently removing carbon dioxide from the atmosphere. This study looks solely at the capture and geological storage of biogenic carbon dioxide from energy production and industrial facilities in Finland. This selection is based on the assumption that these methods can achieve the largest technological sink in Finland over the medium term.

Up-to-date information has been compiled on biogenic carbon dioxide-emitting facilities in Finland, whose total emissions exceed 0.1 MtCO₂ per year per facility. The facility-specific costs for carbon dioxide capture, transportation, and storage to the North Sea region have been calculated. Additionally, the prospects of geological storage capacity in Northern Europe have been examined based on public projects, anticipating the potential amount of available capacity for Finland's technological sinks. This study also explores reverse auctions, or competitive bidding, as a possible support mechanism for technological carbon sinks, which currently lack direct economic incentives in Finland, except for units produced for voluntary carbon markets.

The combined biogenic emissions from these facilities are approximately 28 MtCO₂ per year. Biogenic carbon dioxide emissions exceed 1.0 MtCO₂ per year in nine facilities, resulting in cost reductions for producing technological sinks due to economies of scale. From these larger facilities, a total of 7.3 MtCO₂ per year could be captured from facilities on the coast, and 8.4 MtCO₂ per year from facilities inland. The unit cost of producing carbon sinks from Finland's industrial emission sources varies between approximately €120–240/tCO₂ on a case-by-case basis. Costs are lowest for large facilities located on the coast. The most cost-effective facilities are often those in manufacturing industries where larger facility sizes are common due to economies of scale in production. The forest industry stands out among the most cost-effective source of biogenic CO₂. For small facilities, costs could be significantly reduced by sharing transportation infrastructure with other facilities.

Based on current knowledge, a significant amount of carbon dioxide storage capacity is expected to be available on the market from 2030 onwards. Based on public sources of storage project assessments, free storage capacity in Northern Europe is expected to be around 10 MtCO₂ per year at that time, although the latest project plans from Denmark may increase the estimate of available storage capacity. Storage capacity could pose a significant constraint on Finland's technological sinks during the study period until 2035 unless there is a significant increase in negotiation and project preparation activity.

An investigation into reverse auctions or other support mechanisms should be initiated soon if projects are to be implemented in the early 2030s. In Finland, there are several facilities that could potentially participate in the bidding process, with preliminary cost estimates for implementing technological sinks ranging from €120 to €150/tCO₂. The actual bids and thus the required budget is difficult to estimate, as there is yet insufficient experience with the operation and costs of the technology and the whole carbon dioxide transport and storage value chain.

SAMMANDRAG

I den här utredningen undersöks potentialen, kostnaderna och den realistiska storleksordningen för tekniska kolsänkor i Finland på medellång sikt mer ingående än i tidigare publicerad offentlig litteratur. Tekniska kolsänkor kan avse ett antal olika teknikbaserade metoder för att permanent avlägsna koldioxid från atmosfären. Utredningen har avgränsats till upptagningen av biobaserad koldioxid och geologisk lagring av biobaserad koldioxid från energiproduktion och industrianläggningar i Finland. Avgränsningen bygger på antagandet att de här metoderna lämpar sig bäst för att Finland ska kunna öka omfattningen av de tekniska kolsänkorna på medellång sikt.

Utredningen innehåller aktuell information om anläggningar i Finland vars totala utsläpp överstiger 0,1 MtCO₂ per år, och beräknade kostnader per anläggning för avskiljning, transport och lagring av koldioxid vid Nordsjön. Utsikterna för den geologiska koldioxidlagringskapaciteten för offentliga projekt analyseras, i syfte att förutse mängden potentiellt tillgänglig kapacitet för tekniska kolsänkor i Finland. Även omvänd auktionering, dvs. budgivning, granskas som en möjlig stödmekanism för tekniska kolsänkor. För närvarande finns det inga direkta ekonomiska incitament i Finland för tekniska kolsänkor, bortsett från den frivilliga utsläppsmarknaden.

Anläggningarnas sammanlagda biobaserade utsläpp uppgår till cirka 28 MtCO₂ per år. Nio av anläggningarna släpper ut över 1,0 MtCO₂ biobaserad koldioxid per år, varvid stordriftsfördelarna sänker kostnaden för en teknisk kolsänka. Totalt kan dessa större anläggningar avskilja 7,3 MtCO₂ biobaserad koldioxid per år vid kusten och 8,4 MtCO₂/år i inlandet. Enhetskostnaden för en kolsänka från industriella utsläppskällor i Finland varierar mellan cirka 120–240 €/tCO₂. Kostnaderna är lägst för stora anläggningar som ligger vid kusten. De kostnadsmässiga fördelarna är framför allt störst inom tillverkningsindustrin, där stora anläggningar är vanliga på grund av stordriftsfördelar inom produktionen. När det gäller biobaserade anläggningar är det främst skogsindustrin som utmärker sig bland de fördelaktigaste anläggningarna. Bland små anläggningar skulle en gemensam transportinfrastruktur med andra anläggningar minska kostnaderna betydligt.

Mot bakgrund av nuvarande kunskap kommer det att finnas en betydande mängd koldioxidlagringskapacitet som är tillgänglig för konkurrens från och med 2030. Offentligt tillgängliga utredningar för lagringsprojekt visar att den lediga lagringskapaciteten i Nordeuropa torde uppgå till cirka 10 MtCO₂ per år vid den tidpunkten, även om de senaste projektplanerna som publicerats i Danmark kan öka den beräknade tillgängliga lagringskapaciteten. Lagringskapaciteten kan bli en betydande begränsande faktor för Finlands tekniska sänkor fram till 2035, om inte aktiviteten ökar i fråga om förhandlingar och projektberedningar.

Utredningsarbetet för omvända auktioner eller andra stödmekanismer bör inledas inom kort om projekten ska kunna genomföras i början av 2030-talet. Det finns flera anläggningar i Finland som potentiellt skulle kunna delta i ett anbudsfordfarande och där kostnadsberäkningen för att genomföra en teknisk kolsänka varierar mellan 120–150 €/tCO₂. Offerter och därmed budgetar är svåra att räkna ut eftersom det ännu inte finns någon erfarenhet av tekniken eller av driften och kostnaderna för transport- och lagringskedjan för koldioxid.

ALKUSANAT

Suomen ilmastotavoitteita koskevien suositustensa pohjaksi Ilmastopaneeli on koostanut lisää tutkimustietoa teknologisten hiilinielujen tarkemmasta, realistisesta käyttöönottopotentiaalista, aikatauluista ja kustannuksista Suomessa. Tämän raportin tarkoituksena on antaa aiempaa tarkempaa tietoa teollisuuden bioperäisten hiilidioksidinpäästöjen talteenottoon perustuvista teknologisista nieluista.

Selvitys on tehty Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n tutkijaryhmän toimesta Ilmastopaneelin avustuksella. Työn vastaavana Ilmastopaneelin jäsenenä on toiminut Antti Arasto.

Tekijät

15.12.2023

1. JOHDANTO

1.1. Taustaa

Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC on viimeisimmässä raportissaan (IPCC AR6, WG3, 2022) tuonut esille tarpeen dramaattisille ja välittömille päästövähennystoimille, jotta globaalin keskilämpötilan nousun rajaaminen 1,5 asteeseen olisi mahdollista. IPCC:n 1,5 asteen päästövähennysskenaarioiden mukaisesti ihmisen aikaansaamien hiilidioksidipäästöjen ja -poistumien tulee olla yhtä suuret kuluvan vuosisadan puolivälissä ja vuosisadan jälkipuoliskolla poistumien tulisi olla päästöjä suuremmat (IPCC 2022). Hiilidioksidin poistolla ilmakehästä voidaan kompensoida niitä päästöjä, joita on muilla keinoilla hyvin vaikeaa tai kallista vähentää, sekä palauttaa ilmasto 1,5 asteen lämpenemisuralle, jos hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on väliaikaisesti noussut liian korkealle tasolle (overshoot) (IPCC 2022). Hiilidioksidia voidaan poistaa ilmakehästä lisäämällä ja vahvistamalla luonnon, kuten metsien ja maaperän, hiilinieluja, sekä toisaalta teknologisin keinoin poistamalla hiilidioksidia ilmakehästä ja varastoimalla se pysyviin varastoihin. Näitä keinoja kutsutaan teknologisiksi hiilinieluiksi.

Teknologisilla hiilinieluilla voidaan viitata useaan eri teknologiaan pohjautuvaan keinoon poistaa hiilidioksidia pysyvästi ilmakehästä. Näistä keskeisenä vaihtoehtona on bioperäisen hiilidioksidin talteenotto kestävästi tuotetun metsä- tai muun biomassan poltosta, yhdistettynä hiilidioksidin varastointiin geologisesti tai mineraaleihin sitouttamalla (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS). Biomassa on kasvaessaan sitonut ilmakehästä hiilidioksidia, joka poltosta talteenotettuna ja varastoituna saa aikaan niin kutsutun negatiivisen päästön. Vastaavasti, hiilidioksidia voidaan poistaa suoraan ilmasta talteenottamalla ja samoin keinoin varastoimalla (direct air capture and storage, DACCS). Kolmas merkittävä teknologiaan pohjautuva hiilidioksidin poistokeino on biomassan muuntaminen esimerkiksi pyrolyysin kautta biohiileksi. Biohiilen raaka-aineina voidaan käyttää jäte- ja sivuvirtoja, ja tuotetta voidaan käyttää esimerkiksi maatalouden maanparannusaineena, jolla on viljelyyn monia hyviä ominaisuuksia.

Hiilidioksidin geologista varastointia syvällä maankuoressa sijaitseviin hiekkakiven ja suolaveden muodostelmiin ja ehtyneisiin öljy- ja kaasuesiintymiin sekä mineralisointia kiviaineiksi pidetään pysyvinä hiilivarastoina, ja menetelmät ovat sallittuja osana fossiilisen hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (carbon capture and storage, CCS) EU:n päästökaupassa. Hiilidioksidin geologista varastointia säädellään EU-tasolla CCS-direktiivillä (EU 2009), jonka tavoitteena on edistää kuljetuksen sekä varastoinnin turvallisuutta sekä muun muassa selvittää vastuita varastojen valvonnasta ja toimista poikkeustilanteissa. Hiilivarastona biohiilen pysyvyys riippuu muun muassa aineen kemiallisista ominaisuuksista, kuten vedyn ja hapen määrästä suhteessa orgaaniseen hiileen. Biohiilen edellä mainittuihin kemiallisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa tuotantoprosessilla (Rodrigues ym. 2023).

Edellä mainituin tavoin ilmakehästä poistettua hiilidioksidia on mahdollista myös hyötykäyttää esimerkiksi synteettisten polttoaineiden valmistukseen tai varastoida lyhyt- tai pitkäikäisiin tuotteisiin, kuten muoveihin (carbon capture and utilisation, CCU). Synteettiset polttoaineet tai muut lyhytikäiset tuotteet eivät kuitenkaan voi toimia teknologisina hiilinieluinä, sillä hiilidioksidi vapautuu niistä nopeasti takaisin ilmakehään. Sen sijaan ne voivat tuottaa päästövähennyshyötyjä, mikäli tuotteiden elinkaariset päästöt ovat matalammat kuin niiden vertailutuotteilla.

Fossiilisen hiilidioksidin talteenotto ja varastointi ei tuota teknologisia hiilinieluja, sillä se ei poista ilmakehästä hiilidioksidia, vaan ainoastaan estää hiilidioksidin pääsyn ilmakehään. Fossiilisen hiilidioksidin talteenotto on kuitenkin yksi tärkeä ilmastomuutoksen hillintäkeino esimerkiksi niille teollisuuden prosesseille, joissa fossiilisten päästöjen vähentäminen on muuten teknisesti hyvin vaikeaa tai kallista. Sen sijaan fossiilisen hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin ei tule toimia keinona pidentää nojaamista fossiilisiin polttoaineisiin.

1.2. Teknologisten hiilinielujen näkymät Suomessa

Suomen maankäyttösektorin hiilinielu on laskenut viimeisten vuosien ajan merkittävästi metsien hiilinielun pienentymisen vuoksi (Ilmastovuosikertomus 2023). Siksi päästöjä on vähennettävä yhä tehokkaammin, ja luonnon hiilinieluja vahvistettava erilaisin toimin. Ilmastopaneelin muistiossa (Suomen ilmastopaneeli 2023) todetaan, että nettohiilinielua on kasvatettava noin 19 Mt vuoteen 2035 verrattuna vuoden 2021 tasoon. Toimia hiilinielun kasvattamiseksi on tunnistettu esimerkiksi maankäyttösektorin ilmastosuunnitelmassa (MISU). Näiden toimien jälkeenkin kuilu nielutavoitteeseen on kuitenkin yhä merkittävä, Ilmastopaneelin arvion mukaan noin 8 Mt. Tämän kuilun kattamiseksi tarvitaan toimenpiteitä, kuten maaperäpäästöjen vähentämistä, metsäkadon minimoimista tai hakkuutapojen muutoksia, ja/tai muita nettohiilinielua vahvistavia toimia. Lisäksi hiilinieluja voidaan vahvistaa ottamalla käyttöön teknologisia hiilinieluja.

Valtioneuvoston kanslian rahoittamassa CURPP-hankkeessa (Kujanpää ym. 2023) tarkasteltiin teknologisten nielujen potentiaalia Suomessa osana laajempaa hiilidioksidin käytön ja poiston mahdollisuuksien selvitystä. Selvityksessä todettiin Suomen merkittävä potentiaali teknologisiin hiilinieluihin erityisesti teollisuuslaitosten bioperäisiin päästöihin perustuen. Selvitys kartoitti alustavasti toteutuneisiin päästöihin perustuen noin 7–9 Mt metsäteollisuuden bioperäisiä päästöjä ja lisäksi muita bioperäisiä päästöjä noin 2–3 Mt rannikkoalueilta, joista päästöt voitaisiin keskipitkällä aikavälillä kuljettaa syväsatamista meriteitse geologisesti varastoitavaksi. Lisäksi suositeltiin kansallista strategiaa hiilidioksidin käytölle ja poistolle sekä jatkoselvitystä teknologisilta nieluilta puuttuvan kannustinpolitiikan toimenpiteistä.

Teknologisten hiilinielujen toteuttamiseen ei tällä hetkellä ole suoria taloudellisia kannustimia Suomessa, lukuun ottamatta vapaaehtoisia päästömarkkinoita (Laine ym. 2023, Laininen ym. 2022). Teknologisista hiilinieluista ei myöskään tällä hetkellä saa suoraan rahallista hyötyä EU:n päästökaupassa, eikä niille ole toistaiseksi luotu muita EU:n laajuisia tukijärjestelmiä (lukuun ottamatta joitakin myönnettyjä investointitukia). EU:n ETS-direktiivissä (2023/959) todetaan, että Euroopan komission tulee vuoden 2026 heinäkuun loppuun mennessä raportoida Euroopan parlamentille ja neuvostolle siitä, miten "ilmakehästä poistettavien ja turvallisesti ja pysyvästi varastoitavien kasvihuonekaasujen aikaansaamat negatiiviset päästöt" voitaisiin ottaa huomioon päästökaupassa. Lisäksi Euroopan komissio selvittää parhaillaan vapaaehtoisia sertifiointijärjestelmiä hiilidioksidin poistomekanismeille (EC 2022). Komission julkisessa konsultaatiossa EU:n 2040 ilmastopolitiikasta suurin osa (54 %) vastaajista näki, että teknologisille hiilinieluille tulisi asettaa erillinen tavoite vuodelle 2040, päästövähennystavoitteen ja LULUCF-sektorin tavoitteen lisäksi (EC 2023a). Teknologisten hiilinielujen toteuttamista EU:ssa voi nopeuttaa myös komission ehdottama Net-Zero Industry Act, jossa tavoitellaan hiilidioksidin geologisen varastoinnin kapasiteetin nostoa 50 Mt vuosittain vuodesta 2030 alkaen (EC 2023b). Vuoden 2030 jälkeinen ilmastopolitiikkaa koskeva sääntely ja tavoitteet EU:ssa ovat toistaiseksi kuitenkin aivan auki. Komission odotetaan vuoden 2024 alkupuoliskolla esittävän tiedonannon 2040 ilmastotavoitteista, ja neuvottelut vuoden 2030 jälkeistä aikaa koskevan lainsäädännön osalta käynnistyvät myöhemmin.

Suomessa Petteri Orpon hallituksen ohjelmaan (Valtioneuvosto 2023) on kirjattu, että teknologisten hiilinielujen käyttöönottoa ja investointeja tuetaan ja tukijärjestelmiä selvitetään. Selvityksen pohjalta otetaan käyttöön "negatiivisten päästöjen huutokauppa tai vastaava mekanismi".

1.3. Tavoite ja rajaukset

Tässä selvityksessä tuotetaan tarkennettua tietoa teknologisten hiilinielujen realistisesta käyttöönottopotentiaalista, aikatauluista ja kustannuksista Suomessa. Selvitys keskittyy bioperäisen hiilidioksidin teollisiin lähteisiin ja BECCS-teknoologiaan, ja esimerkiksi biohiili sinänsä käyttökelpoisena, mutta

varsin erilaisena teknologiana, on rajattu selvityksen ulkopuolelle. Lisäksi selvitetään hiilidioksidin varastointimahdollisuuksien ja teknologioiden kehitys- ja käyttöönottonäkymiä Suomessa ja Suomen lähialueilla. Selvityksen tavoitteena on tukea Ilmastopaneelin työtä Suomen ilmastotavoitteita koskevien suositusten laatimiseksi.

Selvityksessä käydään läpi hiilidioksidin teolliset lähteet Suomessa uusimman tilastotiedon valossa laitoksittain, keskittyen erityisesti bioperäisiin lähteisiin. Lisäksi tarkastellaan hiilidioksidin varastointihankkeiden lähi- ja keskipitkän aikavälin kasvunäkymiä varastokapasiteetin ja projektien määrän suhteen. Toisin sanoen, varastokapasiteetin oikea-aikaisen saatavuuden riskiä käsitellään laadullisesti. Varastokapasiteetin kartoituksessa keskitytään geologiseen varastointiin sen merkittävän potentiaalin takia. Lisäksi hiilidioksidin varastoinnin järkevyyttä arvioidaan hyötykäyttötarpeen näkökulmasta, arvioiden hiilidioksidin riittävyttä esimerkiksi synteettisten polttoaineiden tuotannon tarpeisiin keskipitkällä aikavälillä. Teknologisten nieluksen tarkastelua hiilidioksidin erilaiset hyötykäyttövaihtoehdot huomioiden tulisi jatkossa laajentaa.

Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin yksikkökustannuksia tarkastellaan laitospohjaisesti. Tarkastelussa keskitytään teollisiin laitoksiin, joiden hiilidioksidipäästöt ovat täysin tai osin bioperäisiä. Tarkastelussa arvioidaan myös esimerkkitapausten avulla teknologisten hiilinielujen kannattavuutta päästövähennyskeinona verrattuna hiilidioksidin hyötykäyttöön synteettisten polttoaineiden jalostuksessa. Selvityksessä ei tehdä kansantaloudellista arviointia. Esitetyt kustannusarviot on sovitettu kirjallisuudessa esitettyyn kustannusdataan, eikä työssä ole tehty omaa prosessimalleihin perustuvaa kustannuslaskentaa.

Tukimekanismien osalta selvityksessä tarkastellaan lyhyesti Ruotsissa toteutettavaa käänteistä huutokauppaa, eli tarjouskilpailua, jossa valtio kutsuu toimijoita tuottamaan teknologisia hiilinieluhankkeita ja esittämään korvauksen, jolla ne ovat valmiita niitä tekemään. Tarjouskilpailu tuottaa yhteiskunnan kannalta halvimmalla tavalla toteuttaa bioperäisen hiilidioksidin talteenotto- ja varastointihankkeita, kun tarjoukset järjestetään periaatteella €/t tuotettua negatiivista päästöä alhaisimmasta korkeimpaan ja voittavat tarjoukset valitaan tämän mukaisessa edullisuusjärjestyksessä. Raportissa pohditaan vastaavan järjestelmän soveltuvuutta Suomeen. Selvityksessä ei tarkastella ohjaustoimenpiteitä laajemmin, eikä arvioida niiden kansantaloudellisia vaikutuksia.

2. BIOPERÄISEN HIILIDIOKSIDIN TEOLLISET LÄHTEET SUOMESSA

Raportissa arvioidaan teknologisten hiilinielujen potentiaalia Suomen teollisten bioperäisten hiilidioksidipäästölähteiden perusteella. Päästötietoja tarkastellaan Euroopan päästökirjaston (*European Pollutant Release and Transfer Register*) viimeisimpien eli vuoden 2021 tietojen pohjalta (EEA 2023). Hiilidioksidipäästöjen osalta rekisteri sisältää päästötiedot teollisista laitoksista, joiden vuosittainen hiilidioksidipäästö määrä on vähintään 100 kt, sisältäen sekä fossiilista ja bioperäistä alkuperää olevat hiilidioksidipäästöt. Vain bioperäisen hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla voidaan luoda teknologisia hiilinieluja. Fossiilisen hiilidioksidin päästölähteet on kuitenkin sisällytetty raportin aineistoon niiden osuuden tarkastelemiseksi sekä paremman kokonaiskuvan luomiseksi hiilidioksidin talteenottomahdollisuuksista.

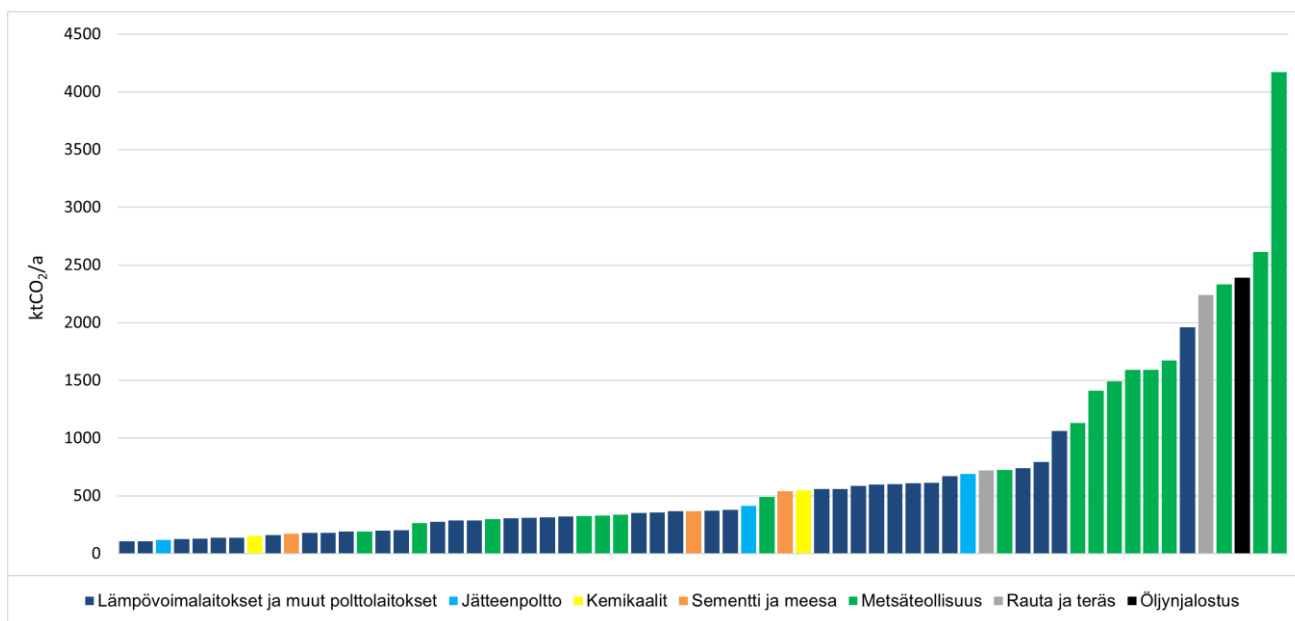
Tietojen ajantasaisuuden varmistamiseksi rekisterin tiedot päivitetään mekaanisesti suljettujen ja uusien laitosten sekä mahdollisten puuttuvien tietojen osalta. Tarkastelua varten päästökirjaston alkuperäisistä tiedoista on poistettu seuraavat sulkemispäätöksen saaneet laitokset: Helen Hanasaari B, Helen Salmisaaren voimalaitokset, Stora Enso Veitsiluodon tehtaat ja Stora Enso Sunilan tehdas. Tietoihin on lisätty seuraavat uudet laitokset: Metsä Fibre Kemi, Helen Vuosaaren biolämpölaite ja Vantaan Energia vaarallisen jätteen polttolaitos (sisällytetty tarkastelussa osaksi Långmossebergin jätevoimalan päästöjä). Seuraavien laitosten puuttuvia tietoja on päivitetty: Vantaan Energian jätevoimalaitos (puuttuva bio-CO₂), Fortum Waste Solutions Riihimäen jätteenpolttolaitos (puuttuva bio-CO₂), Alva Keljonlahden voimalaitos (puuttuva bio-CO₂). Työssä tarkastellut laitokset päästömäärineen on esitetty liitteessä 1. Taulukko 1 esittää työssä tarkasteltujen teollisten päästölähteiden hiilidioksidipäästöjen määrän ja jakautumisen teollisuudenaloittain.

Päästökirjettiin pohjautuvien päivitettyjen tietojen perusteella Suomen vuosittaiset teolliset hiilidioksidipäästöt ovat suuruudeltaan 44,4 Mt, joista 63 % (28,1 Mt) on bioperäistä alkuperää. Bioperäisen hiilidioksidin lähteistä merkittävimmät ovat metsäteollisuus (19,6 Mt_{bio}), lämpövoimalaitokset ja muut polttolaitokset (8,0 Mt_{bio}) sekä jätteenpolto (0,6 Mt_{bio}).

Päästölähteiden kokoluokka ja päästövirtojen ominaisuudet vaihtelevat riippuen teollisuudenalasta ja laitoksissa käytetyistä prosesseista. Tarkasteltujen laitosten hiilidioksidipäästöjen keskiarvo on 693 kt ja mediaani on 370 kt. Kuva 1 esittää työssä tarkastellut laitokset päästömäärän mukaisessa järjestyksessä ja teollisuudenaloittain.

Taulukko 1. Suomen teollisten hiilidioksidipäästöjen määrä ja jakautuminen teollisuudenaloittain.

Teollisuuden ala	CO ₂ -päästöt [MtCO ₂]	Bioperäiset CO ₂ -päästöt [MtCO ₂]	Fossiiliset CO ₂ -päästöt [MtCO ₂]	Bioperäisten päästöjen osuus [%]	Fossiilisten päästöjen osuus [%]	Osuus kaikista päästöistä [%]
Metsäteollisuus	20,9	19,6	1,4	93 %	7 %	47 %
Lämpövoimalaitokset ja muut polttolaitokset	15,1	8,0	7,1	53 %	47 %	33 %
Rauta ja teräs	3,0	0	3,0	0 %	100 %	7 %
Öljynjalostus	2,4	0	2,4	0 %	100 %	5 %
Jätteenpolto	1,2	0,6	0,7	46 %	54 %	3 %
Sementti ja meesa	1,1	0	1,1	0 %	100 %	2 %
Kemikaalit	0,7	0	0,7	0 %	100 %	2 %
Yhteensä	44,4	28,1	16,3	63 %	37 %	



Kuva 1. Raportissa tarkasteltujen laitosten hiilidioksidipäästö määrät (ktCO₂/vuosi) teollisuudenaloittain. Päästö määrään sisältyy sekä fossiiliset että bioperäiset hiilidioksidipäästöt laitoksista.

Kuvasta 1 nähdään, että laitosten lukumäärän osalta laitoskanta koostuu pitkälti lämpövoimalaitoksista ja muista polttolaitoksista sekä metsäteollisuuden laitoksista, kun taas muun valmistavan teollisuuden laitoksia (esim. rauta ja teräs, öljynjalostus) on lukumäärällisesti huomattavasti vähemmän. Päästö määrän osalta polttolaitosten kokoluokka on keskimäärin merkittävästi pienempi verrattuna valmistavaan teollisuuteen. Erityisesti metsäteollisuudessa on useita suuren päästö määrän laitosyksiköitä.

Suurin osa päästö rekisterin alaisuuteen kuuluvista teollisista päästö lähteistä perustuu poltto prosesseihin, joissa hiilidioksidi ilmenee savukaasuissa matalana pitoisuutena, joka prosessista riippuen vaihtelee tyypillisesti välillä 3–30 til.-%. Tällaisissa päästö lähteissä hiilidioksidin talteenotto vaatii erityistä erotusteknologiaa, joka prosessien suuren energiantarpeen takia voi tehdä hiilidioksidin talteenotosta verrattain kallista. Joissain päästö lähteissä, kuten biokaasun puhdistuksessa ja bioetanolin tuotannossa, hiilidioksidi voi esiintyä päästö- tai prosessikaasuissa lähes puhtaana virtana, jolloin erillistä erotusteknologiaa ei tarvita ja täten myös talteenoton kustannukset ovat matalat. Tällaisten korkean hiilidioksidipitoisuuden lähteiden määrällinen talteenottopotentialiaali on kuitenkin matala, sillä kyseisiin sovelluksiin pohjautuvia laitoksia on vähän ja myös laitoskoot ovat usein huomattavasti pienempiä verrattuna energiantuotannon ja valmistavan teollisuuden prosesseihin. Pienten laitoskokojen takia tällaisia laitoksia ei sisälly myöskään päästö rekisterin alaisuuteen Suomessa, eikä niitä siten ole mukana tässä tarkastelussa. Pienen mittakaavan mutta korkean hiilidioksidipitoisuuden lähteissä kustannustehokas teknologisten hiilinielujen käyttöönotto voi vaatia paikallisen sidonta- tai varastointiratkaisun käyttöä (esim. mineralisointi) tai osallistumista suurempaan alueelliseen hiilidioksidiklusteriin. Ne voivat myös tarjota edullisen reitin paikallisen tason hiilidioksidin hyötykäytölle.

3. HIILIDIOKSIDIN KÄYTTÖKOHEET JA VARASTOINNIN NÄKYMÄT

3.1. Hiilidioksidin hyötykäyttö synteettisten polttoaineiden valmistukseen

EU:n ilmastotavoitteet sekä pyrkimykset vähentää fossiilisen energian ja uusiutumattomien raaka-aineiden kulutusta tulevat luomaan kysyntää bioperäiselle hiilidioksidille. Tässä selvityksessä ennakoimme hiilidioksidin hyötykäytön kysyntää lainsäädäntöön kirjattujen sitovien tavoitteiden kautta. Ne koskevat synteettisten polttoaineiden vähimmäismäärää vuosina 2030–2050 tie-, meri- ja lentoliikenteessä. Uusiutuvan energian direktiivin (REDIII) sekä ReFuelEU Aviation ja FuelEU Maritime -aloitteiden tavoitteet sähköpolttoaineille julkaistiin osana EU:n FitFor55-pakettia. Lopulliset tavoitteet hyväksyttiin toimeenpantavaksi vuonna 2023.

Liikennesektoria koskevat uusiutuvan energian tavoitteet EU:ssa muodostuvat tietyin ehdoin teknologianeutraalista kokonaistavoitteesta sekä vähimmäismääristä, jotka tavoitteista on katettava muilla kuin biologista alkuperää olevilla uusiutuvilla nestemäisillä ja kaasumaisilla liikenteen polttoaineilla (RFNBO). RFNBO:ksi luokitellaan esimerkiksi vihreä vety sekä tästä tuotetut synteettiset polttoaineet. Uusiutuvan energian direktiivin asettama tavoite RFNBO:ille vuodelle 2030 on yksi prosentti liikenteen kokonaiskulutuksesta.

ReFuelEU Aviation -aloite asettaa tavoitteet kestävien lentopolttoaineiden (SAF) käytölle lentoliikenteessä vuosille 2030 ja 2050. Vuoden 2030 tavoitteessa kuusi prosenttia lentoliikenteen energiankäytöstä katetaan kestäville lentopolttoaineilla, joista 1,2 prosenttiyksikköä on oltava synteettisiä polttoaineita. Synteettisten polttoaineiden osuus lentoliikenteessä on nostettava kuuteen prosenttiyksikköön vuoteen 2035 mennessä. SAF:ien osuus on nostettava 70 prosenttiin lentoliikenteen kulutuksesta vuoteen 2050 mennessä. Tästä 35 prosenttia on oltava synteettisiä polttoaineita. SAF:ksi lasketaan RFNBO:iden lisäksi kestävät biopolttoaineet ja uusiutuvan energian direktiivin mukaiset kierrätetyt hiilipitoiset polttoaineet, jotka on valmistettu tietyin ehdoin uusiutumattomista jätevirroista tai väistämättömistä teollisuuden päästöistä.

FuelEU Maritime -asetuksen mukaisesti laivaliikenteen käyttämän energian päästöintensiteetin on laskettava annetusta referenssisitasosta kuuteen prosenttiin vuoteen 2030 mennessä ja 80 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä. RFNBO:iden vähimmäismäärä vuoteen 2031 mennessä on yksi prosentti. Siinä tapauksessa, että määrä ei täyty, tavoite nostetaan kahteen prosenttiyksikköön vuodesta 2034 lähtien.

Suomen ja EU:n oletettu energiankulutus liikennesektorilla on esitetty taulukossa 2. EU:n osalta energiankulutus perustuu Yugo ym. (2021) esittämään arvioon vuodelle 2030. Suomen liikennesektorin energiankulutus perustuu Tilastokeskuksen (2023) tietoihin vuoden 2022 toteutuneesta energiankulutuksesta, jonka oletetaan tässä selvityksessä pysyvän vakiona.

Taulukko 2. Raportissa oletettu liikenteen polttoainekulutus vuonna 2030.

	Suomi* (Mtoe)	EU (Mtoe)
Tie- raide, ja sisäinen vesiliikenne	3,8	259,5
Lentoliikenne	0,1	58,3
Meriliikenne		54,8
Lähde	Tilastokeskus 2023	Yugo ym. 2021

*oletuksena käytetään vuoden 2022 kotimaan liikenteen tasoa

Taulukko 3. Raportissa oletettu kysyntäskenaario Suomessa tuotetuille synteettisille polttoaineille vuodelle 2030, 2035 ja 2050. Hiilidioksidin ja sähkön tarve perustuvat lähteeseen Yugo & Soler (2019).

	2030	2035	2050	Yksikkö
Synteettisten polttoaineiden kysyntäskenaario	490	815	2776	ML/vuosi
Bioperäisen hiilidioksidin tarve	1,6	2,6	9,0	Mt/vuosi
Uusiutuvan sähkön tarve	11,2	18,5	63,2	TWh/vuosi

Synteettisten polttoaineiden kysynnän suuruusluokan hahmottamiseksi tässä työssä oletetaan kysyntäskenaario (kts. taulukko 3), jossa Suomessa talteenotetusta hiilidioksidista jalostetaan lainsäädännön vähimmäismäärä Suomen tarpeisiin sekä kymmenen prosenttia Euroopan liikennesektorilla vaaditusta vähimmäismäärästä. Tässä karkeassa arvioinnissa oletetaan, että liikenteen energiankulutus pysyy vuosina 2030–2050 samalla tasolla ja että synteettisten polttoaineiden kysynnän nousua ajaa lentoliikenteen kiristyvät velvoitteet niiden vähimmäismäärille. Näillä oletuksilla Suomessa tuotettaisiin synteettisiä polttoaineita 490 ML vuonna 2030, 815 ML vuonna 2035 ja 2776 ML vuonna 2050. Tämän määrän jalostamiseksi vaadittu bioperäinen hiilidioksidimäärä olisi vastaavasti 1,6 MtCO₂/vuosi vuonna 2030, 2,6 MtCO₂/vuosi vuonna 2035 ja 9,0 MtCO₂/vuosi vuonna 2050. Määristä suurin osa johtuu oletetusta viennistä EU:n markkinoiden synteettisten lentopolttoaineiden tarpeeseen.

Hiilidioksidin lisäksi synteettisten polttoaineiden jalostukseen vaaditaan vihreän vedyn tuotantokapasiteettia, jonka sähkönkulutus oletetussa skenaariossa olisi noin 11 TWh vuonna 2030 ja 63 TWh vuonna 2050.

3.2. Geologisen varastoinnin näkymät Pohjois-Euroopassa

Tässä työssä on päivitetty hiilidioksidin geologisen varastoinnin tilanne Suomen näkökulmasta, perustuen Pohjois-Euroopassa julkisesti valmisteltaviin ja käynnissä oleviin hiilidioksidin varastointihankkeisiin. Data hiilidioksidin varastointiprojekteista perustuu Global CCS Institutin vuoden 2022 raporttiin (GCCSI 2022) ja tietoja on täydennetty useiden hankkeiden verkkosivuilta. Global CCS Institute julkaisi juuri vuoden 2023 raportin (GCCSI 2023), mutta aineistoa ei ehditty päivittää tämän raportin tulokuvajoihin. Keskeisimmät huomiot vuoden 2023 raportista ovat:

- Globaalisti valmisteltujen CCS-hankkeiden talteenottokapasiteetin kasvu on jatkunut eksponentiaalisena (+57...+68 %) jo neljä peräkkäistä vuotta (2020–2023).
- Tanskan uusissa suunnitelmissa on yhteensä jopa 52 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettia vuosille 2030–2032, mikä tuo merkittävän lisän vuoden 2022 tilanneraportissa kuvattuihin hankkeisiin (verrattuna erityisesti 8 MtCO₂/vuosi Tanskassa).
- Norjassa Northern Lights -hankkeen varastokapasiteetti on jo vuoden 2023 raporttiin kirjattuna ”suullisten tietojen mukaan” täynnä, mutta Norjaan on suunnitteilla 30–40 MtCO₂/vuosi hiilidioksidin putkikuljetusta varastoitavaksi Pohjanmerelle EU2NSEA -hankkeessa. Aikataulusta ei mainittu tarkkaa tietoa.

Hiilidioksidin varastointihankkeista pyrittiin selvittämään verkkosivujen perusteella:

- a) Kuinka suuri vuotuinen varastokapasiteetti hankkeella saadaan aikaan?

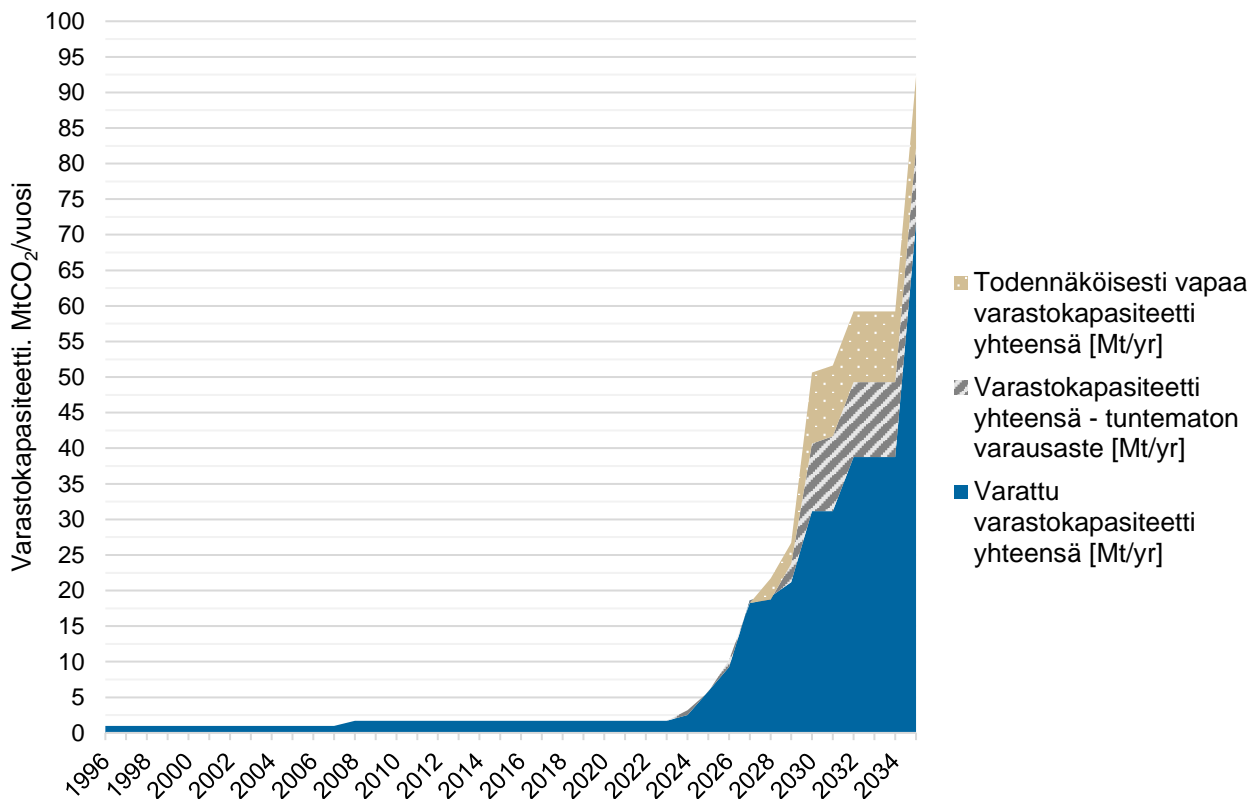
- b) Kuinka suuri osuus varastokapasiteetista on jo sovittu tiettyjen yritysten käyttöön ja kuinka suuri osuus vastaavasti voisi olla sellaista kapasiteettia, josta kilpailuun suomalaiset toimijat voisivat vapaasti osallistua?
- c) Milloin varastokapasiteetin odotetaan olevan käytössä?

Verkkosivuilla olevissa tiedoissa on erityisesti kiinnitetty huomiota siihen, onko jo julkaistu hiilidioksidin toimitusmääriä tietyiltä hankekumppaneilta, haetaanko uusia hiilidioksidin toimittajia aktiivisesti, onko ilmoitettu suunnitelmia kapasiteetin laajentamiseksi ja milloin sekä voidaanko projektin muiden tietojen perusteella olettaa varaston olevan suunniteltu kansalliseen vai kansainväliseen käyttöön. Näin on muodostettu kuvassa 2 ”hiilidioksidin varastokapasiteetti Pohjois-Euroopan varastointiprojekteissa”, jossa varastokapasiteetti on luokiteltu kolmeen osaan: todennäköisesti vapaana olevalle (eli vapaasti kilpailtavalle) osuudelle, tuntemattoman varausasteen osuudelle sekä jo varatulle osuudelle. ”*Todennäköisesti vapaa kapasiteetti*” on laskettu kaavan (1) mukaan, jossa *todennäköisesti vapaa kapasiteetti* on jäljelle jäävä osuus varastointihankkeissa, joihin haetaan lisää hiilidioksidin toimittajia, kun varastokapasiteetista on vähennetty jo julkistetut toimitusmäärät.

$$\begin{aligned} & \text{Todennäköisesti vapaa kapasiteetti} \\ & = (\text{Pohjois-Euroopan varastokapasiteetit yhteensä "lisää toimittajia haetaan"}) \\ & - (\text{julkistetut CO}_2\text{-toimitukset}) \qquad (1) \end{aligned}$$

Joissain hankkeissa hiilidioksidin toimitusmäärät ja toimittajat on jo ilmoitettu selvästi. Ne on ilmoitettu kuvaajassa nimellä ”*varattu varastokapasiteetti yhteensä*”. Jotkin hankkeista eivät tiedota selvästi siitä, mahtuuko hankkeeseen vielä lisää hiilidioksidin toimittajia ja milloin, tai onko toimitus mahdollista myös kansainvälisille toimijoille. Lisäksi hiilidioksidin talteenotto-, kuljetus-, ja varastointihankkeet ovat toisinaan hyvin monikytköksisiä kokonaisuuksia, joista ei aina voida päätellä suoraan, vähentääkö jokin ilmoitettu hiilidioksiditoimitus varastokapasiteettia ilmoitetun vaiheen kapasiteetista vai ei. Näistä syistä selkeästi kilpailtavissa olevan ja varmasti varatun kapasiteetin välille jää välikategoria ”*tuntemattoman varausasteen*” hankkeille.

Useimmissa hankkeissa oli ilmoitettu tietty tavoiteaikataulu projektin varastokapasiteetille liitettynä tiettyyn vuoteen. Joissain varhaisen valmisteluvaiheen hankkeissa kuitenkin oli tiedossa vasta varastopaikan yhteenlaskettu varastokapasiteetti, mutta vuotuista kapasiteettia ei ollut ilmoitettu. Niissä tapauksissa, kun projektin käynnistymisaikaa ei ollut ilmoitettu, on käynnistymisaika arvioitu GCCSI 2022 –raportin tyypillisen CCS-hankkeen aikataulua mukailten: käynnistymiseen kestäisi kuusi vuotta varaston identifioinnista, neljä vuotta varastokapasiteetin julkaisemisesta ja kaksi vuotta rakentamisen aloittamisesta. Jos taas vuotuista varastokapasiteettia ei ollut ilmoitettu, on käytetty kokonaiskapasiteettia jaettuna 20 vuodelle teollisen investoinnin tyypillistä käyttöikä mukailten. Esimerkkinä Polaris-hanke: 100 Mt CO₂ / 20 vuotta = 5 MtCO₂/vuosi.



Kuva 2. Hiilidioksidin varastokapasiteetti Pohjois-Euroopan varastointiprojekteissa.

3.2.1. Hiilidioksidin varastointihankkeiden kehitys vuoteen 2035 mennessä

Pohjois-Euroopan odotettu hiilidioksidin varastokapasiteetti muodostuu 16 hankkeesta ja niiden yhteensä 25 osakokonaisuudesta. Huomiodut hiilidioksidin varastointihankkeet ovat Sleipner (Global CCS Institute 2022), Snøhvit (Global CCS Institute 2022), Orca (Climeworks n.d.), Northern Lights (Northern Lights n.d.a, Northern Lights n.d.b, Yara 2022), Mammoth (Climeworks 2022), Antwerp@C (Antwerp@C n.d.), Project Greensand (Project Greensand 2023), Porthos (Porthos 2023), Coda (Carbfix n.d.), East Coast Cluster (East Coast Cluster n.d.), HyNet (HyNet 2023), Polaris (Horisont Energi n.d.), Acorn (Acorn 2023), MEDWAY (Brook-Jones 2023; Wessel 2022) ja H21 (H21 2023). Suurin osa varastointihankkeista on Iso-Britannian, Irlannin, Norjan ja Tanskan merialueilla ja suurin osa nyt suunnitteilla olevasta talteenotto- ja varastokapasiteetista koskee fossiilisen hiilidioksidin varastointia.

Raportin kirjoittamishetkellä hiilidioksidin varastokapasiteetti on vielä alle 2 MtCO₂/vuosi, mutta sen odotetaan kasvavan yli kymmenkertaiseksi vain viidessä vuodessa, vuoteen 2028 mennessä, Northern Lights, Mammoth, Antwerp@C, Project Greensand, Porthos, Coda, East Coast Cluster ja HyNet -projektien myötä. Sen jälkeen varastokapasiteetin odotetaan edelleen kasvavan vuoteen 2035 mennessä yli 90 MtCO₂/vuosi, joskin vuosien 2032–2034 välille projektien välitavoitteita ei ole aina tarkkaan julkistettu, mikä näyttäytyy kuvaajassa tasaisena jaksona.

Todennäköisesti vapaata kapasiteettia on saatavilla merkittävässä määrin vuodesta 2030 alkaen. Vuoden 2022 Global CCS Institutun raportin perusteella *todennäköisesti vapaata kapasiteettia* olisi noin 10 MtCO₂/vuosi, vuosina 2030–2035. Tämä määrä voisi siis olla todennäköisesti vielä vapaan kilpailun piirissä Pohjois-Euroopan markkinoilla, mutta vain osa näistä voisi olla suomalaisten toimijoiden käytettävissä. Kuitenkin Global CCS Institutun vuoden 2023 raportin mukaan Tanskaan olisi suunnitteilla moninkertaisesti enemmän hiilidioksidin

varastokapasiteettia, peräti 52 Mt CO₂/vuosi, jo vuosille 2030–2032, joskin varausaste tälle kapasiteetille on vielä tuntematon. Tanskan uusien varastointihankkeiden lisäksi merkittävä osa tuntemattoman varausasteen varastokapasiteetista liittyy Iso-Britannian East Coast Cluster -hankkeeseen, joka vaikuttaisi olevan pääpainoisesti Iso-Britannian toimijoille suunnattu.

3.2.2. Keskeisimmät hankkeet vapaan varastokapasiteetin kannalta

Kuvan Kuva 2 *todennäköisesti vapaa kapasiteetti* muodostuu pääosin neljästä hankkeesta: Northern Lights (2. vaihe), Polaris, Project Greensand (2. vaihe) ja Acorn. Lisäksi on huomattava, että julkisten tietojen perusteella saatava kuva voi muuttua merkittävästi jo yhden vuoden aikana, kuten Tanskan esimerkki osoittaa.

Northern Lights -hanke on suunniteltu käynnistettäväksi kahdessa vaiheessa, joista ensimmäinen käsittää 1,5 MtCO₂/vuosi hiilidioksidin laivakuljetuksen terminaaliin Norjan länsirannikolle sekä putkikuljetuksen Pohjanmeren alaiseen geologiseen varastoon (Northern Lights, n.d.b). Myöhemmin, arviolta vuonna 2028, käynnistyvässä toisessa vaiheessa kapasiteettia nostetaan 3,5 MtCO₂/vuosi. Toisen vaiheen toteutuminen on kysyntäperusteista, eli varastokapasiteettia ei ole toistaiseksi julkisesti osoitettu ennalta nimettyjen yritysten käyttöön. Hankkeen verkkosivuilla (Northern Lights, n.d.a) eurooppalaisille toimijoille ilmoitetaan vielä varastointimahdollisuudesta, mutta Global CCS Institutun tuoreessa raportissa (GCCSI 2023) kerrotaan koko hankkeen varastokapasiteetin olevan ”suullisten tietojen mukaan” jo täynnä.

Horisont Energi -yhtiön **Polaris**-varastohankkeen ilmoitettu kokonaisvarastokapasiteetti on 100 MtCO₂ ja se sijaitsee Norjan merialueilla Barentsinmerellä (Horisont Energi, n.d.). Varastohankkeesta tiedotetaan julkisesti vain rajatusti eikä hankkeella ole ilmoitettua tavoitetta vuosittaiselle varastokapasiteetille tai varastoinnin aloittamisvuotta. Perustuen ilmoitettuun kokonaiskapasiteettiin ja oletettuun 20 vuoden toiminta-aikaan, varaston toiminnan aloitusvuodeksi *arvioidaan* noin 2029 ja vuosikapasiteetiksi 5 MtCO₂/vuosi.

Iso-Britanniassa Skotlannin merialueella sijaitsevan **Acorn**-varastointihankkeen ilmoitettu kokonaisvarastokapasiteetti on 240 MtCO₂ (Acorn 2023). Hankkeen tavoitteena on varastoida vuoteen 2030 mennessä vähintään 5 MtCO₂/vuosi. Kapasiteettia on määrä tarjota useiden talteenottolaitosten käyttöön Skotlannista, Englannista ja EU:sta. Tässä selvityksessä hankkeen aloitusvuodeksi on oletettu 2030 sekä vuosittaiseksi varastokapasiteetiksi 12 MtCO₂/vuosi ilmoitetun kokonaiskapasiteetin ja oletetun 20 vuoden toiminta-ajan perusteella. Lisäksi oletetaan, että kapasiteetista olisi Iso-Britannian kotimaisten varausten (tavoite 5 MtCO₂/vuosi) jälkeen noin 7 MtCO₂/vuosi avoinna muille toimijoille Euroopasta. On kuitenkin mahdollista, että muille eurooppalaisille toimijoille tarjolla oleva varastokapasiteetti olisi paljon pienempi tai tarjolla paljon myöhemmin kuin vuonna 2030.

Vuonna 2023 pilottivaiheeseen edenneen tanskalaisen **Project Greensand** -varastohankkeen ensimmäisen vaiheen tavoitteena on ylittää 1,5 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettiin vuosina 2025–2026 (Project Greensand 2023). Varastokapasiteetti on tarkoitus kasvattaa tasolle 8 MtCO₂/vuosi vuoteen 2030 mennessä ja tähän toiseen vaiheeseen liittyy merkittävä mahdollisuus suomalaisillekin toimijoille. Lisäksi Tanskaan on uusimmissa julkaistuissa suunnitelmissa (GCCSI 2023) esitetty yhteensä jopa 52 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettia jo vuosina 2030–2032, mikä toisi erittäin merkittävän lisän tässä tarkemmin arvioitujen hankkeiden kokonaisuuteen.

4. TEKNOLOGISTEN HIILINIELUJEN KUSTANNUKSET JA KANNATTAVUUS

4.1. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannukset

4.1.1. Hiilidioksidin talteenoton kustannus

Hiilidioksidin talteenoton kustannus muodostuu hiilidioksidin erottamiseen tarvittavan teknologian investointi- ja käyttökustannuksista. Hiilidioksidin talteenottoon tarvittava teknologia on pääomaintensiivistä ja vaatii suuria investointeja erityisesti matalan hiilidioksidipitoisuuden päästölähteissä. Käyttökustannusten osalta merkittävien kustannuserä on tyypillisesti energiankulutus, jonka kustannus muodostuu joko markkinoille myytävän energiantuotantokapasiteetin menetyksestä laitoksen omakäyttöenergiankulutuksen noustessa talteenoton myötä ja/tai ylimääräisen energiantuotantokapasiteetin rakennuttamisesta ja operoinnista.

Tässä työssä talteenottokustannukset lasketaan laitoskohtaisesti kirjallisuuteen perustuvien referenssitietojen pohjalta. Laitoskohtainen talteenottokustannus arvioidaan laitoksen kokoluokan (päästömäärän) ja hiilidioksidin osapaineen sekä prosessikohtaisesti lasketun mittakaavakertoimen avulla. Laitosten päästöjen määrä pohjautuu päästörekisterin tietoihin (ks. luku 2). Hiilidioksidin osapaine kussakin laitoksessa arvioidaan laitostyyppin ja/tai laitoskohtaisten tietojen pohjalta (esim. ympäristölupa). Talteenottokustannuksien arvioinnissa on käytetty seuraavia oletuksia:

- 90 prosentin talteenottoaste (määrä, joka päästölähteen hiilidioksidista saadaan otettua talteen)
- Jos laitoksessa on useita pistepäästölähteitä, oletetaan, että ne voidaan yhdistää yhdeksi virraksi hiilidioksidin talteenottoa varten (esim. sellutehtaan soodakattila, kuorikattila ja meesauuni).

Talteenottokustannusten referenssitietoina käytetään Global CCS Institutun (Kearns ym. 2021) arvioimia kustannuksia teollisille päästölähteille eri kokoluokissa, jotka on laskettu hyvin tunnettuun ja teknologisesti kypsään MEA-talteenottoteknologiaan pohjautuen. Kustannustiedot on päivitetty vastaamaan valuuttaa EUR₂₀₂₃. Tietojen pohjalta kullekin prosessityypille lasketaan mittakaavakerroin hiilidioksidin talteenoton yksikkökustannuksille, jota käytetään kustannustietojen laitoskohtaisessa skaalaamisessa. Taulukko 4 esittää talteenottokustannusten laskennan pohjana käytetyt referenssitiedot hiilidioksidin talteenoton kustannuksista teollisissa päästölähteissä eri kokoluokissa sekä kustannusten pohjalta lasketut prosessikohtaiset mittakaavakertoimet.

Taulukko 4. Hiilidioksidin talteenoton kustannus teollisissa päästölähteissä eri kokoluokissa (pohjautuen lähteeseen Kearns ym. 2021).

Päästölähde	Hiilidioksidin osapaine [kPa]	Laitoksen päästömäärä [ktCO ₂ /a]	Talteenoton kustannus [€/tCO ₂]	Mittakaavakerroin (laskettu) [-]	Lähde
Alumiinin sulatus	1 kPa	20	326	-0,213	[1]
		200	199		
Terästehtaan dedusting-laitos	2 kPa	40	200	-0,222	[1]
		400	120		
Kaasukombikattila, teräksen sintraus	4 kPa	70	133	-0,223	[1]
		660	81		
Maakaasu- ja öljykoksivoimalat	8 kPa	120	93	-0,156	[1]
		1200	65		
Jätteenpolttio	10 kPa	500	71	-0,147	[2] Interpoloitu
Biovoimalaitos	12 kPa	130	81	-0,138	[1]
		1300	59		
Soodakattila	13 kPa	500	66	-0,128	[3] Interpoloitu
Hiilivoimalaitos, sellutehdas (kaikki pistepäästölähteet)	14 kPa	150	75	-0,119	[1]
		1500	57		
Sementtiuuni	18 kPa	180	68	-0,092	[1]
		1800	55		
Meesauuni	20 kPa	500	61	-0,085	Interpoloitu
Teräksen tuotanto (masuuni)	26 kPa	200	60	-0,066	[1]
		2000	51		
Teräksen tuotanto (COREX), metaanin höyryreformointi	35 kPa	200	57	-0,080	[1,4]
		2000	47		

[1] Pohjautuen lähteeseen Kearns ym. 2021, [2] IPCC 2005, [3] Onarheim ym. 2017a, [4] Bains ym. 2017

Taulukosta 4 nähdään, että päästölähteen hiilidioksidin osapaineen ja laitoksen kokoluokan vaikutus hiilidioksidin talteenoton kustannukseen on merkittävä. Kokoluokan vaikutus hiilidioksidin talteenoton kustannuksiin on huomattavasti suurempi päästölähteissä, joissa hiilidioksidin osapaine on matala. Taulukossa 4 esitettyjen tietojen pohjalta voidaan yhtälön 1 avulla laskea arvio hiilidioksidin talteenoton kustannuksista teollisissa päästölähteissä.

$$K_{\text{talteenotto}} = K_{\text{talteenotto,ref}} \left(\frac{m}{m_{\text{ref}}} \right)^{s_t} \quad (\text{yhtälö 1})$$

$K_{\text{talteenotto}}$ = talteenottokustannus (€/tCO₂)

m = talteenotettavan CO₂:n määrä (kt/a)

s_t = prosessikohtainen mittakaavakerroin talteenottolaitteistolle (-)

Alla on esitetty esimerkkilaskenta hiilidioksidin talteenoton kustannukselle biovoimalaitoksessa, jonka vuosittainen hiilidioksidipäästömäärä on 300 kt, oletuksena 90 prosentin talteenottoaste.

$$\text{Esim. } K_{\text{talteenotto}} = 58,6 \frac{\text{€}}{\text{tCO}_2} \left(\frac{0,9 \cdot 300 \text{ kt/a}}{1300 \text{ kt/a}} \right)^{-0,138} = 72,8 \frac{\text{€}}{\text{tCO}_2}$$

On olennaista huomioida, että tässä työssä arvioidut laitoskohtaiset kustannukset hiilidioksidin talteenotolle ovat suuntaa antavia, sillä tarkan talteenotokustannuksen laskemiseksi on huomioitava laitoskohtaiset tiedot, kuten käytetty polttoaine, prosessiolosuhteet ja toimintaympäristö, kuten energiantegraation mahdollisuudet.

4.1.2. Hiilidioksidin paineistuksen kustannus

Talteenoton jälkeen, kun hiilidioksidi on erotettu päästölähteestä puhtaaksi tuotevirraksi, se paineistetaan logistisesti kustannustehokkaamman muodon saavuttamiseksi. Tässä työssä paineistuksen kustannus lasketaan talteenotettavissa olevan hiilidioksidin määrän funktiona.

Laskennassa on käytetty seuraavia oletuksia hiilidioksidin paineistukselle:

- Sähkön hinta: 0,1 €/kWh
- Prosessin sähkönkulutus: 105 kWh/tCO₂ (Aspelund & Jordal 2007)
- Investointikustannus (laitekustannukset sis. asennus): 28 M€ kokoluokassa 400 ktCO₂/vuosi, vuosierä 2 693 670 €/vuosi (Eldrup ym. 2019, valuutta päivitetty EUR₂₀₂₃)
- Investointikustannuksen mittakaavakerroin: 0,65 (Eldrup ym. 2019)
- Ylläpitokustannus: 4 % investointikustannuksista (Eldrup ym. 2019)
- Työvoimakustannukset: 635 k€/a (Eldrup ym. 2019, valuutta päivitetty EUR₂₀₂₃)

Paineistuksen kustannus lasketaan yhtälön 2 avulla.

$$K_{\text{paineistus}} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}}{m} \quad (\text{yhtälö 2})$$

$$K_{\text{paineistus}} = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX}_{\text{sähkö}} + \text{OPEX}_{\text{ylläpito}} + \text{OPEX}_{\text{työvoima}}}{m}$$

$$K_{\text{paineistus}} = \frac{\text{CAPEX}_{\text{ref}} \left(\frac{m}{m_{\text{ref}}} \right)^{s_p} + m * p_{\text{sähkö}} * E_{\text{sähkö}} + 4 \% \text{ CAPEX} + \text{OPEX}_{\text{työvoima}}}{m}$$

$K_{\text{paineistus}}$ = paineistuksen kustannus (€/tCO₂)
 CAPEX = investointikustannuksen vuosierä (€/a)
 OPEX = käyttökustannus (€/a)
 m = talteenotettavan CO₂:n määrä (kt/a)
 s_p = mittakaavakerroin paineistuslaitteistolle (-)
 $p_{\text{sähkö}}$ = sähkön hinta (€/kWh)
 $E_{\text{sähkö}}$ = sähkön kulutus (kWh/tCO₂)

Alla on esitetty esimerkkilaskenta hiilidioksidin paineistuksen kustannukselle biovoimalaitoksessa, jonka vuosittainen hiilidioksidipäästö on 300 kt, oletuksena 90 prosentin talteenottoaste.

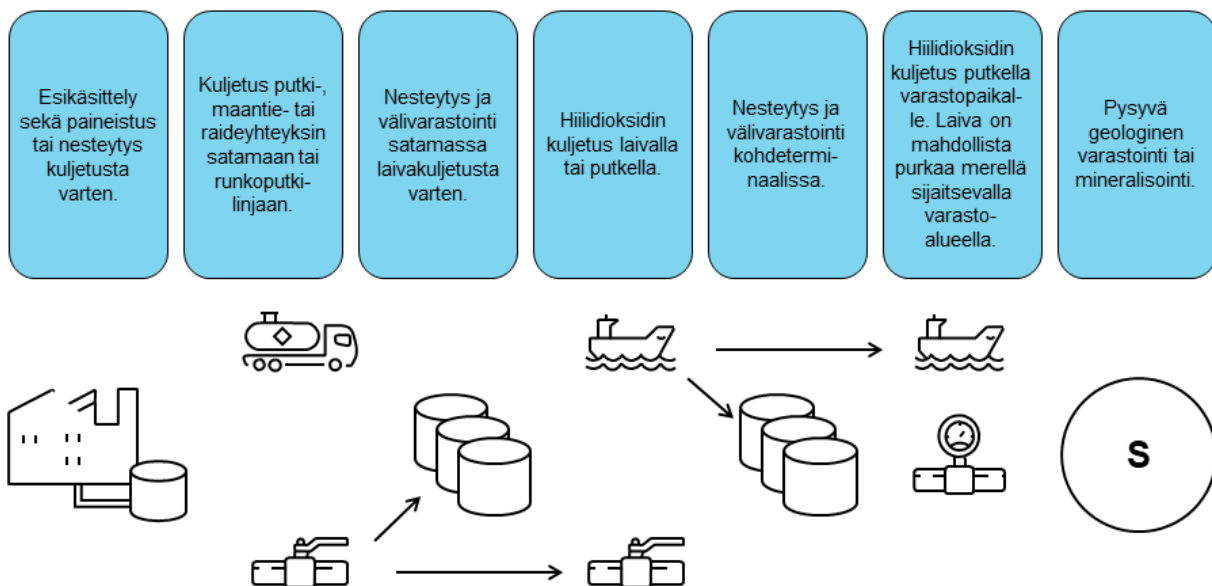
$$\text{Esim. } K_{\text{paineistus}} = \frac{2\,693\,670 \frac{\text{€}}{\text{a}} \left(\frac{0,9 \cdot 300 \frac{\text{kt}}{\text{a}}}{400 \frac{\text{kt}}{\text{a}}} \right)^{0,65} + 0,9 \cdot 300 \frac{\text{kt}}{\text{a}} \cdot 0,1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 105 \frac{\text{kWh}}{\text{tCO}_2} + 0,04 \cdot \left(2\,693\,670 \frac{\text{€}}{\text{a}} \left(\frac{0,9 \cdot 300 \frac{\text{kt}}{\text{a}}}{400 \frac{\text{kt}}{\text{a}}} \right)^{0,65} \right) + 635\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}}{0,9 \cdot 300 \frac{\text{kt}}{\text{a}}} = 19,8 \text{ €}/\text{tCO}_2$$

4.1.3. Kuljetus- ja varastointikustannukset

Suomella ei ole hiilidioksidin pysyvään varastointiin sopivaa geologiaa (Teir ym. 2016) ja potentiaalisimmat varastoalueet Pohjois-Euroopassa sijaitsevat Pohjanmeren alueella (IEA 2021). Talteenotettu hiilidioksidi voi kulkea usean kuljetustavan sekä välivarastoinnin kautta ennen saapumista ja sijoittamista pysyvään varastoon (kts. kuva 3). Hiilidioksidi voidaan kuljettaa putkijonossa tai nesteytettyinä laivoissa, junissa tai säiliöautoissa. Suomen tapauksessa varastoitava hiilidioksidi pitää kuljettaa ensin satamaan, josta hiilidioksidi kuljetetaan laivoin joko suoraan varastoalueelle tai vastaanottavaan satamaan, josta on putkiyhteys varastoalueeseen.

Tässä selvityksessä kuljetuskustannusten arviointi pohjautuu kirjallisuudessa esitettyihin yksikkökustannuksiin (€/tCO₂) eri kuljetustavoille eri etäisyyksillä ja hiilidioksidimäärillä. Arvioissa on pyritty käyttämään viimeisintä tai luotettavaksi arvioitua kirjallisuutta, sisältäen sekä julkisia raportteja että vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja. Tässä työssä esitetyt arviot on siis sovitettu kirjallisuudessa esitettyyn kustannusdataan, eikä työssä ole tehty omaa prosessimalleihin perustuvaa kustannuslaskentaa. Kustannukset on indeksikorjattu vuoden 2022 arvoon ja ne ovat arvioita hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin ensimmäisten kaupallisten demonstraatioiden jälkeisestä kaupallisesta tasosta. Toisin sanoen, ensimmäiset investoinnit hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin Pohjois-Euroopassa voivat olla tässä työssä arvioituja kustannuksia kalliimpia.

Päästölähdekohtaista kuljetuskustannusten arviointia on yksinkertaistettu siten, että kuljetustavat on rajattu putki- ja laivakuljetukseen. Laivakuljetuskustannukset perustuvat lähteisiin Kjærstad ym. 2016, IEAGHG 2020 ja GCCSI 2021. Putkikuljetuskustannukset perustuvat lähteisiin GCCSI 2021, IEAGHG 2020 ja Stolaroff ym. 2021.



Kuva 3. Hiilidioksidin logistiikan vaiheet ja vaihtoehdot talteenottolaitokselta pysyvään varastoon.

Laivakuljetuksen kustannuksien sovite yli 1000 km kuljetusetäisyyksille on esitettyä alla yhtälössä 3.

$$A_{laiva} = 2,304703 + 19,527697 * B^{-0,132486} + \frac{C-1000}{50} * 0,3 \quad (\text{yhtälö 3})$$

missä A_{laiva} on laivakuljetuskustannus yksikössä €/tCO₂, B on talteenottomäärä yksikössä MtCO₂/vuosi ja C on kuljetusmatka yksikössä km.

Putkikuljetuksen kustannukset on arvioitu yhtälön 4 mukaisesti.

$$A_{putki} = 0,076149 * B^{-0,504135} * C \quad (\text{yhtälö 4})$$

missä A_{putki} on putkikuljetuskustannus yksikössä €/tCO₂, B on talteenottomäärä yksikössä MtCO₂/vuosi ja C on kuljetusmatka yksikössä km.

Arvio varastointikustannuksista 18 €/tCO₂ perustuu lähteisiin GCCSI 2021 ja ZEP 2010. Kustannus koskee merenalaista geologista varastomuodostumaa, jossa ei ole hyödynnettävissä käytöstä poistettuja öljyntuotantokaivoja injektointiin. Varastointikustannus on kaikille talteenottolaitoksille vakio. Varastointikustannuksiin lisätään 8 €/tCO₂, sisältäen laivan purun kohdesatamassa ja putkikuljetuksen varastoon.

Kuljetuskustannuksia arvioitaessa ei ole oletettu tunnettuja varastointialueita kohteiksi, vaan laivamatkat päättyvät samaan pisteeseen Pohjanmerellä. Yksittäisen laivamatkan pituus määräytyy sen rannikkoalueen perusteella Suomessa, missä satama sijaitsee (kts. taulukko 5). Sisämaan laitoksiin lisätään putkikuljetus lähimpään satamaan, jonka läheisyydessä on muita päästölähteitä. Samalla on muodostunut näkymä päästökeskittymistä (hubeista) rannikolla, joissa olisi luontevaa tavoitella skaalaetuja kuljetuskustannuksissa.

Kuljetuskustannukset yhdestä talteenottolaitoksesta ovat riippuvaisia siitä, voidaanko laivamatkan tai putkilinjan kustannuksia jakaa muiden laitosten kanssa. Tässä työssä kuljetusverkostoa ei ole määritelty optimoimalla, vaan kustannuksille on pyritty antamaan korkeampi arvio perustuen itsenäiseen kuljetusratkaisuun sekä matalampi arvio perustuen mahdollisimman jaettuun, skaalaetuja tavoittelevaan kuljetusinfrastruktuuriin. Laitoskohtainen kuljetuskustannus lasketaan siis kahdella oletuksella: mitoittamalla kuljetusinfra kyseiselle laitokselle tai yhteenlasketun enimmäismäärän perusteella, käsittäen sataman lähellä sijaitsevat hiilidioksidilähteet sekä sisämaasta satamaan putkilinjalla kerättävät hiilidioksidilähteet. Sisämaan talteenottolaitosten alemmissa kuljetuskustannusarvioissa on oletettu, että hiilidioksidi kulkee koko matkan jaettua runkolinjaa pitkin satamaan riippumatta siitä, ovatko lähteet saman runkolinjan varrella. Tämä itsessään epärealistinen laskentatapa on valittu yksinkertaisuuden vuoksi ja se kuvaa, millaisiin kuljetuskustannuksiin sisämaasta voitaisiin päästä ihannetapauksessa. Työssä muodostettu hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja poiston rajakustannus (kts. kuva 4) noudattaa laitoskohtaisia yksikkökustannuksia perustuen korkeampaan arvioon kuljetuskustannuksista itsenäisellä kuljetusinfrastruktuurilla.

Taulukko 5. Oletetut kuljetusetäisyydet ja hiilidioksidimäärät tarkastelluissa reiteissä. Hubi tarkoittaa sataman läheisyydessä sijaitsevien talteenottolaitosten muodostamaa hiilidioksidikeskittymää, jolla voidaan tavoitella skaalaetuja kuljetuskustannuksissa.

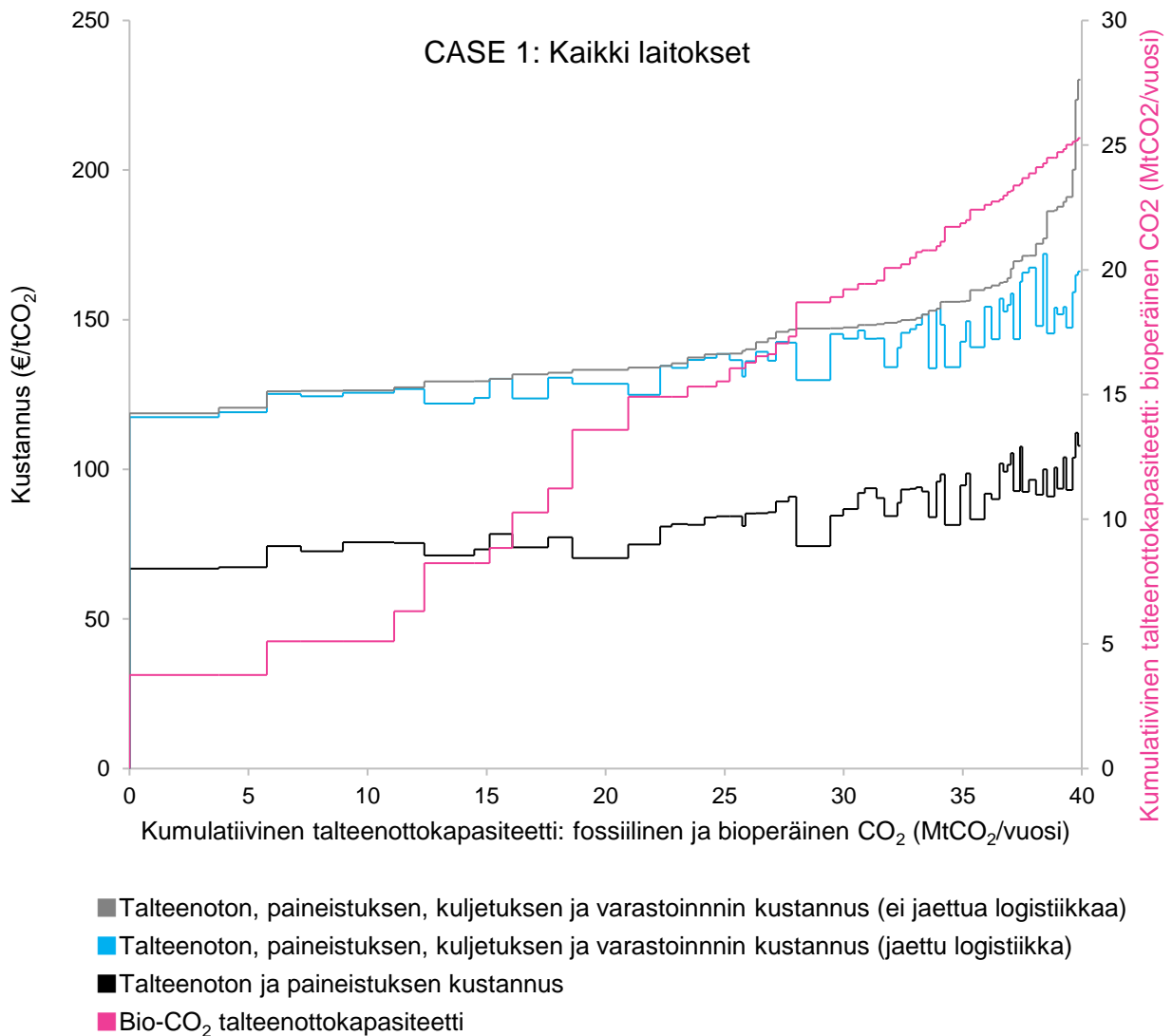
Alue	Kuljetusetäisyys	CO ₂ määrä ei-jaetun logistiikan tapauksessa	CO ₂ määrä jaetun logistiikan tapauksessa
Perämeri	Laiva 2200 km	Alkuperälaitoksen talteenottomäärä	Hubin kokonaismäärä
Selkämeri	Laiva 1800 km	Alkuperälaitoksen talteenottomäärä	Hubin kokonaismäärä
Saaristomeri	Laiva 1650 km	Alkuperälaitoksen talteenottomäärä	Hubin kokonaismäärä,
Suomenlahti	Laiva 1800 km	Alkuperälaitoksen talteenottomäärä	Hubin kokonaismäärä
Sisämaa	Putki: lähimpään hubiin rannikolla, Laiva: alueen perusteella	Putki ja laiva: Alkuperälaitoksen talteenottomäärä	Laiva: Hubin kokonaismäärä, Putki: kaikkien alueelle kuljettavien laitosten päästöt yhdessä runkoputkessa

4.1.4. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin rajakustannukset Suomen teollisissa päästölähteissä

Summaamalla edellä esitetyt arviot kustannuksista hiilidioksidin talteenotolle, paineistukselle, kuljetukselle ja varastoinnille voidaan laskea arvio hiilidioksidin geologiseen varastointiin perustuvien teknologisten hiilinielujen kustannuksista Suomen teollisissa päästölähteissä. Kustannusten tarkastelu toteutettiin kolmelle eri skenaariolle riippuen laitosten hiilidioksidipäästöjen luonnollisesta alkuperästä:

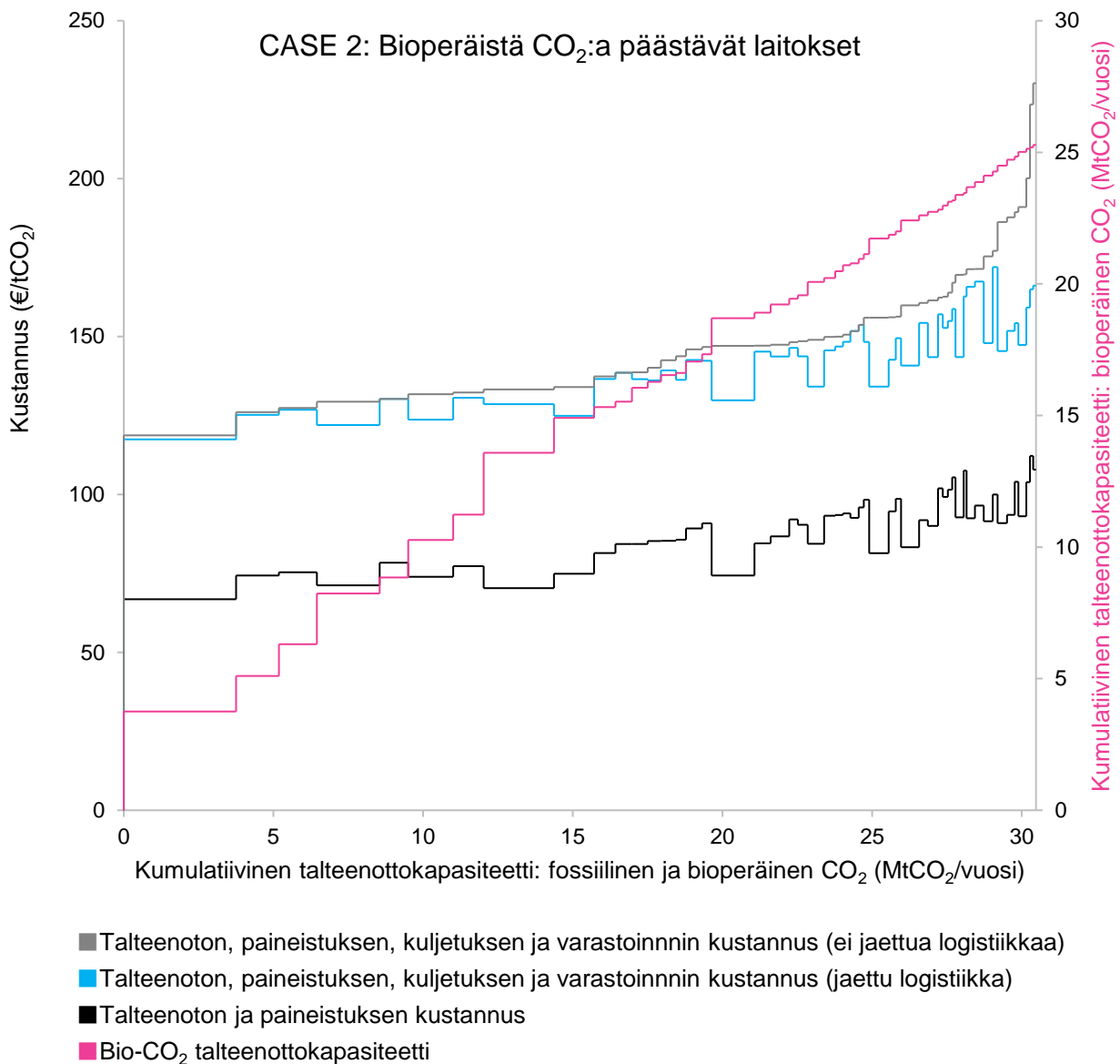
- CASE 1 sisältää kaikki teolliset laitokset riippumatta hiilidioksidipäästöjen luonnollisesta alkuperästä, sisältäen sekä fossiiliset ja bioperäiset päästöt.
- CASE 2 sisältää bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä päästävät laitokset, mutta kattaa myös fossiiliset päästöt niistä laitoksista, joissa on bioperäisten päästöjen lisäksi fossiilisia päästöjä.
- CASE 3 sisältää bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä päästävät laitokset ja talteenottokapasiteetti on mitoitettu kattamaan vain laitoksen bioperäiset päästöt eli kaikki fossiiliset päästöt on jätetty huomioimatta.

Näistä skenaarioista CASE 3 on keskeisin teknologisten hiilinielujen kannalta, sillä se kattaa vain bioperäisen hiilidioksidin. Kuvat 4, 5 ja 6 esittävät kustannusarviot hiilidioksidin talteenotolle, paineistukselle, kuljetukselle ja varastoinnille Suomen teollisissa päästölähteissä järjestyksessä edullisimmasta kalleimpaan eri skenaarioissa (CASE 1-3).



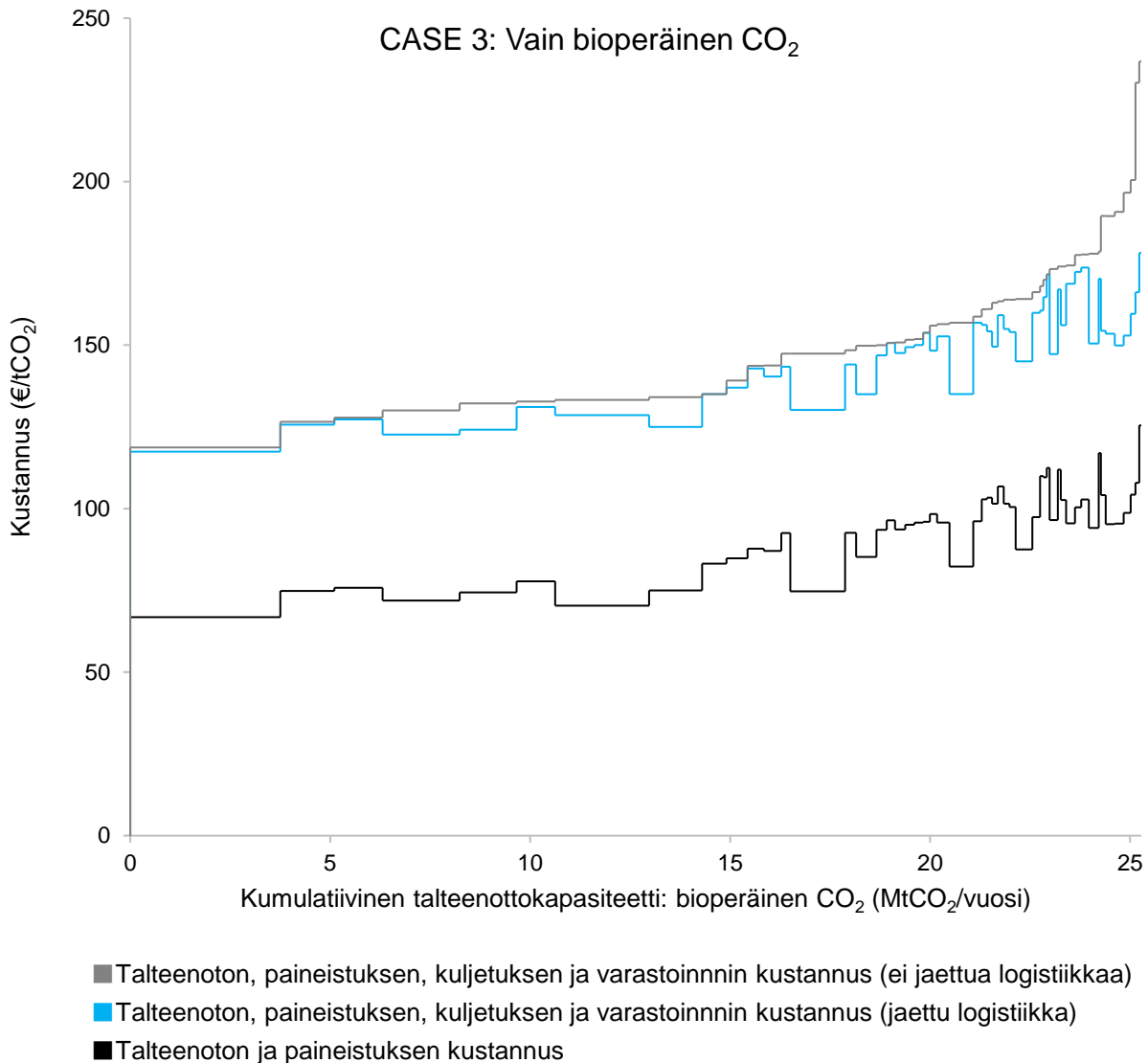
Kuva 4. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin rajakustannukset Suomessa, sisältäen kaikki teolliset laitokset riippumatta hiilidioksidipäästöjen luonnollisesta alkuperästä, sisältäen sekä fossiiliset ja bioperäiset päästöt.

Kun tarkastellaan kaikkia Suomen teollisia päästölähteitä, kumulatiivinen talteenottokapasiteetti on 39,9 Mt/vuosi, josta 25,3 Mt on bioperäistä hiilidioksidia. Arviot talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin sisältävistä yksikkökustannuksista näissä lähteissä vaihtelee välillä 119–230 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 117–172 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Kustannusten laitoskohtainen keskiarvo on 154 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 142 €/tCO₂ (jaettu logistiikka), kun taas painotettu (aritmeettinen) keskiarvo on 139 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 132 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Vuosittaisen talteenottokapasiteetin noustessa kustannukset nousevat hyvin maltillisesti, mitä selittää kustannuksiltaan edullisimpien laitosten samankaltaisuus: suuri mittakaava ja päästölähteiden samanlaiset ominaisuudet. Kustannukset nousevat merkittävästi vasta talteenottokapasiteetin loppuvaiheilla (>35 MtCO₂/vuosi), mitä selittää kustannuksiltaan kalleimpien laitosten pieni kokoluokka ja sisämaan sijainti. Erityisesti näissä kohteissa kustannukset voivat olla huomattavasti edullisemmat, jos laitoksilla on mahdollisuus hyödyntää jaettua logistiikkaa alueen muiden laitosten kanssa.



Kuva 5. Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin rajakustannukset Suomessa, sisältäen bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä päästävät laitokset, mutta kattaen myös fossiiliset päästöt niistä laitoksista, joissa on bioperäisten päästöjen lisäksi fossiilisia päästöjä.

Kun tarkastelusta poistetaan laitokset, joiden päästöt ovat kokonaan fossiiliperäisiä, tarkasteltujen laitosten kumulatiivinen talteenottokapasiteetti laskee 39,9 Mt/vuosi → 30,5 Mt/vuosi, josta edelleen 25,3 Mt on bioperäistä. Talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin kustannusten vaihteluväli pysyy samana: 119–230 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 117–172 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Laitoskohtainen keskiarvokustannus nousee hieman: 157 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 144 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Myös painotettu (aritmeettinen) keskiarvo nousee hieman: 141 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 133 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Kustannusten profiili säilyy samankaltaisena: ne nousevat lievän tasaisesti johtuen laitospäästöjen samankaltaisuudesta, kunnes kumulatiivisen talteenottokapasiteetin loppuvaiheilla nousu jyrkkenee merkittävästi laitosten pienen mittakaavan ja sisämaan sijainnin myötä.



Kuva 6. Hiilidioksidin talteenoton kuljetuksen ja varastoinnin rajakustannukset Suomessa, sisältäen vain teollisten laitosten bioperäiset hiilidioksidipäästöt.

Kun tarkastellaan vain bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä, kumulatiivinen talteenottokapasiteetti on 25,3 Mt/vuosi, josta kaikki on bioperäistä. Teknologisten hiilinielujen kustannusten vaihteluväli on 119—237 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 117—178 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). CASE 3:n osalta kustannus nousee niissä laitoksissa, joissa on sekä fossiilisia ja bioperäisiä päästöjä johtuen talteenottokapasiteetin pienenemisestä, kun fossiiliset päästöt jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Laitoskohtainen keskiarvokustannus nousee hieman: 161 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 149 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Painotettu (aritmeettinen) keskiarvo pysyy lähes muuttumattomana: 141 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 134 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Edelleen kustannusten profiili säilyy samankaltaisena: kustannukset nousevat lievästi tasaisesti johtuen laitospäästöjen samankaltaisuudesta, kunnes kumulatiivisen talteenottokapasiteetin loppuvaiheilla nousu jyrkkenee merkittävästi laitosten pienen mittakaavan ja sisämaan sijainnin myötä.

Taulukko 6 esittää tulokset teknologisten hiilinielujen yksikkökustannuksista Suomen teollisissa päästölähteissä.

Taulukko 6. Teknologisten hiilinielujen yksikkökustannus Suomen teollisissa päästölähteissä.

	CASE 1: Kaikki laitokset		CASE 2: Bioperäistä CO ₂ :a päästävät laitokset		CASE 3: Vain bio-CO ₂	
	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka
Vaihteluväli	119–230 €/tCO ₂	117–172 €/tCO ₂	119–230 €/tCO ₂	117–172 €/tCO ₂	119–237 €/tCO ₂	117–178 €/tCO ₂
Laitoskohtainen keskiarvo	154 €/tCO ₂	142 €/tCO ₂	157 €/tCO ₂	144 €/tCO ₂	161 €/tCO ₂	149 €/tCO ₂
Painotettu keskiarvo	139 €/tCO ₂	132 €/tCO ₂	141 €/tCO ₂	133 €/tCO ₂	141 €/tCO ₂	134 €/tCO ₂

4.2. Teknologisten hiilinielujen ja hiilidioksidin hyötykäytön kannattavuus valituissa tapauksissa

Työssä on laskettu tulot ja kustannukset kahdessa esimerkkitapauksessa teknologisille hiilinieluille sekä yhdessä esimerkkitapauksessa hiilidioksidin hyötykäytölle synteettisten polttoaineiden jalostuksessa. Esimerkkitausten laitostyytit, talteenottomäärät ja vaaditut kuljetusetäisyydet on esitetty taulukossa 7. Esimerkkitapauksiin on valittu hiilidioksidin lähteiksi teknologisten hiilinielujen (1, 2) osalta kaksi suurinta metsäteollisuuden laitosta rannikolta ja sisämaasta sekä hyötykäytön (3) tapauksessa suurehkon polttoaineentuotantoyksikön hiilidioksidintarvetta vastaava bioenergiailaitos. Tapausten avulla havainnollistetaan pääomakustannusten ja operatiivisten tulojen ja menojen suhdetta sekä laitoksen sijainnin vaikutusta kustannuksiin teknologisten hiilinielujen tapauksessa. Kiinteiden pääomakustannusten suuruuden perusteella arvioidaan sekä investoinnin vaatimaa pääomaa että investointituen kaltaisten tukitoimien enimmäisvaikutusta projektin talouteen. Lisäksi vertaillaan päästövähennyksen hintaa hiilidioksidin poiston ja hyötykäytön välillä.

Taulukko 7. Esimerkkitapausten kuvaukset.

Esimerkkitapaus	Kuljetusetäisyys (km)	Talteenottomäärä (MtCO ₂ /vuosi)
1: Talteenotto rannikolta metsäteollisuuden laitoksesta, kuljetus ja varastointi	Laiva: 2 200	3,7
2: Talteenotto sisämaasta metsäteollisuuden laitoksesta, kuljetus ja varastointi	Putki: 250 ja Laiva: 1 800	2,4
3: Talteenotto bioenergiailaitoksesta ja jalostus synteettiseksi polttoaineeksi	0	0,5

4.2.1. Talteenotto, kuljetus ja varastointi suurista laitoksista rannikolla ja sisämaassa

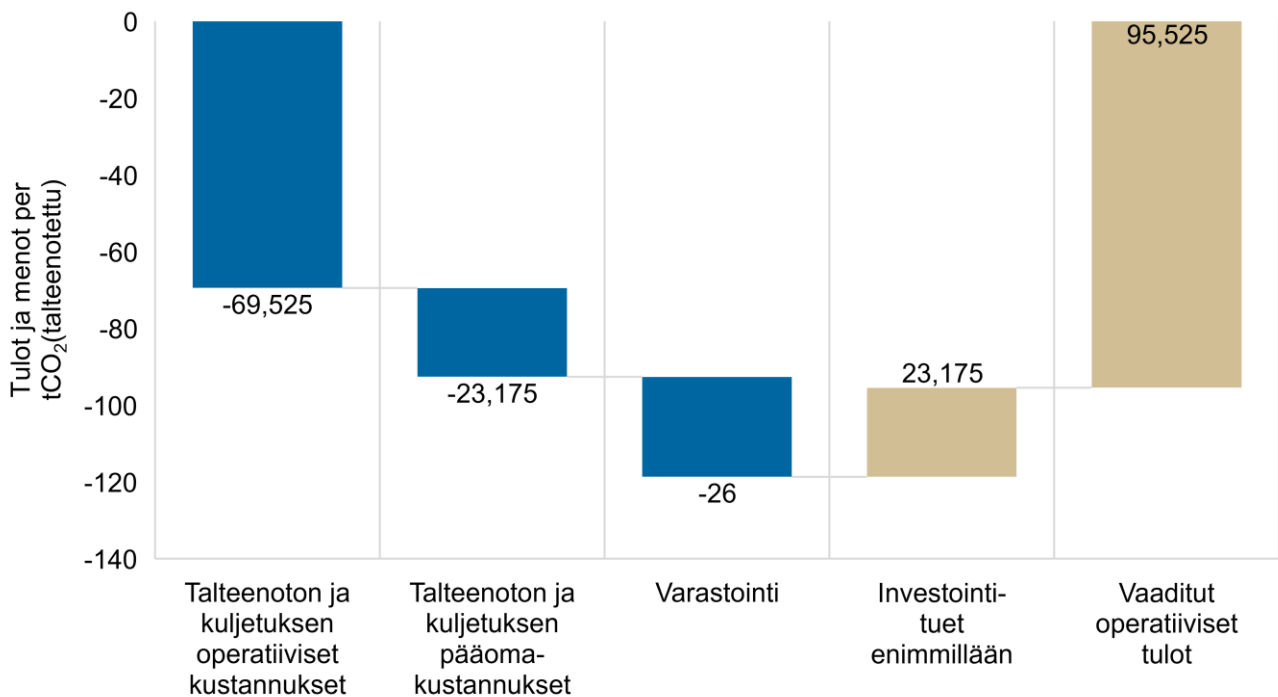
Esimerkitapauksissa talteenotetaan 2,4 MtCO₂/vuosi sisämaassa sijaitsevasta tehtaasta ja 3,7 MtCO₂/vuosi rannikolla sijaitsevasta tehtaasta geologisesti varastoitavaksi. Molempien laitosten talteenottomäärät ovat melko suuria, mikä tuo itsessään mittakaavaetuja talteenoton ja kuljetuksen kustannuksiin.

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kustannus on esimerkitapauksissa 119 €/tCO₂ rannikolta (kts. kuva 7) ja 133 €/tCO₂ sisämaasta (kts. kuva 8). Kustannusarvio perustuu edellä esitettyihin lähteisiin ja oletuksiin, ja laitokset on poimittu esitetystä talteenoton marginaalikustannuskäyrästä (kuva 4). Sisämaan talteenottolaitoksen tapauksessa kustannusta nostaa vaadittu putkikuljetus satamaan sekä rannikon esimerkitapaukseen verrattuna pienempi talteenottomäärä. Kustannusta laskee hieman lyhyempi laivakuljetusmatka.

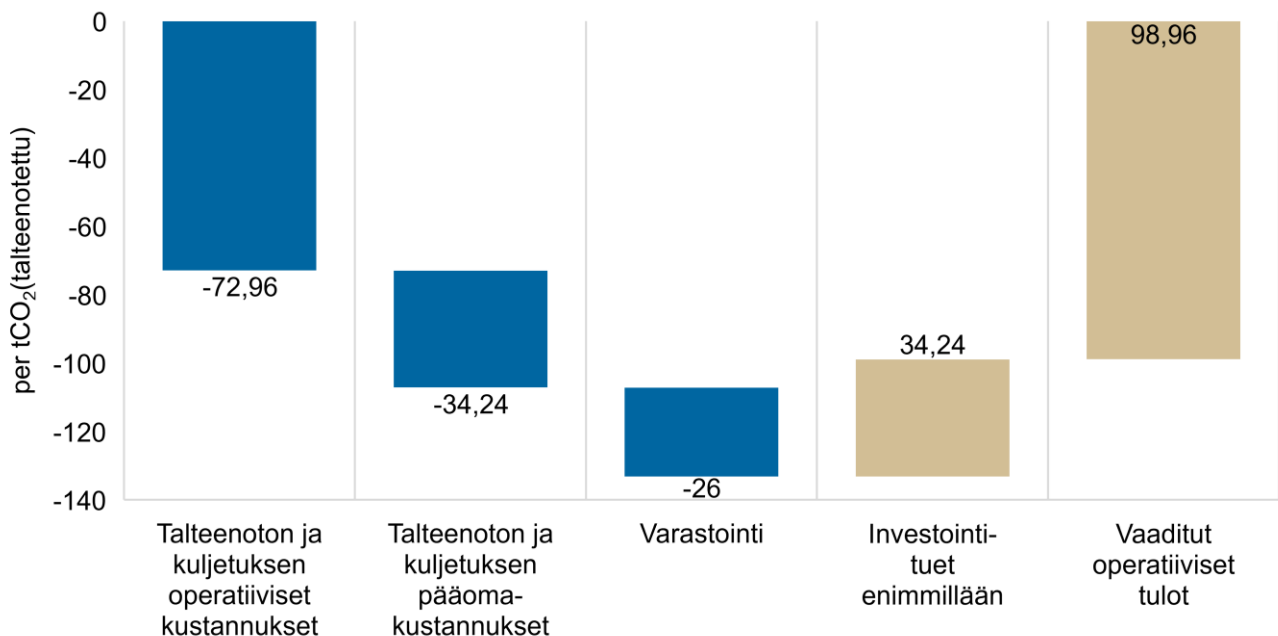
Pääomakustannusten arvio perustuu kirjallisuudessa esitettyihin pääomakustannuksiin talteenotto- ja kuljetuskustannuksissa. Talteenottoinvestoinnin pääomakustannuksen osuudeksi oletetaan 25 prosenttia yksikkökustannuksista (€/tCO₂), perustuen lähteisiin Roussanaly 2018 ja Ho 2011. Putkikuljetuksen oletettu pääomakustannusten vastaava osuus on 85 %, perustuen lähteisiin ZEP 2010 ja IEAGHG 2020. Laivakuljetuksen osalta oletetut pääomakustannukset ovat vastaavasti myös 25 prosenttia tasatuista kokonaiskustannuksista, lähteen IEAGHG 2020 mukaisesti. Kjærstad ym. (2016) esittämien arvioiden perusteella laivakuljetuksen kustannuksista suurempi osuus, noin 46 prosenttia voisi olla pääomakustannuksia. Tässä työssä on päädytty käyttämään uudempaa selvitystä.

Putkilinjan vaatiman merkittävän lisäinvestoinnin sekä pienemmän talteenottomäärän takia sisämaan laitoksen tapauksessa tasatut pääomakustannukset ovat kahdesta tapauksesta korkeammat, 34 €/tCO₂. Kotimaisella investointituella voidaan siis kattaa BECCS:n kustannuksista esimerkitapauksissa teoriassa enintään 20–26 prosenttia. Varastoidun hiilidioksidin on tuotettava investointituen suuruudesta riippuen vähintään 96–99 €/tCO₂.

Hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin investointikustannuksia on esitetty vähän julkisissa lähteissä, joten tässä työssä teknologian vaatimaa pääomaa arvioidaan talteenotettua hiilidioksiditonnia kohtaan tasatuista pääomakustannuksista, käyttäen investoinnin taloudellisena ikänä 20–30 vuotta ja korkona 5–8 prosenttia. Tällöin suuntaa antava arvio talteenottolaitoksen ja kuljetusverkon käsittävälle investoinnille on sisämaan talteenottolaitoksen tapauksessa 930–1030 M€ ja rannikon talteenottolaitoksen tapauksessa 970–1070 M€.



Kuva 7. Kustannukset ja tulot teknologisesta hiilinielusta esimerkkitapauksessa, jossa talteenottolaitos sijaitsee rannikolla, talteenottokapasiteetti on 3,7MtCO₂/vuosi ja hiilidioksidi varastoidaan geologisesti (BECCS). Investointituet kuvaavat suurinta mahdollista teoreettista tuloa investointituista (100 % pääomakustannuksista) ja operatiiviset tulot vaadittua tuloa jäljellä olevien menojen kattamiseksi.



Kuva 8. Kustannukset ja tulot teknologisesta hiilinielusta esimerkkitapauksessa, jossa talteenottolaitos sijaitsee sisämaassa, talteenottokapasiteetti on 2,4MtCO₂/vuosi ja hiilidioksidi varastoidaan geologisesti (BECCS). Investointituet kuvaavat suurinta mahdollista teoreettista tuloa investointituista (100 % pääomakustannuksista) ja operatiiviset tulot vaadittua tuloa jäljellä olevien menojen kattamiseksi.

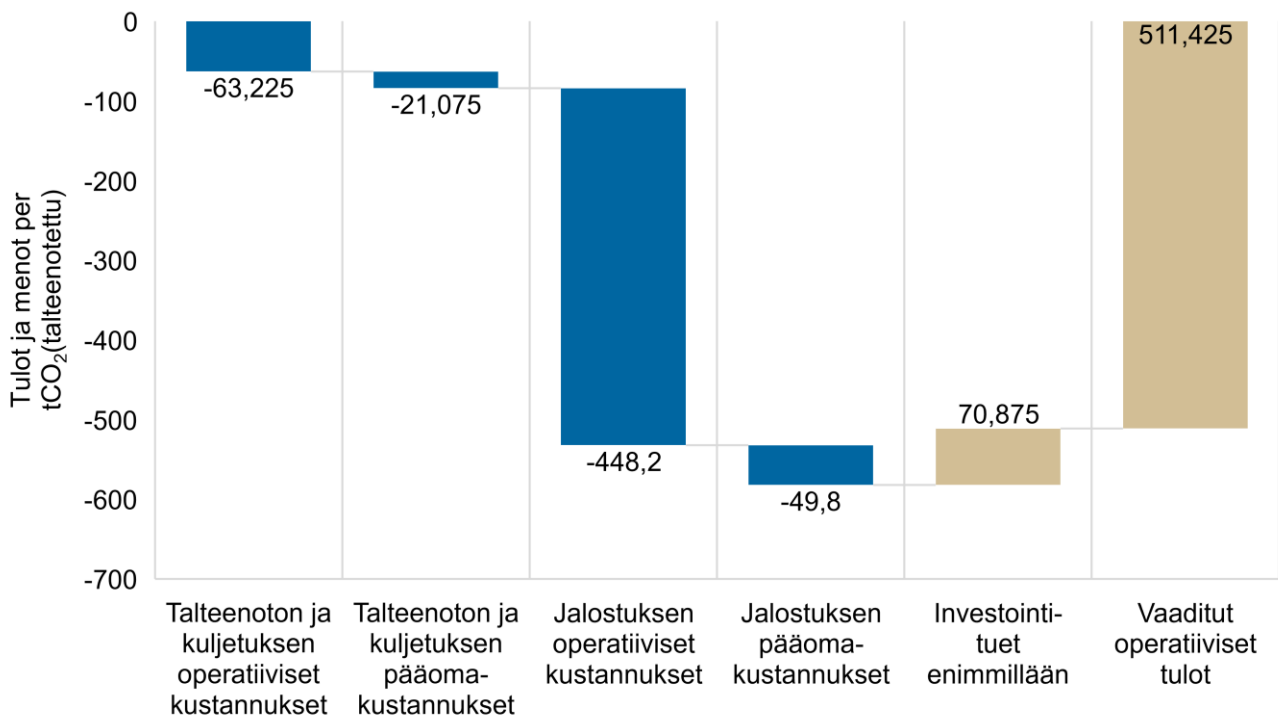
4.2.2. Hiilidioksidin talteenotto ja jalostus synteettiseksi polttoaineeksi

Kolmannessa esimerkkitapauksessa talteenotetusta hiilidioksidista varastoinnin sijaan valmistetaan vihreän vedyn avulla synteettistä polttoainetta. Tarkastelussa oletetaan, että talteenotettua hiilidioksidia ei kuljeteta, vaan jalostus tapahtuu samassa sijainnissa. Esimerkkitalpaukseen on valittu laitos, joka tuottaa bioperäistä hiilidioksidia 0,5 MtCO₂/vuosi. Yhden litran synteettistä polttoainetta tuottamiseen tarvitaan noin 3,25 kgCO₂ (Yugo & Soler 2019). Tällöin esimerkkitapauksessa tuotetaan 154 ML/vuosi synteettistä polttoainetta.

Synteettisen polttoaineen päästövähennyksen fossiilisen verrokin suhteen oletetaan olevan 97 prosenttia, perustuen vihreän vedyn avulla tuotetun polttoaineen päästökertoimeen 4 gCO₂/km ja fossiilisen polttoaineen päästökertoimeen 122 gCO₂/km (Yugo & Soler 2019). Edellä mainittuihin oletuksiin perustuen arvioitu päästövähennys liikenteessä on esimerkkitapauksessa 0,347 MtCO₂/vuosi.

Kustannusarvio hiilidioksidin talteenotosta ja jalostuksesta synteettiseksi polttoaineeksi on esimerkkitapauksessa 582 €/tCO₂ (kts. Kuva 9) tai 1,89 €/L polttoainetta. Hiilidioksidin talteenoton osalta kustannusarvio perustuu edellisessä kappaleessa esitettyihin oletuksiin. Synteettisen polttoaineen jalostuksen kustannukseksi on arviossa oletettu 1,62 €/L ilman hiilidioksidin talteenottoa, perustuen Yugo & Soler (2019) ja Martin ym. (2023) esittämiin ennakoiviin arvioihin. Martin ym. (2023) esittämiin arvioihin viitaten synteettisten polttoaineiden jalostuksen kustannukset muodostuvat 90 prosenttisesti muuttuvista kustannuksista, kuten sähkönkulutuksesta. Jalostuksen pääomakustannusten osuudeksi on siten tässä työssä myös oletettu kymmenen prosenttiyksikköä jalostuksen kustannuksista. Edellä mainituin oletuksin investointituella voidaan kattaa kyseisessä hyötykäyttötapauksessa teoriassa enintään 12 prosenttia kustannuksista. Samoin edellisessä kappaleessa etsityin oletuksin arvioitu suuntaa antava kokonaisinvestointi hiilidioksidin talteenotolle ja hyötykäytölle esimerkkitapauksessa on 400–440 M€.

Vertaamalla esimerkkitapauksen päästövähennyksen määrää (0,347 MtCO₂/vuosi) sekä lisäkustannusta verrattuna fossiilisen polttoaineen hintaan, saadaan esimerkkitapauksessa päästövähennyksen hinnaksi 328 €/tCO₂. Arviossa on oletettu fossiilisen polttoaineen verottomaksi hinnaksi 1,15 €/L, perustuen vuoden 2023 hintatasoon (Autoalan tiedotuskeskus 2023).



Kuva 9. 0,5 MtCO₂/vuosi synteettisten polttoaineiden valmistus. Kustannukset ja tulot hiilidioksidin hyötykäytöstä esimerkkitapauksessa, jossa talteenottokapasiteetti on 0,5 MtCO₂/vuosi ja hiilidioksidista jalostetaan synteettistä liikenteen polttoainetta (Bio-CCU). Investointituet kuvaavat suurinta mahdollista teoreettista tuloa investointituista (100 % pääomakustannuksista) ja operatiiviset tulot vaadittua tuloa jäljellä olevien menojen kattamiseksi.

4.3. Soveltuvimmat hiilidioksidin lähteet teknologisille nieluille

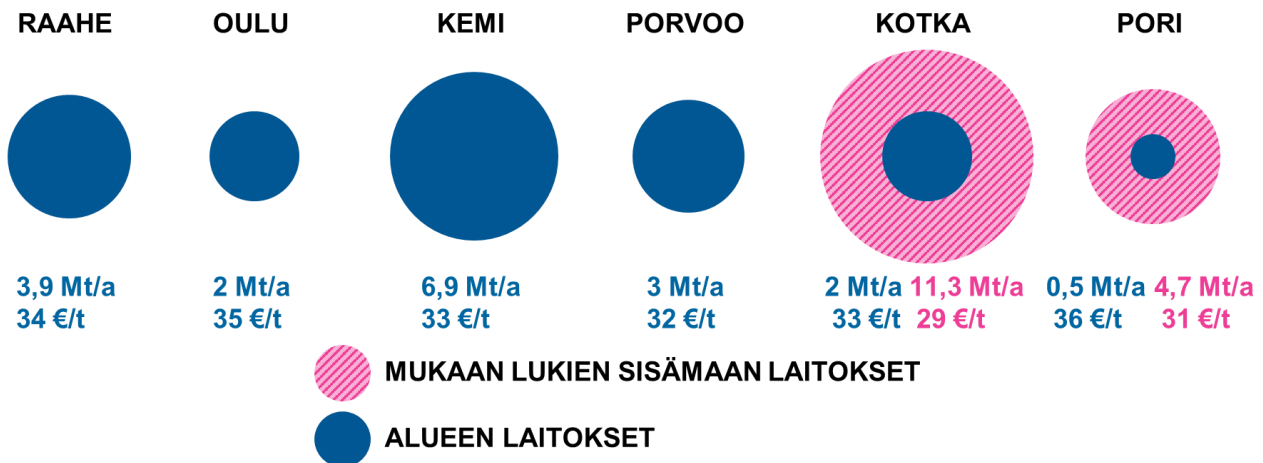
Mahdollisten varastoalueiden sijaitessa Pohjanmeren alueella, teknologisten nielujen kustannusten kannalta parhaimmat talteenottolaitokset sijaitsisivat Suomen rannikolla. Esitetyn hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin rajakustannuskäyrän (kts. kuva 4) mukaisesti yksikkökustannus on edullisempi rannikon laitosten tapauksessa, jossa vältetään hiilidioksidin putkikuljetuksen kustannuksista. Investointikustannusten kasvun lisäksi putkikuljetus sisämaasta rannikolle lisää hiilidioksidin kuljetuksen kompleksisuutta sekä mahdollisesti investoinnin suunnittelun ja luvituksen haasteita.

Hiilidioksidin talteenoton ja kuljetuksen kustannuksiin vaikuttaa hiilidioksidin määrä ja kuljetusmatka. Talteenoton kustannuksiin vaikuttaa lisäksi hiilidioksidin osapaine ennen talteenottoa. Hiilidioksidin määrän kasvaessa tasatut kustannukset laskevat mittakaavaedun myötä. Lasku on erityisen voimakasta putkikuljetuksessa alle 0,5–1,0 MtCO₂/vuosi tasolla (GCCSI 2021). Suomessa on yhdeksän laitosta, joiden bioperäiset hiilidioksidipäästöt ovat suuruudeltaan yli 1,0 MtCO₂/vuosi. Näistä suurista laitoksista viisi joutuisi investoimaan putkilinjaan hiilidioksidin kuljettamiseksi satamaan. Yhteensä kyseisistä laitoksista voidaan talteenottaa bioperäistä hiilidioksidia rannikolta 7,3 MtCO₂/vuosi ja sisämaasta 8,4 MtCO₂/vuosi. Kymmenen kustannuksiltaan edullisimman laitoksen keskimääräinen päästömäärä on CASE 1:n (kaikki laitokset) osalta 1,8 Mt/vuosi ja CASE 2:n (bioperäistä hiilidioksidia päästävät laitokset) osalta 1,6 Mt/vuosi. Kustannuksiltaan edullisimmat laitokset ovatkin pitkälti valmistavan teollisuuden laitoksia, joissa suuri laitostekoko on tuotannon mittakaavaetujen takia yleistä. Bioperäisten laitosten osalta erityisesti metsäteollisuus korostuu edullisimpien laitosten joukossa.

Suomen rannikolla on useita alueita, joissa on lähekkäin sijaitsevien laitosten muodostama yli 1,0 MtCO₂/vuosi-kokoluokan bioperäisen ja fossiilisen hiilidioksidin päästökeskittymä (kts. Kuva 10). Näistä päästökeskittymistä olisi siis myös pienten talteenottolaitosten mahdollista hyötyä kuljetuskustannuksia laskevasta mittakaavaedusta, kun kuljetusjärjestelmä jaetaan usean talteenottolaitoksen kesken. Bioperäisen hiilidioksidin merkittäviä keskittymiä rannikolla ovat Kemi (5,8 MtCO₂/vuosi), Oulu (1,6 MtCO₂/vuosi) ja Kotka (1,7 MtCO₂/vuosi). Kotkan lisäksi Porin alue olisi mahdollinen keskus, jonne tuotaisiin hiilidioksidia sisämaan laitoksista edelleen laivattaviksi varastoalueelle. Teoriassa Kotkan kautta voisi kulkea bioperäistä hiilidioksidia 9,8 MtCO₂/vuosi ja Porin kautta 4,0 MtCO₂/vuosi, mutta tähän mittakaavaan pääsyn esteenä olisi todennäköisesti putkikuljetuksen korkea hinta osalle laitoksista.

Hiilidioksidin talteenottoinvestoinnit voidaan toteuttaa nykyisiin laitoksiin jälkiasenteisesti tai uusien laitosten rakennuksen yhteydessä. Kustannusten lisäksi talteenottoinvestointien realisuuteen vaikuttaa nykyisten laitosten odotettu jäljellä oleva käyttöikä sekä laitosten omistajien nykyiset ja tulevat päätökset laitosten suhteen. Tästä on haastavaa luoda näkymää pelkän julkisen tiedon avulla. Otollisina lähteinä bioperäiselle hiilidioksidille voidaan pitää ainakin uusia laitoksia, joilla on vielä pitkä käyttöikä jäljellä. Energiantuotannossa ja valmistavassa teollisuudessa laitosten tekninen käyttöikä on tyypillisesti useita vuosikymmeniä, keskimäärin noin 30–40 vuotta, jonka jälkeen vaaditaan täydellinen remontti tai merkittäviä uudistavia investointeja, jos tuotantoa halutaan jatkaa. Kaikkien työssä tarkasteltujen laitosten jäljellä olevaa teknistä käyttöikää ei voitu arvioida monimutkaisten laitoskokonaisuuksien käyttöiän arvioinnin haasteellisuuden takia. Kuitenkin tarkastellessa yksikkökustannuksiltaan kymmentä edullisinta bioperäistä hiilidioksidia päästävää laitosta, nähdään, että lyhyt jäljellä oleva tekninen käyttöikä ei vaikuta suurelta riskiltä teknologisten hiilinielujen käyttöönoton kannalta, sillä suurimpaan osaan näistä laitoksista on tehty lähivuosina teknistä käyttöikää pidentäviä investointeja ja uudistuksia ainakin joidenkin tuotantolinjojen osalta tai sitten laitokset ovat verrattain uusia (käynnistetty viimeisen 10 vuoden sisään).

HIILIDIOKSIDIN SAATAVUUS (FOS.+BIO) JA KULJETUSKUSTANNUKSET RANNIKOLTA



Kuva 10. Hiilidioksidipäästöjen keskittymiä Suomen rannikolla sekä mahdolliset satamat sisämaasta kuljetettavalle hiilidioksidille. Kuljetusmäärissä on mukana fossiilinen ja bioperäinen hiilidioksidi.

5. TUKIMEKANISMIT TEKNOLOGISILLE HIILINIELUILLE

Teknologisten hiilinelujen toteuttamiseen ei tällä hetkellä ole suoria taloudellisia kannustimia Suomessa, lukuun ottamatta vapaaehtoisia päästömarkkinoita (Laine ym. 2023, Laininen ym. 2022). Teknologisista hiilineluista ei esimerkiksi saa suoraa rahallista hyötyä EU:n päästökaupassa, eikä niille ole toistaiseksi luotu muita EU:n laajuisia tukijärjestelmiä (lukuun ottamatta joitakin myönnettyjä investointitukia). Tällä hetkellä BECCS:n tuoma päästövähennyshyöty huomioitaisiin IPCC:n päästöinventaariorhjeiden (EU 525/2013) mukaisesti Suomen kokonaispäästöjä vähentävästi YK:n päästöinventaariossa. Koska taakanjakosektorin päästöt lasketaan poistamalla inventaarin kokonaispäästöistä ETS-sektorin päästöt, näkyisi hyöty BECCS-hankkeista tällöin taakanjakosektorilla (Kujanpää ym. 2023). Euroopan komissio selvittää parhaillaan vapaaehtoisia sertifiointijärjestelmiä hiilidioksidin poistomekanismeille¹. Selvitystyötä tukemaan on koottu ryhmä asiantuntijoita (Expert group on carbon removals).² Lisäksi EU:n ETS-direktiivissä (2023/959) todetaan, että Euroopan komission tulee vuoden 2026 heinäkuun loppuun mennessä raportoida Euroopan parlamentille ja EU:n neuvostolle siitä, miten "ilmakehästä poistettavien ja turvallisesti ja pysyvästi varastoitavien kasvihuonekaasujen aikaansaamat negatiiviset päästöt" voitaisiin ottaa huomioon päästökaupassa.

Suomessa Petteri Orpon hallituksen ohjelmaan on kirjattu, että teknologisten hiilinelujen käyttöönottoa ja investointeja tuetaan ja tukijärjestelmiä selvitetään. Selvityksen pohjalta otetaan käyttöön "negatiivisten päästöjen huutokauppa tai vastaava mekanismi" (Valtioneuvosto 2023).

Tässä työssä esitetään lyhyt katsaus käänteisestä huutokauppajärjestelmästä, eli tarjouskilpailusta, jota Ruotsi on ottamassa käyttöön BECCS-teknologioille. Suomessa työ- ja elinkeinoministeriö on vuonna 2016 julkaissut laajan selvityksen, jossa käsitellään erilaisia tarjouskilpailumalleja uusiutuvan energian tuotannon tukemiseen (TEM 2016). Nämä mallit vertautuvat Ruotsin käänteiseen huutokauppajärjestelmään ja myös niiden soveltuvuutta teknologisille hiilineluille arvioidaan lyhyesti.

5.1. Ruotsin malli käänteisestä huutokaupasta BECCS hankkeille

5.1.1. Taustaa

Ruotsissa on voimassa hiilineutraaliustavoite vuodelle 2045, sisältäen 85 prosentin päästövähennystavoitteen (verrattuna vuoden 1990 päästöihin). Lopputavoite katetaan niin sanotuilla lisätoimilla, joilla voidaan päästä myös nettonegatiivisiin päästöihin. Hiilineutraaliustavoitteeseen ei sisällytetä nykyistä LULUCF-sektorin nielua, vaan siihen lasketaan ainoastaan sellainen metsänielun kasvu, joka saavutettaisiin lisäksi toimilla (esim. parantuneilla metsänhoidon käytännöillä). Lisäksi lisätoimiksi lasketaan verifioidut päästövähennykset ulkomailla sekä BECCS:lla tuotetut "negatiiviset päästöt". Lisätoimia voidaan hyväksyä hiilineutraaliustavoitteeseen vuonna 2030 3,7 MtCO₂ (josta 1,8 Mt voisi tulla BECCS:sta), ja vuonna 2045 10,7 MtCO₂ (josta 3–10 Mt voisi tulla BECCS:sta). Ruotsissa ei ole määritetty erillistä tavoitetta hiilidioksidin poistolle tai negatiivisille päästöille (Energimyndigheten 2021).

Ruotsi on päättänyt käynnistää käänteisen huutokaupan BECCS:lla tuotetuille negatiivisille päästöille. Kaupan valmistelusta on vastuussa paikallinen energiaviranomainen (Energimyndigheten). Kaupan oli tarkoitus

¹ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en

² https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/expert-group-carbon-removals_en Asiantuntijaryhmän kokouksessa 10/2023 esiteltiin erilaisia vapaaehtoisia sertifiointijärjestelmiä teknologisille hiilineluille.

käynnistyä vuonna 2022, mutta käynnistyminen on viivästynyt tukijärjestelmän valmistelu- ja selvitystöiden vaatiman ajan sekä Euroopan komissiolta valtioneuvostojärjestelmälle tarvittavan hyväksynnän takia. Tällä hetkellä (11/2023) arvioidaan, että kauppa voidaan käynnistää viimeistään kuuden kuukauden päästä siitä, kun Euroopan komissio on ilmoittanut päätöksensä valtioneuvostojärjestelmän hyväksymisestä (Energimyndigheten 2023a).

Käänteisessä huutokaupassa eli tarjouskilpailussa valtio kutsuu toimijoita tekemään tarjouksia negatiivisten päästöjen tuottamisesta ja esittämään siihen liittyvät korvauspyynnöt. Valtio valitsee kilpailun voittajiksi ne toimijat, jotka tuottavat halvimmalla lupaamansa määrät negatiivisia päästöjä. Ruotsin energiaviranomaiselle on myönnetty huutokauppaa varten yhteensä 36 miljardia kruunua (noin 3,3 miljardia €) vuosien 2026–2046 väliselle jaksolle. Käytössä on korkeintaan 1,7 miljardia kruunua vuodessa (noin 144 M€). Tuki jaetaan yhdessä tai useammassa huutokaupassa (Energimyndigheten 2021).

Yhden huutokaupan sisällä tuki voidaan jakaa kolmeen jaksoon (BECCS-hankkeen suunnittelu, rakennusvaihe ja käyttö). Käyttövaiheen tukijaksoksi on suunniteltu 15 vuotta. Lisäksi toimijoiden on arvioitu tarvitsevan kolme vuotta laitoksen rakentamiseen, hiilidioksidin kuljetus- ja varastointilogistiikan kehittämiseen sekä neuvotteluihin ja sopimusten tekoon hiilidioksidin pysyvästä varastoinnista. Koko tukijakson on arvioitu kestävän noin 18 vuotta ja 7 kuukautta.

Käänteisen huutokaupan tuella tuotetut teknologisia hiilinieluista syntyvät päästövähennykset kuuluvat Ruotsin valtiolle. Ruotsin energiaviranomainen on kuitenkin ehdottanut, että tukea saavien yritysten tulee olla mahdollista myydä ”negatiivisia päästöjä” myös vapaaehtoisille markkinoille niin sanottuina ”ilmastotekoväittäminä” (contribution claim). Tällaisessa tapauksessa huutokaupasta saatavaa tukea alennetaan myyntihinnan mukaisesti. Tuplalaskennan välttämiseksi myyjän on informoitava ”negatiivisten päästöjen” ostajaa siitä, että päästövähennys on jo huomioitu Ruotsin valtion päästövähennyksenä. Ostaja voi siis raportoida edistävänsä Ruotsin ilmastotavoitteiden saavuttamista, mutta ei kompensoida omia päästöjään. (Energimyndigheten 2023b)

5.1.2. Huutokauppaan osallistuvat hankkeet

Ruotsin käänteiseen huutokauppaan hyväksytään aluksi ainoastaan BECCS-hankkeita, joissa hiilidioksidi varastoidaan geologisiin, pysyviin varastoihin. Kauppaan voivat osallistua yritykset, joilla on bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä CHP-laitoksilta, paperi- tai selluntuotannosta tai muilta teollisuuslaitoksilta.

Myös biohiilen sisällyttämistä huutokauppajärjestelmään oli valmisteluvaiheessa selvitetty, mutta se oli toistaiseksi jätetty kaupan ulkopuolelle. Tähän vaikutti pieni hankekoko sekä haasteet hiilidioksidin poiston verifiointissa. Keskenään hyvin erilaiset hankkeet, kuten teollisen mittakaavan BECCS ja pienemmän mittakaavan biohiililaitokset, nähtiin myös mahdollisena ongelmana huutokauppamekanismin toimivuuden kannalta.

Alustavassa selvityksessään Ruotsin energiaviranomainen on määritellyt hakuun osallistujan vaatimukset seuraavasti. Hakuun osallistujan tulee:

- olla laitoksen omistaja,
- määritellä tarjouksen koko tonneina hiilidioksidia (10 000 t CO₂ kerrannaisina),
- määritellä tarvittavan tuen määrä per hiilidioksiditonni Ruotsin kruunuina,
- selvittää saamansa muut investointituet ja jätetyt tukihakemukset (esim. EU:lta tai Idustriklivet:ltä).

Energiaviranomaisen alustava suositus on, että ensimmäisessä huutokaupassa tarjousten koko on vähintään 50 000 tonnia hiilidioksidia. Ensimmäiseen huutokauppaan suositellaan annettavaksi pidempi tarjousten jättöaika, jotta mahdollisimman monella yrityksellä on mahdollisuus osallistua huutokauppaan.

Jotta yritykset voivat osallistua huutokauppaan, niiden tulee toteuttaa projektisuunnittelu CCS-laitokselle hiilidioksidin erottamiskustannusten arvioimiseksi. Tämä voi olla rasitus erityisesti pienille toimijoille. Siksi yritysten on tärkeää saada tukea ja koulutusta ennen huutokaupan alkamista. Säännöllisesti toistuvat huutokaupat voivat vähentää tätä ongelmaa (Energimyndigheten 2021).

5.2. Käänteisen huutokaupan tai vastaavan tukimekanismin soveltuvuus Suomeen

5.2.1. Soveltuvuus Suomeen

Suomen olosuhteet teknologisten hiilinielujen tuottajana ovat melko yhteneväiset Ruotsin kanssa, sillä molemmilla mailla on merkittävää potentiaalia BECCS-hankkeille bioperäisten hiilidioksidipäästöjen ansiosta (CHP-laitokset ja sellu- ja paperiteollisuus). Molemmissa maissa hiilidioksidin pysyvä varastointi isossa mittakaavassa tapahtuisi todennäköisesti maan rajojen ulkopuolella.

Tässä selvityksessä on kartoitettu realistista BECCS-potentiaalia Suomessa. Tulosten perusteella voidaan karkeasti arvioida, että Suomessa on useita laitoksia, joissa BECCS:n toteuttamisen alustavat kustannusarviot vaihtelevat välillä 120–150 €/t CO₂ (vrt. päästöoikeuden hinta EU:n päästökaupassa on vuonna 2023 vaihdellut tasolla 80–100 €/t CO₂). Taulukossa 8 listataan esimerkkikustannuksia huutokaupalle eri korvaustasoilla sekä eri teknologisten hiilinielujen tavoitteilla. Vaadittavaan korvaukseen voisi vaikuttaa muut mahdolliset investointituet, sekä toimijoiden mahdollisuus ”tuotteistaa negatiivisia päästöjä” vapaaehtoisilla markkinoilla ilmastotekoväittämien muodossa (vrt. Ruotsin malli).

Käänteiselle huutokauppajärjestelmälle on eri yhteyksissä listattu erilaisia hyötyjä ja haasteita. Taulukossa 9 listataan eri näkökohtia, ja arvioidaan niiden oleellisuutta Suomen kannalta.

Taulukko 8. Käänteisen huutokaupan kokonaiskustannukset eri korvaustasoilla.

	Tavoiteltu teknologinen nielu: 1,5Mt CO ₂	Tavoiteltu teknologinen nielu: 3Mt CO ₂	Tavoiteltu teknologinen nielu: 6Mt CO ₂
Korvaus €/tCO ₂	Kokonaiskustannus M€/ vuosi	Kokonaiskustannus M€/ vuosi	Kokonaiskustannus M€/ vuosi
100	150	300	600
120	180	360	720
150	225	450	900

Taulukko 9. Käänteisen huutokaupan etuja ja haasteita sekä huomioita Suomen tilanteesta.

Käänteisen huutokaupan etuja	Erytishuomiot Suomen tilanteesta
Potentiaalisesti kustannustehokas tapa käynnistää BECCS-projekteja. Kilpailuttamalla saadaan selville kulloinkin ajantasainen hinta hiilidioksidin talteenotolle ja varastoinnille.	Kustannustehokkuus ei toteudu hyvin, jos huutokauppaan osallistuu liian vähän toimijoita. Suomessa on paljon potentiaalisia osallistujia, mutta ovatko BECCS-projektit heillä investointipäätösten kärjessä?
Valtio voi hallita järjestelmän kustannuksia, eli päättää jaettavasta kokonaissummasta ennakoon.	
Mahdollisuus järjestää useampia huutokauppakierroksia, jolloin esim. kattohinnan säätö on mahdollista. Näin minimoidaan riski siitä, että viranomainen arvioi hinnan väärin ja talteenotolle maksetaan liikaa korvausta teknologian ripeän kehittymisen takia.	Mahdollistaa sopeutumisen muuttuviin teknologiakustannuksiin sekä muun politiikan kehitykseen (esim. EU:n tukitoimet teknologisille nieluille).
Käänteisen huutokaupan haasteita	Erytishuomiot Suomen tilanteesta
Kauppaan osallistuminen vaatii toimijoilta merkittäviä ja resursseja vieviä valmisteluja.	Voi vähentää huutokauppaan osallistujien määrää Suomessa, erityisesti pienten toimijoiden osalta.
Jos kauppaan osallistuu ainoastaan muutamia toimijoita, kustannustehokkuutta on vaikea saavuttaa.	Tämä tilanne on Suomessa mahdollinen, jos osallistujina olisi esimerkiksi vain isompia yhtiöitä. Yritysten kiinnostus voi kohdistua hiilidioksidin hyötykäyttöön, joka nähtäisiin parempana tulonlähteenä.
Jos kauppa rajataan vain BECCS-hankkeille, teknologianeutraalius ei toteudu.	Eri hankkeiden teknologianeutraali kohtelu olisi suotavaa, mutta voi käytännön syistä olla haastavaa. Huutokauppajärjestelmä voitaisiin mahdollisesti toteuttaa erikseen erityyppisille hankkeille.

Käänteisen huutokaupan tai muun tukimekanismin toteuttamista arvioitaessa olisi hyvä huomioida ainakin seuraavia näkökohtia:

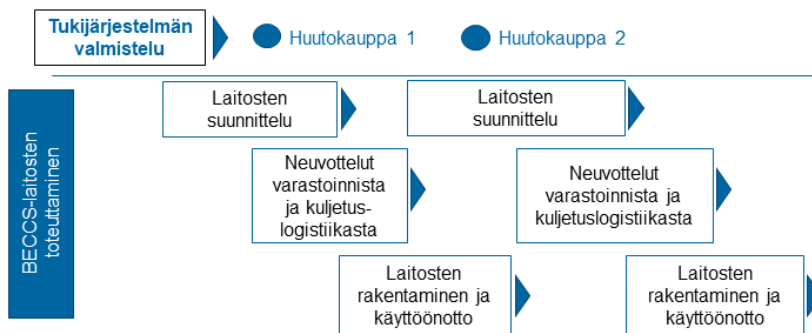
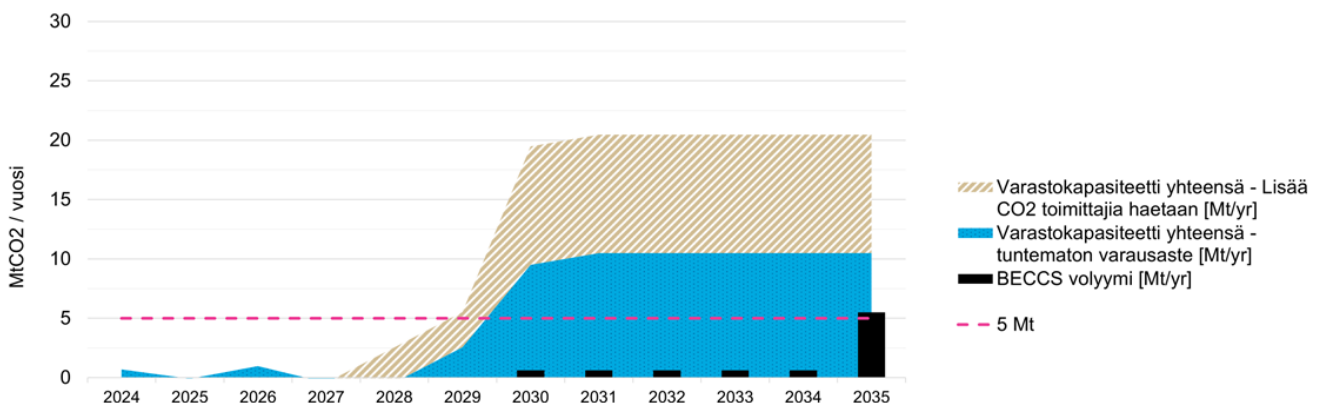
- Mahdollisten osallistujien määrä ja investointihalukkuus
- Teknologianeutraalius
 - Ruotsin järjestelmään otettiin mukaan vain BECCS geologisella varastoinnilla. Biohiiltä harkittiin, mutta se jätettiin ulkopuolelle pienen hankekoon ja verifiointin vaikeuksien takia.
 - Suomessa merkittävin teknologisten hiilinielujen potentiaali on BECCS:n soveltamisessa. Isossa mittakaavassa pysyvä varastointi perustuisi todennäköisesti geologisiin varastoihin, mutta pienemmässä mittakaavassa myös mineralisaatiolla toteutettavat varastot olisivat mahdollisia.
 - Mahdollisia teknologioita kehitteillä tai jo toiminnassa olevia teknologioita ovat esimerkiksi:
 - Biohiilen tuotanto

- Hiilen karbonointi betoniin
 - Muut CCU-sovellukset pitkäikäisillä varastoilla (esim. rakennusmateriaalit)
- Huutokauppajärjestelmään tai muuhun tukimekanismiin olisi mahdollista sisällyttää muitakin kriteereitä tai painotuksia kuin hinta.
- Erityisesti BECCS-hankkeiden kohdalla käytetyn biomassan kestävyuden takaaminen myös tulevaisuudessa on oleellista. Tässä voisi soveltuvien osin huomioida esimerkiksi EU:n RED-direktiivin kestävyyskriteeristön (EU 2023/2413).
- Hankkeissa toteutuva hiilidioksidin poisto tulisi varmistaa esimerkiksi elinkaarilaskennan keinoin niin, että hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin päästöt huomioidaan.
- Hiilidioksidin varastoinnin pysyvyys tulee varmistaa, vastuu varaston valvonnasta selvittää ja mahdolliset vuodot huomioida.

5.2.2. Kuvitteellinen esimerkki toteutusaikataulusta

Teknologisten hiilinielujen tukimekanismin kehittäminen ja itse hankkeiden suunnittelu sekä toteuttaminen vievät aikaa. Alla olevassa kuvitteellisessa esimerkissä (kuva 11) on hahmoteltu sitä, miten teknologisten hiilinielujen hankkeita voisi lähteä Suomessa liikkeelle ja miten aikataulujen tulisi edetä, jotta hankkeita saataisiin toteutumaan 2030-luvun alkupuolella.

Esimerkissä kuvataan tapausta, jossa ensimmäisestä huutokaupasta korvausta saisi ja toteutuisi kolme pientä (alle 0,3Mt) BECCS-hanketta, ja toisesta huutokaupasta korvausta saisi kaksi pientä ja yksi isompi BECCS-hanke (yht. 4Mt). Hankkeiden kapasiteettia on verrattu vapaana olevaan varastokapasiteettiin.



Kuva 11. Kuvitteellinen aikataulusimerkki teknologisten hiilinielujen hankkeiden edistämisestä. (Aikataulua arvioitu GCCSI 2023 kuvan 14 mukaisesti).

5.2.3. Aiemmat tarjouskilpailumallit Suomessa

Työ- ja elinkeinoministeriö on vuonna 2016 julkaissut laajan selvityksen erilaisista tarjouskilpailumalleista uusiutuvalla energialla (TEM 2016). TEM:n raportissa vertaillaan erilaisia tarjouskilpailumalleja ja niiden etuja ja haittoja (kappale 5). Raportissa tarkastellaan suljettua tarjouskilpailua, laskevaa tai nousevaa tarjouskilpailua sekä mallien yhdistelmiä. Suljettu tarjouskilpailu nähdään yksinkertaisimpana toteuttaa ja houkuttelevana laajemmalle joukolle hankekehittäjiä. Sen myös todetaan toimivan, vaikka kilpailua on vähemmän. Näistä syistä se voisi mahdollisesti olla paras vaihtoehto teknologisten hiilinielujen tapauksessa.

Lisäksi raportissa pohditaan kilpailutuksen suunnittelua, kuten hankekehittäjiä koskevia edellytyksiä, hankkeita koskevia edellytyksiä, tarjouksia koskevia reunaehtoja, strategisten tarjousten riskejä sekä tarjouskilpailun voittaneen hankkeen toteutumista. Nämä pohdinnat ovat soveltuvien osin hyödynnettävissä myös teknologisten hiilinielujen hankkeille.

Energiaviraston toteuttama uusiutuvan sähkön preemiojärjestelmä vuonna 2018 perustui TEM:n raportin selvitykseen (Energiavirasto 2018). Myös preemiojärjestelmän toteuttamisperiaatteita voisi mahdollisesti soveltuvien osin soveltaa teknologisille hiilinieluille. Teknologisten hiilinielujen toteuttaminen eroaa kuitenkin vuoden 2018 tilanteesta uusiutuvan sähkön tuotannon hankkeiden toteuttamiseksi, esimerkiksi seuraavilta osin:

- Teknologisten hiilinielujen teknologiat ovat toistaiseksi vielä vähän käytettyjä, kun taas uusiutuvan sähkön tuotantoteknologiat olivat vuonna 2018 jo kypsiä ja kokemusta erityyppisistä hankkeista oli kertynyt paljon.
- Teknologisten hiilinielujen hankkeiden todellinen kustannus on vaikeammin arvioitavissa toimijoille (ensimmäiset sovelluskohteet, esim. BECCS metsäteollisuudessa).
- Uusiutuvan sähkön tuotantoprosessit ovat yksinkertaisempi kokonaisuus kuin hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. Hiilidioksidin kuljetus- ja varastointilogistiikkaan liittyvät epävarmuudet voivat lisätä kustannusarvion epävarmuutta.

6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1. Teknologisten hiilinielujen kustannukset

Tarkastelun perustella geologiseen varastointiin perustuvien teknologisten hiilinielujen yksikkökustannukset Suomen teollisissa päästölähteissä (taulukko 6), sisältäen hiilidioksidin talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin, vaihtelee välillä 119—237 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 117—178 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Kustannusten laitoskohtainen keskiarvo vaihtelee skenaariosta riippuen välillä 157—161 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 142—149 €/tCO₂ (jaettu logistiikka), kun taas painotettu (aritmeettinen) keskiarvo vaihtelee välillä 139—141 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 132—134 €/tCO₂ (jaettu logistiikka).

Climate Action Task Force (CATF 2023) on kehittänyt työkalun CCS:n kustannusten arvioimiseen päästörekiisteriin kuuluvissa Euroopan päästölähteissä (>100 ktCO₂/a). CATF:n työkalun mukaan CCS:n kustannus Suomen päästölähteissä olisi eri skenaarioissa seuraavanlainen:

- 184–235 €/tCO₂ (korkea kustannusarvio, ei uutta putki-infraa, lyhyt aikajänne)
- 137–189 €/tCO₂ (korkea kustannusarvio, uusi putki-infra mahdollinen, pitkä aikajänne)
- 109–200 €/tCO₂ (matala kustannusarvio, uusi putki-infra mahdollinen, lyhyt aikajänne)
- 87–118 €/tCO₂ (matala kustannusarvio, uusi putki-infra mahdollinen, pitkä aikajänne)

CATF:n työkalulla arvioidut kustannukset ovat käytetyistä skenaarioista riippuen joko optimistisemmat tai pessimistisemmät kuin tässä työssä arvioidut kustannukset. Kustannusarviot ovat lähellä toisiaan silloin, kun skenaariona käytetään mahdollisuutta uuteen putkikuljetusinfrastruktuuriin ja joko korkeaa kustannusarvioita ja pitkää tarkasteluajakäynnä tai matalaa kustannusarvioita ja lyhyttä tarkasteluajakäynnä.

Johnsson ym. (2020) arvioivat amiinipesuun (MEA) perustuvan hiilidioksidin talteenoton sekä hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksia Ruotsin teollisissa päästölähteissä, joiden vuosittainen päästömäärä ylittää 500 ktCO₂. Tarkastelu sisältää sekä fossiili- ja bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä päästävät laitokset (yhteensä 28 laitosta). Heidän arvionsa mukaan talteenoton kustannus tarkastelluissa Ruotsin päästölähteissä vaihtelee välillä 40–110 €/tCO₂, kuljetuksen ja varastoinnin kustannus välillä 25–40 €/tCO₂ ja yhteenlaskettu yksikkökustannus välillä 80–135 €/tCO₂. Kustannusten arvio on huomattavasti optimistisempi verrattuna tämän työn tuloksiin, sillä tässä työssä arvioidut kuljetus- ja varastointikustannukset ovat merkittävästi suuremmat. Tässä työssä kuljetuskustannuksen arviointimenetelmä poikkeaa Johnsson ym. (2020) käyttämästä lähestymistavasta. Muun muassa kuljetusetäisyydet otetaan laivakuljetuksessa huomioon, kuten myös laitoskohtaiset karkeat arviot putkilinjojen kustannuksista sisämaasta satamiin. Lisäksi varastoinnin kustannus on oletettu korkeammaksi tässä työssä (18 €/tCO₂ injektointi varastoon sekä 8 €/tCO₂ hiilidioksidin purku ja kuljetus merenalaisella putkilinjalla vastaanottavasta terminaalista varastoon).

Tässä työssä hiilidioksidin talteenoton kustannus laskettiin kirjallisuuden tietojen pohjalta teknologisesti kypsään MEA-talteenottoprosessiin pohjautuen. Kustannus laskettiin laitoskohtaisesti laitoksen kokoluokan (päästömäärän), päästölähteen hiilidioksidin osapaineen ja prosessikohtaisesti lasketun mittakaavakertoimen avulla. Hiilidioksidin talteenoton kustannuksen vaihteluväli kaikissa tarkastelluissa laitoksissa on 51–89 €/tCO₂ ja 67–112 €/tCO₂, kun kustannukseen sisällytetään myös hiilidioksidin paineistus. Tässä työssä lasketut kustannukset vastaavat kokoluokaltaan muita kirjallisuudessa esiintyviä arvioita hiilidioksidin talteenoton kustannuksista teollisissa päästölähteissä. Onarheim ym. (2017b) laskivat amiinipesuun perustuvan hiilidioksidin talteenoton kustannukseksi 52–66 €/tCO₂ modernissa sulfaattiselutehtaassa ja 71–89 €/tCO₂ kartonki- ja selluintegraatissa, talteenottokapasiteetin ollessa 1,5–1,9 MtCO₂/a. Johnsson ym. (2020) arvioivat MEA-talteenottoprosessiin perustuvan hiilidioksidin talteenoton kustannukseksi Ruotsin teollisissa päästölähteissä 40–110 €/tCO₂, mikä on tämän työn tuloksia laajempi vaihteluväli. Johnsson ym. sisällyttivät tarkasteluunsa mahdollisten jätelämpövirtojen hyödyntämisen, mikä voi laskea talteenoton kustannuksia

merkittävästi. Heidän arvionsa mukaan talteenoton kustannus olisi alle 70 €/tCO₂ noin 84 prosentissa Ruotsin teollisista päästölähteistä muodostuvasta talteenottokapasiteetista, mikä mukailee myös tämän työn tuloksia, joiden mukaan hiilidioksidin talteenoton kustannus (pl. paineistus) Suomen teollisissa päästölähteissä olisi alle 70 €/tCO₂ noin 85 prosentissa saatavilla olevasta talteenottokapasiteetista. Laivakuljetuksen ja varastoinnin kustannusarvioiden osalta tuloksia voidaan verrata Northern Lights -hankkeen kommunikoituun hintatasoon, sillä hankkeen logistiikka perustuu samalla tavalla laivakuljetukseen ja hiilidioksidin kuljetukseen vastaanottavasta terminaalista merenalaisella putkella varastoalueelle. Northern Lights -hanke on ilmoittanut pyrkivänsä kuljetuksen ja varastoinnin osalta 30–55 €/tCO₂ kustannuksiin 2030 mennessä (Northern Lights 2020). Esimerkiksi rannikon päästokeskittymistä arvioidut kuljetuskustannukset (kts. kuva 10) varastointi mukaan lukien olisi noin 50–54 €/tCO₂. Olettaen, että kuljetusetäisyydet Suomesta olisivat pisimpien Northern Lights -hankkeen kuljetusetäisyyksien luokkaa, kustannusarvio sopii hyvin hankkeen esittämään tavoitehintaan.

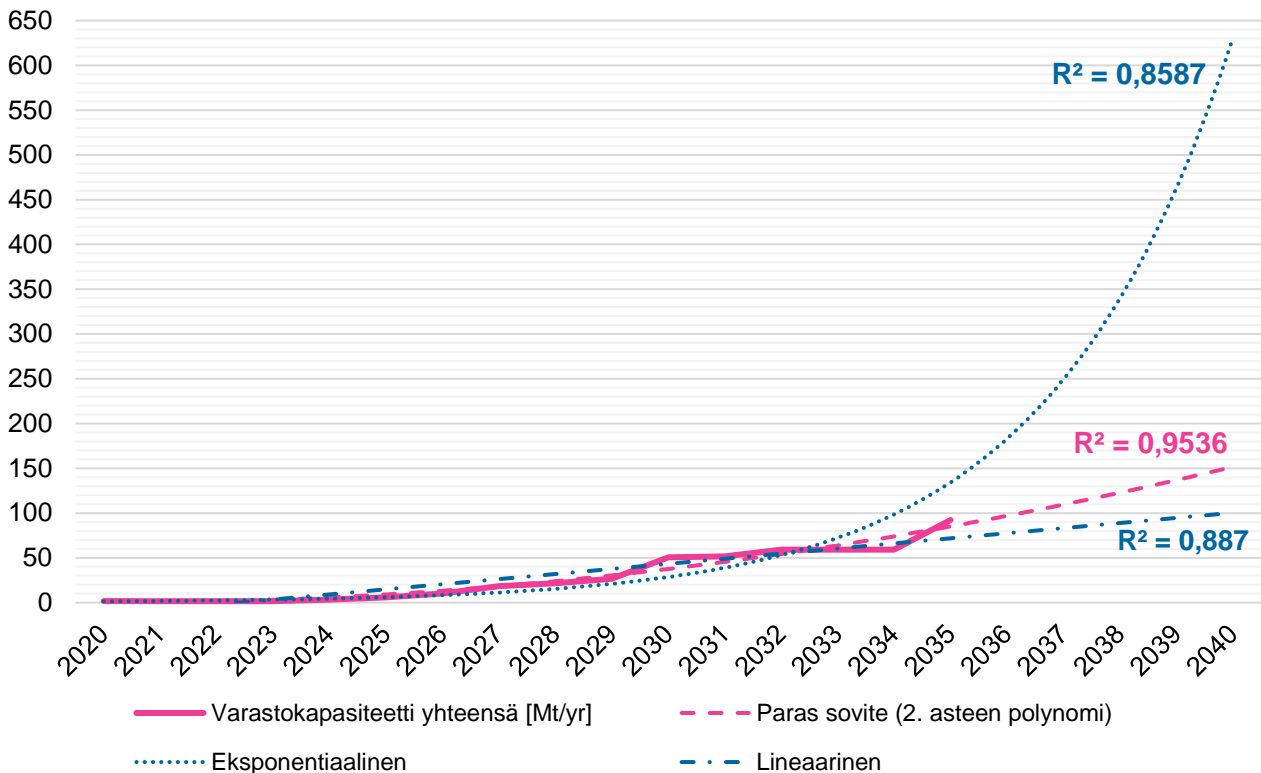
Työssä verrataan myös teknologisten hiilinielujen kustannuksia synteettisten polttoaineiden tuotannon avulla saavutettavan päästövähennyksen kustannuksiin esimerkkitarkastelun avulla. Tulokset perustuvat tältä osin suppeaan tarkasteluun, joka ei ota kantaa erilaisiin synteettisten polttoaineiden tuotannon prosessi- ja arvoketjuvaihtoehtoihin ja jossa muun muassa oletettu ennuste synteettisten polttoaineiden jalostuksen sekä fossiilisen verrokin kustannuksista ovat epävarmoja. Tuloksista ei voi siten vetää lopullista johtopäätöstä hiilidioksidin varastoinnin ja hyötykäytön keskinäisestä taloudellisesta kilpailukyvykkyydestä. Esimerkkilaskelmassa on oletettu synteettisten polttoaineiden tuotantokustannukseksi ilman CO₂-raaka-aineeseen liittyviä kuluja 1,62 €/L ja hiilidioksidin talteenoton kanssa 1,89 €/L. Oletettu kustannus on hieman matalampi kuin esimerkiksi ICCT:n (2022) tuottama arvio 2,32 \$/L (n. 2,20 €/L) synteettiselle dieselille Euroopassa vuodelle 2035. Toisaalta kirjallisuudessa on esitetty optimistisempia arvioita synteettisten polttoaineiden hintakehitykselle, kuten 0,98–1,75 €/L vuonna 2030 synteettiselle jatkojalostettavalle öljylle (Prognos, Fraunhofer & DBFZ 2018).

6.2. Varastokapasiteetti

Raporttia kirjoittaessa hiilidioksidin varastokapasiteetti on Pohjois-Euroopassa vielä alle 2 MtCO₂/vuosi. Tässä hankkeessa kerättyjen tietojen perusteella varastokapasiteetti olisi kasvamassa yli kymmenkertaiseksi seuraavan viiden vuoden aikana eli vuoden 2028 kuluessa, sekä tasolle noin 50 MtCO₂/vuosi vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi jo nyt on suunnitteilla noin 90 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettia vuoteen 2035 mennessä. Vuoteen 2035 mennessä toteutettavaksi suunniteltava kapasiteetti tulee luultavasti vielä kasvamaan lähivuosien kuluessa, kun projektien suunnittelu etenee ja uusia hankkeita käynnistetään ja julkistetaan. Näin ollen ennakoitu kehityskulku vaikuttaa erittäin voimakkaalta kasvulta. Kuvassa 12 on esitetty vuodesta 2020 alkaen Pohjois-Euroopan varastohankkeiden kokonaisvolyymien kasvu vuoteen 2035 asti, sekä kasvuskenaarioita eri sovitteilla vuoteen 2040.

Parhaiten nykyiseen dataan sopivalla sovitteella arvio vuodelle 2040 olisi noin 150 MtCO₂/vuosi varastoitua hiilidioksidia, joskin arvio on hyvin epävarma Globaalisti valmisteltujen hiilidioksidin talteenotto- ja varastointi (CCS) hankkeiden kattama hiilidioksidin talteenottokapasiteetti (MtCO₂/vuosi) on kasvanut viimeisenä neljänä vuotena voimakkaasti, 57–68 prosenttia joka vuosi, mutta globaalisti valmisteltavien hankkeiden sisältämä kapasiteetin kasvu voi sijoittua myös kauemmaksi tulevaisuuteen, kuten vuoden 2040 jälkeiselle ajalle. Lisäksi tässä kasvussa ei huomioida jo rakennettua ja käynnissä olevaa kapasiteettia.

Kasvuskenaario: hiilidioksidin varastokapasiteetti Pohjois-Euroopan varastointiprojekteissa 2020-2040 [MtCO₂/vuosi]



Kuva 12. Hiilidioksidin varastokapasiteetin kasvuskenarioita Pohjois-Euroopassa 2020–2040 eri sovitteilla julkaistuihin varastointihankkeisiin vuosille 2020–2035. Parhaalla sovitteella varastokapasiteetti vuonna 2040 olisi n. 150 MtCO₂/vuosi.

Valmisteltava kapasiteetti on siis huomattavassa kasvussa, mutta toteutunut varastokapasiteetti ei ole vielä ehtinyt Pohjois-Euroopassa kasvuun. Seuraavien 3–4 vuoden aikana tilannetta on syytä seurata tarkkaan esimerkiksi Northern Lights, Antwerp@C, Greensand ja Porthos -hankkeiden käynnistymisen osalta. Viivästymisiä, odottamattomia muutoksia ja hankkeiden peruuntumisiakin on syytä odottaa CCS-hankkeiden historian perusteella; monessa maassa valmistellaan nyt maan ensimmäistä teollisen kokoluokan CCS-hanketta. Esimerkiksi Ruotsin käänteinen BECCS-huutokauppa on viivästynyt (Swedish Energy Agency 2023a), Porthos-hankkeessa koettiin viivästys luonnonsuojelualueen vaikutusten arvioimiseksi ja valituksen käsittelemiseksi valtioneuvostossa (Porthos 2023), ja jo käynnissä olleet Sleipner- ja Snøhvit -varastointihankkeet eivät myöskään edenneet suunnitellulla tavalla (Hauber 2023). IEEFA:n raportti (Hauber 2023) nostaa esiin myös riskin, että geologinen varasto voi vuotaa. Myös ilman vuotoa varastointi voidaan joutua keskeyttämään hankkeen jo käynnistettyä toimintansa, jos hiilidioksidivarasto alkaa käyttäytyä mallinnuksesta poikkeavasti. Suomen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteen kannalta CCS-hankkeiden viivästymisten riski voitaisiin huomioida siten, että hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia suomalaisista laitoksista suunniteltaisiin toteutettavan useammassa jo 2030–2034 vuosina käynnistyväksi suunnitellussa varastointihankkeessa. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin toteuttaminen ennen vuotta 2030 vaikuttaa erittäin haasteelliselta tyyppillisen CCS-projektin keston vuoksi (n. 7 vuotta kaupallisten neuvottelujen aloittamisesta) (GCCSI 2022).

On kuitenkin mahdollista, että Pohjois-Euroopassa toteutuvan varastokapasiteetin kasvu voisi muuttua tulevina vuosina lähemmäs eksponentiaalista. Esimerkiksi Tanskassa on viimeisen vuoden aikana lisätty hiilidioksidin

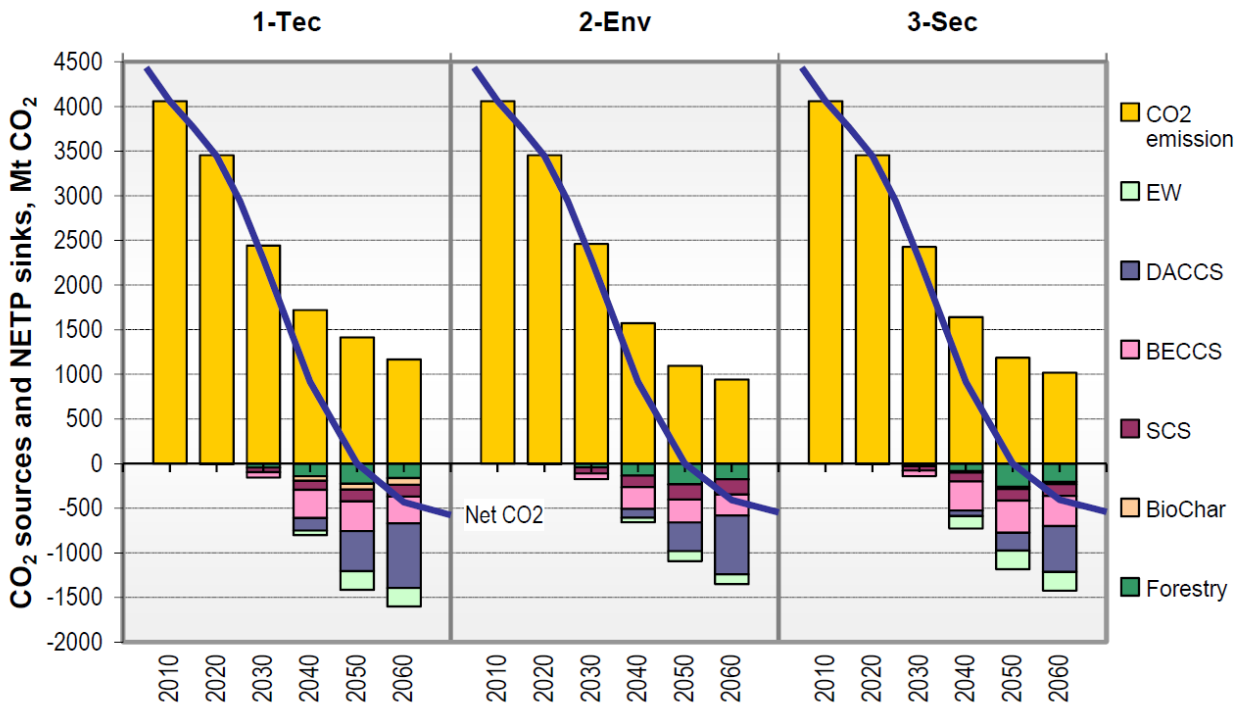
varastointihankkeiden suunniteltua volyymiä voimakkaasti, mikä lisää vuoden 2035 varastokapasiteettia. Eksponentiaalisen kasvun sovitteen mukaan hiilidioksidin varastokapasiteetti Pohjois-Euroopassa voisi saavuttaa peräti noin 630 MtCO₂/vuosi kapasiteetin vuoteen 2040 mennessä, joskin sovite ei kuvaa kovin hyvin vielä tämänhetkistä hankkeiden yhteenlasketun kapasiteetin kehitystä. Julkisten tietojen perusteella saatu kuva on kuitenkin väistämättä jäljessä yritystenvälisiä neuvotteluja, kuten myös Northern Lights -projektin esimerkki osoittaa: Global CCS Institutun vuoden 2022 raportin ja verkkosivujen tietojen perusteella oli arvioitu, että valtaosa (n. 3 MtCO₂/vuosi) toisen vaiheen varastokapasiteetista (3,5 MtCO₂/vuosi) olisi vielä vapaasti kilpailtavissa, mutta vuoden 2023 raportissa kirjoitetaan, että tuo kapasiteetti olisi jo käytännössä varattu.

Teknologisten hiilinielujen tarvetta Euroopassa on tutkittu hiljattain skenaariomallinnuksen keinoin (Lehtilä ym. 2023). Mallinnuksen tulokset perustuvat kustannusoptimointiin, eivätkä siis suoraan ennusta tulevaa tarvetta hiilidioksidin varastokapasiteetille. Niissä ei ole myöskään oletettu dramaattisesti tiukennettua päästövähennyspolitiikkaa, kuten esimerkiksi fossiilista polttoaineista luopumista. Ne antavat kuitenkin kuvaa mahdollisesta skaalasta, jolla teknologisia hiilinieluja voitaisiin tarvita EU:n hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi vuonna 2050 (kts. kuva 13). Esimerkiksi jo vuonna 2040 BECCS- ja DACCS³-kapasiteetti yhdessä voisi olla noin 160–200 MtCO₂/vuosi ja tarve varastokapasiteetille vielä suurempi, sillä myös fossiilista hiilidioksidia tulisi varastoida päästövähennystoimena. Tälläkin hetkellä valmistelluissa Pohjois-Euroopan hankkeissa suurin osa varastoitavaksi suunnitellusta hiilidioksidista on fossiilista. Tarvetta voidaan vähentää tekemällä vielä tehokkaampia päästövähennystoimia, parantamalla energiatehokkuutta, sekä vähentämällä kulutusta.

Vaikka nyt vertailussa ovat *Pohjois-Euroopan* varastointihankkeisiin perustuva kasvu-uran tarkastelu ja *koko Euroopan* skenaariomallinnuksen BECCS- ja DACCS-tyyppiset hiilidioksidin varastointihankkeet vuonna 2040 (ja myöhemmin), on vertailu varsin relevantti, sillä suurin osa koko Euroopan CCS-hankkeista sijoittuu tällä hetkellä Pohjois-Eurooppaan ja tarkemmin Pohjanmerelle (GCCSI 2023). Skenaarioiden kuvaaman teknologisten hiilinielujen määrään mahdollistamiseksi olisi Euroopassa kiihdytettävä vielä huomattavasti valmisteltavien hiilidioksidin varastointihankkeiden määrää kohti eksponentiaalisen kasvun kehitystä, ainakin vuoteen 2050 saakka. Tähän on tartuttu EU:n Net-Zero Industry Act:issa, jossa mainitaan tavoitteeksi hiilidioksidin varastokapasiteetin lisäys 50 Mt vuodessa, vuodesta 2030 alkaen.

Vaikka riittävä rahoitus suomalaisille CCS-hankkeille löytyisi, muodostaisi nykyisellä kehityskululla varastokapasiteetin riittämättömyys merkittävän pullonkaulan teknologisten hiilinielujen toteutukselle niin Suomessa kuin Euroopassa yleisestikin. Suomen osalta käytössä olevaa varastokapasiteettia rajoittaa merkittävästi myös kansainvälinen kilpailu: vuosille 2030–2034 ajoittuvasta tunnistetusta vapaasti kilpailtavasta noin 10 MtCO₂/vuosi kapasiteetista olisi nykyisen hankeaktiivisuuden perusteella valtaosa menossa Iso-Britannian, Irlannin, Norjan, Tanskan, Ruotsin ja Alankomaiden teollisuudelle.

³ DACCS= direct air capture and storage of CO₂ eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi suoraan ilmakehästä.



Kuva 13. Teknologisten hiilinielujen tarve Euroopassa 2050 hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi kolmessa eri skenaariossa, joissa korostuvat erilaiset tulevaisuuden näkymät (Tec = nopea teknologiakehitys ja globaali yhteistyö, Env = ympäristön ja planetaaristen rajojen suojeleminen, Sec = turvallisuusnäkökulma ja globaalin yhteistyön hidastuminen) (Lehtilä ym. 2023).

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1. Bio-CO₂:n talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannukset sekä potentiaali Suomessa

Teknologisten hiilinielujen kannalta olennaisen bioperäisen hiilidioksidin saatavuus Suomessa on tällä hetkellä erittäin hyvä metsäteollisuuden ja bioenergiantuotannon vahvan aseman myötä. Bioperäisen hiilidioksidin geologiseen varastointiin perustuvien teknologisten hiilinielujen yksikkökustannus Suomen teollisissa päästölähteissä, sisältäen hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin, vaihtelee välillä 119—237 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 117—178 €/tCO₂ (jaettu logistiikka). Teknologisten hiilinielujen kustannusten laitoskohtainen keskiarvo on 161 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 149 €/tCO₂ (jaettu logistiikka), kun taas painotettu (aritmeettinen) keskiarvo on 141 €/tCO₂ (ei jaettua logistiikkaa) ja 134 €/tCO₂ (jaettu logistiikka).

Mittakaavaetujen takia hiilidioksidin talteenotto on keskimäärin huomattavasti halvempaa suurissa laitossyksiköissä, joissa on paljon hiilidioksidipäästöjä. Erityisesti metsäteollisuudessa on useita suuria laitossyksiköitä, joissa on paljon bioperäistä hiilidioksidia saatavilla yhdestä sijainnista. Lähekkäisten laitosten logistiikan yhdistävät CO₂-hubit voivat madaltaa laitoskohtaisia kuljetus- ja varastointikustannuksia merkittävästi, keskimäärin kahdeksan prosenttia. Jaetusta kuljetusinfrastruktuurista hyötyvät eniten pienet talteenottolaitokset.

Nykyisten laitosten soveltuvuuteen hiilidioksidin talteenottoon vaikuttavat siis (1) talteenottomäärä, (2) talteenoton kustannus laitoksella (3) sijainti hiilidioksidin kuljetuksen kannalta sekä lisäksi (4) laitoksen odotettava elinkaari. Tässä työssä hiilidioksidilähteitä on pystytty tarkastelemaan julkisen tiedon perusteella tekijät 1–3 huomioiden, jotka vaikuttavat suoraan talteenoton ja varastoinnin kustannuksiin. Tämän tarkastelun perusteella teknologisten hiilinielujen yksikkökustannuksiltaan edullisimpia laitoksia yhdistää edellä esitetyistä syistä erityisesti suuri laitostyyppi ja rannikon läheinen sijainti.

Hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin osalta parhaita sijainteja talteenottolaitosinvestoinneille ovat rannikolla sijaitsevat hiilidioksidipäästökeskittymät. Näillä alueilla on mahdollista saavuttaa logistiikan mittakaavaetuja erityisesti pienemmille talteenottolaitoksille. Alueina Pori ja Kotka olisivat luontevia pääteipisteitä sisämaasta hiilidioksidia kerääville putkilinjoille. Rannikon päästökeskittymissä (Oulu, Kemi, Porvoo, Kotka, Pori) on teoreettisesti talteenotettavissa 9,8 MtCO₂ bioperäistä hiilidioksidia. Kun luetaan mukaan alueille sisämaasta kuljetettava bioperäinen hiilidioksidi, määrä nousee 13,8 MtCO₂:iin. Teoreettinen talteenottopotentiaali kaikista rannikon (yli 0,1 MtCO₂ suuruisista) bio-CO₂-lähteistä on 13,6 MtCO₂.

Yksikkökustannuksiltaan kymmenen edullisimmat bioperäistä hiilidioksidia päästävän laitoksen tarkastelun perusteella jäljellä olevan teknisen käyttöiän jääminen lyhyeksi ei vaikuta suurelta riskiltä teknologisten hiilinielujen käyttöönoton kannalta. Suurimpaan osaan näistä laitoksista on tehty lähivuosina teknistä käyttöikää pidentäviä investointeja ja uudistuksia ainakin joidenkin tuotantolinjojen osalta tai sitten laitokset on käynnistetty viimeisen kymmenen vuoden aikana.

Esitetyt arviot hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksista perustuvat sovitteisiin kirjallisuuslähteissä esitetyistä kustannuksista. Selvityksessä ei ole tarkasteltu laitoskohtaisia talteenotto- ja kuljetusjärjestelmiä prosessi- tai laitetasolla, eikä esimerkiksi sisämaan talteenottolaitosten putkikuljetusreittejä ole sovitettu maastonmuotoihin tai muiden päästölähteiden kautta kulkeviin reitteihin. Kustannusarviot sisältävät siis epätarkkuuksia ja niiden on tarkoitus olla vain suuntaa antavia.

7.2. Bio-CO₂:n hyötykäytön ja varastoinnin näkymät

Euroopan unionin REDIII, ReFuelEU Aviation ja FuelEU Maritime –lainsäädännöt edellyttävät, että vuonna 2030 liikennesektorin energiankulutuksesta vähintään noin yksi prosentti on synteettisiä polttoaineita ja vetyä. Määrä ei riitä aiheuttamaan kilpailua hiilidioksidin hyötykäytön ja teknologisten nielujen välillä. Oletetussa skenaariossa, jossa Suomen vähimmäistarpeen lisäksi tuotettaisiin kymmenen prosenttia EU-markkinoiden synteettisten polttoaineiden vähimmäistarpeesta vuonna 2030, 2–3 keskikokoista talteenottolaitosta Suomessa riittäisi kattamaan vaaditun valmistusmäärän. Hiilidioksidipohjaisten synteettisten polttoaineiden tarve markkinoilla vuonna 2050 on toistaiseksi vaativasti määritettävä. EU-tavoitteet ovat osittain yhteisiä kestäville biopolttoaineille sekä hiilettömille ja hiilidioksidipohjaisille sähköpolttoaineille. ReFuelEU Aviation -asetuksen vaatimukset synteettisille polttoaineille lentoliikenteessä (6 % vuonna 2035 ja 35 % vuonna 2050) antavat parhaimman mahdollisuuden arvioida synteettisten polttoaineiden tarvetta EU:n markkinoilla. Oletetussa kysyntäskenaariossa synteettisten polttoaineiden tuotanto Suomessa vaatisi noin 9 MtCO₂/vuosi vuonna 2050, joskin arvioissa ei oteta huomioon liikennesektorin energiankulutuksen muutoksia. Bio-CO₂:n teoreettinen talteenottopotentiaali tässä selvityksessä kartoitetuista laitoksista on noin 27 MtCO₂/vuosi. Synteettiseksi polttoaineeksi muutettuna määrä vastaisi noin kahta prosenttia EU:n liikennesektoreiden energiankulutuksesta vuonna 2030 tai noin 12 prosenttia EU:n lentoliikenteen polttoainekulutuksesta. Hiilidioksidin saatavuuden lisäksi uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteetti asettaa rajat synteettisten polttoaineiden jalostamiselle.

Pohjois-Eurooppaan tällä hetkellä suunniteltava hiilidioksidin varastokapasiteetti muodostuu noin 16 hankkeesta ja näiden osakokonaisuuksista. Tällä hetkellä toiminnassa olevaa varastokapasiteettia on alle 2 MtCO₂/vuosi, ja se kasvaisi tällä hetkellä valmisteltavien hankkeiden myötä vuoden 2028 kuluessa yli kymmenkertaiseksi, vuoteen 2030 mennessä noin 50 MtCO₂/vuosi ja vuoteen 2035 mennessä yli 90 MtCO₂/vuosi – joskin vuonna 2035 käynnistyviä hankkeita mitä todennäköisimmin julkistetaan vielä useita. Hankkeista suurin osa on Iso-Britannian, Norjan ja Tanskan merialueilla ja valtaosa nyt suunnitteilla olevasta varastokapasiteetista koskee fossiilisen hiilidioksidin varastointia. Globaalisti valmisteltavien CCS-hankkeiden yhteenlaskettu talteenottokapasiteetti on kasvanut jo neljä vuotta peräkkäin 57–68 prosenttia vuodessa.

Hiilidioksidin varastokapasiteettia alkaa nykytiedon valossa olla merkittävästi tarjolla kilpailtavaksi vuodesta 2030 alkaen. Tätä ennen käynnistyvän kapasiteetin osalta yritysten väliset sopimukset hiilidioksidin toimituksista on jo pitkälti tehty. Tässä työssä arvioitujen hankkeiden perusteella vapaalle kilpailulle olisi todennäköisesti saatavilla noin 10 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettia vuosille 2030–2035, esimerkiksi hankkeissa Project Greensand (Tanska), Polaris (Norja) ja Acorn (Iso-Britannia). Tämän lisäksi Tanskaan on vastikään ilmoitettu merkittävästä määrästä uutta suunniteltua hiilidioksidin varastokapasiteettia vuosille 2030–2032, jonka varausasteesta ei vielä ole tietoa. Uusien CCS-hankkeiden valmistelussa ja toteutuksessa tyypillisesti kestää useita vuosia, esimerkiksi noin seitsemän vuotta kaupallisten neuvottelujen aloittamisesta, joten on epätodennäköistä, että suomalaisia laitoksia hiilidioksidin varastointiin käynnistytäkään ennen vuotta 2030. Julkisesti saatavilla olevat tiedot ovat kuitenkin väistämättä jäljessä yritysten välisiä neuvotteluja. Suomalaisia toimijoita ja teknologisten hiilinielujen toteuttamista voisi hyödyttää, jos valtion tasolla tehtäisiin strategisia avauksia ja yhdistettäisiin hajanaisia toimia yhdeksi rintamaksi hiilidioksidin varastoinnin toimeenpanemiseksi useissa hankkeissa, esimerkiksi Tanskassa, Norjassa ja Iso-Britanniassa.

Todennäköisesti saatavilla oleva noin 10 MtCO₂/vuosi varastokapasiteetti asettaa merkittävän rajoitteen Suomen hiilidioksidin varastointivolyymille tarkasteluaikajaksolla vuoteen 2035 asti, vaikka riittävä rahoitus olisi saatu kuntoon. Tunnistetusta vapaana olevasta kapasiteetista olisi nykyisen hankeaktiivisuuden perusteella valtaosa menossa Iso-Britannian, Irlannin, Norjan, Tanskan, Ruotsin ja Alankomaiden teollisuudelle. Vaadittaisiin merkittävää muutosta neuvottelu- ja hankevalmisteluaktiivisuudessa, jotta vuonna 2035 Suomelle olisi käytettävissä esimerkiksi 6 MtCO₂/vuosi varastokapasiteettia. Lisäksi riskit hiilidioksidin varastointihankkeiden viivästykselle voitaisiin huomioida siten, että merkittävä osa suomalaisista laitoksista

talteenotetun hiilidioksidin varastokapasiteettia olisi sovittu hankkeisiin, jotka käynnistyisivät jo vuosina 2030–2034.

7.3. Bio-CO₂:n talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin kannattavuus

Työssä arvioitiin bioperäisen hiilidioksidin talteenoton, kuljetuksen ja varastoinnin tai hyötykäytön kustannuksia laitostasolla kolmessa esimerkkitapauksessa. Teknologisten hiilinielujen yksikkökustannukset olivat 119 €/tCO₂ rannikolla sijaitsevan talteenottolaitoksen tapauksessa ja 133 €/tCO₂ sisämaassa sijaitsevan talteenottolaitoksen tapauksessa. Molemmat päästölähteet teknologisten hiilinielujen tapauksissa olivat suurimpien bioperäisten päästölähteiden joukossa, mikä selittää myös putkikuljetuksen aiheuttaman lisäkustannuksen kohtuullisuutta sisämaan talteenottolaitoksesta. Esimerkkitalauksissa hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin luoman teknologisen hiilinielun kustannus (119–133 €/tCO₂) oli alhaisempi kuin päästövähennyksen kustannus hiilidioksidin hyötykäytössä synteettisten polttoaineiden valmistuksessa (328 €/tCO₂). Esimerkkitalaukset edustavat kaupallisia laitoksia noin vuoden 2030 tienoilla, jonka jälkeen eri teknologioiden kannattavuudessa voi tapahtua muutoksia.

Laitosten investoinnit vaativat merkittäviä pääomia, esimerkkitapauksissa sadoista miljoonista yli miljardiin euroon. Tarkastelun perusteella suurin osa, arviolta 75–80 prosenttia, teknologisten hiilinielujen yksikkökustannuksista on kuitenkin muuttuvia kustannuksia. Niiden kattamiseksi vaaditaan operatiivinen tulo varastoitua hiilidioksidiyksikköä kohden, esimerkiksi hiilenpoistoyksiköiden myynnistä. Mahdolliset investointituet vähentäisivät luonnollisesti yksityisten pääomien tarvetta hankkeiden toteutumiseksi, mutta vaikutus ei ole suuri hiilidioksidin poiston yksikkökustannukseen.

Jos operatiivinen tuki kattaisi koko hiilidioksidin talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksen, 5 MtCO₂-suuruisen teknologisen hiilinielun rahoittaminen vaatisi 605–705 M€/vuosi, riippuen käytetäänkö arvioissa painotettua keskiarvoa kahdesta halvimmasta laitoksesta vai kaikista Suomen tarkastelluista laitoksista, joista on mahdollista talteenottaa bioperäistä hiilidioksidia.

7.4. Teknologisten hiilinielujen tukimekanismit

Teknologisten hiilinielujen tuottamiseksi ei Suomessa ole tällä hetkellä suoria taloudellisia kannustimia, lukuun ottamatta vapaaehtoisia päästömarkkinoita. Ruotsi on ottamassa käyttöön bioperäisen hiilidioksidin talteenotto- ja varastointihankkeille käänteisen huutokaupan, eli tarjouskilpailun, jossa tukea maksetaan sille toimijalle, joka tuottaa nieluja halvimmalla. Ruotsin energiaviranomaiselle on myönnetty huutokauppaa varten yhteensä 36 miljardia kruunua (noin 3,3 miljardia €) vuosien 2026–2046 väliselle jaksolle. Käytössä on korkeintaan 1,7 miljardia kruunua vuodessa (noin 144 M€), ja tuki jaetaan yhdessä tai useammassa huutokaupassa. Vastaava tukijärjestelmä voisi olla mahdollinen myös Suomessa, ja sen etu toteutuisi erityisesti, jos huutokauppaan osallistuisi useita toimijoita.

Käänteisen huutokaupan tai muun tukimekanismin selvitystyö tulisi käynnistää pian, jos hankkeita halutaan toteuttaa 2030-luvun alkupuolella, mikä olisi järkevää riskienhallintaa hankkeiden mahdollisten viivästyminen vuoksi. Suomessa on useita laitoksia, jotka potentiaalisesti voisivat osallistua käänteiseen huutokauppaan/tarjouskilpailuun ja joissa BECCS:n toteuttamisen alustavat kustannusarviot vaihtelevat välillä 120–150 €/tCO₂. Vaadittavaan korvaustasoon vaikuttaa kuitenkin epävarmuus kustannusarvioissa, koska kyseessä on toistaiseksi vähän käytetty teknologia, sekä hiilidioksidin kuljetus- ja varastointiketjuun liittyvät epävarmuudet.

LÄHTEET

Acorn 2023. NSTA grants carbon storage licences to Acorn. 15.9.2023. Viitattu: 7.11.2023. Saatavilla: <https://www.theacornproject.uk/news-and-events/nsta-grants-carbon-storage-licences-to-acorn>

Antwerp@C, n.d. A carbon transport and interim storage network in the port of Antwerp lays the groundwork for decarbonizing chemicals and other industries. Viitattu: 30.10.2023. Saatavilla: https://ccushub.ogci.com/focus_hubs/antwerp-kairosc/

Aspelund, A., & Jordal, K. 2007. Gas conditioning—The interface between CO₂ capture and transport. International Journal of Greenhouse Gas Control, 1(3), 343–354. [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00040-0)

Autoalan tiedotuskeskus 2023. Liikennepolttoaineiden verotus. (Verkkosivu) Autoalan tiedotuskeskus, Helsinki. Saatavilla: [Polttonesteiden verotus - Autoalan Tiedotuskeskus](https://www.autoalan.fi/verotus)

Bains, P., Psarras, P., & Wilcox, J. 2017. CO₂ capture from the industry sector. Progress in Energy and Combustion Science, 63, 146–172. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.07.00>

Brook-Jones, C. 2023. Synergia Energy receive carbon storage license for UK-based CCS project. Carbon Capture EXPO, Industry News. 3.7.2023. Viitattu: 13.11.2023. Saatavilla: https://www.carboncapture-expo.com/industry_news/synergia-energy-receive-carbon-storage-license-for-uk-based-ccs-project/

Carbfix, n.d. Coda Terminal - A scalable onshore CO₂ mineral storage hub in Iceland. Viitattu: 30.10.2023. Saatavilla: <https://www.carbfix.com/codaterminal>

Climate Action Task Force (CATF). 2023. The cost of carbon capture and storage in Europe. Saatavissa: <https://www.catf.us/ccs-cost-tool/>

Climeworks 2022. Mammoth: our newest facility. June, 2022. Viitattu: 29.9.2023. Saatavilla: <https://climeworks.com/plant-mammoth>

Climeworks, n.d. Orca: the first large-scale plant. Viitattu: 29.9.2023. Saatavilla: <https://climeworks.com/plant-orca>

East Coast Cluster, n.d. Three East Coast Cluster projects selected on CCUS cluster sequencing Phase 2: project negotiations list. Viitattu: 30.10.2023. Saatavilla: <https://eastcoastcluster.co.uk/press-release/three-east-coast-cluster-projects-selected-on-ccus-cluster-sequencing-phase-2-project-negotiations-list/>

European Commission 2022. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a Union certification framework for carbon removals. COM(2022) 672 final. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-11/Proposal_for_a_Regulation_establishing_a_Union_certification_framework_for_carbon_removals.pdf

European Commission 2023a. Factual summary report on the public consultation of the EU Climate Target for 2040. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13793-EU-climate-target-for-2040/public-consultation_en

European Commission 2023b. Net-Zero industry Act. Saatavissa: file:///C:/Users/KKKATI/Downloads/Net-Zero_Industry_Act_Making_the_EU_the_home_of_clean_technologies_manufacturing_and_green_jobs.pdf

Eldrup, N. H., Mathisen, A., Skagestad, R., Haugen, H. A. 2019. A Cost Estimation Tool for CO2 Capture Technologies. 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne 21–26 October 2018 (GHGT-14), Available: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3366036>

Energiavirasto 2018. Preemiojärjestelmä. <https://energiavirasto.fi/preemiojarjestelma>

Energimyndigheten 2023b. Energimyndigheten föreslår möjlighet att sälja negativa utsläpp som genereras med statligt stöd till bio CCS. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2023/energimyndigheten-foreslar-mojlighet-att-salja-negativa-utslapp-som-genereras-med-statligt-stod-till-bio-ccs/>

Energimyndigheten 2021. Första, andra, tredje - Förslag på utformning av ett stödsystem för bio-CCS. <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=203642>

Energimyndigheten 2023a. Särskild redovisning av Energimyndighetens arbete med utformning av stödsystem för bio-CCS 2022. <https://energimyndigheten.a-w2m.se/FolderContents.mvc/Download?ResourceId=213749>

European Environment Agency (EEA) 2023. Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006. Saatavilla: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/9405f714-8015-4b5b-a63c-280b82861b3d>

EU 2023. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/959 kasviuonekaasujen päästöoikeuksien kaupan järjestelmän toteuttamisesta unionissa annetun Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/87/EY ja markkinavakausvarannon perustamisesta unionin kasviuonekaasupäästöjen kauppajärjestelmään ja sen toiminnasta annetun päätöksen (EU) 2015/1814 muuttamisesta. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0959>

EU 2023. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>

EU 2009. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006 (Text with EEA relevance). OJ L 140, 5.6.2009, p. 114–135. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0031>

GCCSI 2021. Technology readiness and costs of CCS. Available: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf>

GCCSI 2022. Global Status of CCS 2022. Viitattu: 14.11.2023. Saatavilla: https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/GCCSI_Global-Report-2022_PDF_FINAL-01-03-23.pdf

GCCSI 2023. Global Status of CCS 2023 - Scaling up through 2030. Viitattu: 28.11.2023. Saatavilla: https://res.cloudinary.com/dbtfcnfij/images/v1700717007/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov/Global-Status-of-CCS-Report-Update-23-Nov.pdf?_i=AA

Hauber G., 2023. Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales?. 2023, Institute for Energy Economics & Financial Analysis. Saatavilla: <https://ieefa.org/media/3828/download?attachment>

Ho M.T., Allinson G.W., Wiley D.E. 2011. Comparison of MEA capture cost for low CO₂ emissions sources in Australia, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 5, Issue 1, 2011, Pages 49–60, ISSN 1750-5836. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.06.004>

Horisont Energi, n.d. Polaris - A complete and sustainable value chain for carbon capture-, transport and storage. Viitattu: 7.11.2023. Saatavilla: <https://horisontenergi.no/projects/polaris/>
HyNet 2023. Major HyNet project announcement on 'Energy Security Day'. HyNet North West. Lehdistötiedote, 30.3.2023. Viitattu: 13.11.2023. Saatavilla: <https://hynet.co.uk/wp-content/uploads/2023/03/30032023-HyNet-projects-announced-final.pdf>

H21 2023. H21 North of England. Viitattu: 13.11.2023. Saatavilla: <https://h21.green/projects/h21-north-of-england/>

ICCT 2022. Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe. Working paper 2022-14. 2022 International Council on Clean Transportation. Saatavilla: [fuels-us-europe-current-future-cost-ekerosene-us-europe-mar22.pdf \(theicct.org\)](https://www.theicct.org/publications/2022-14-current-and-future-cost-of-e-kerosene-in-the-us-and-europe)

IEA 2021. Theoretical CO₂ storage capacity by region. IEA, Pariisi. Saatavilla: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>

IEAGHG 2020. The Status and Challenges of CO₂ Shipping Infrastructures. IEAGHG Technical Report 2020–10, July 2020. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2020. Saatavilla: <https://ieaghg.org/ccs-resources/blog/new-ieaghg-report-the-status-and-challenges-of-co2-shipping-infrastructures>

Ilmastovuosikertomus 2023. Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:27. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/165065>

IPCC 2022. IPCC AR 6 WG3: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Johnsson Filip, Normann Fredrik, Svensson Elin. 2020. Marginal Abatement Cost Curve of Industrial CO₂ Capture and Storage – A Swedish Case Study. *Frontiers in Energy Research*, Vol. 8 2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00175>

Kearns, D., Liu, H., & Consoli, C. 2021. Technology Readiness and Costs of CCS. Saatavilla: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-and-costs-of-ccs/>

Kjärstad J., Skagestad R., Eldrup N. H., Johnsson F. 2016. Ship transport—A low cost and low risk CO₂ transport option in the Nordic countries, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 54, Part 1, 2016, Pages 168–184, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.024>

Kujanpää ym. 2023. Carbon dioxide use and removal - Prospects and policies. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:19. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-197-1>

Laine, A., Pakkala, Laine, A., Ahonen, H.M., Pakkala, A., Laininen, J., Kulovesi, K., Mäntylä, I. 2023. Opas vapaaehtoisten hiilimarkkinoiden hyviin käytäntöihin: Vapaaehtoisten ilmastotokejen edistäminen ilmastoyksiköillä. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-815-4>

Laininen ym. 2022. Selvitys – Vapaaehtosiin päästökompensaatioihin liittyvät erityiskysymykset.

Ympäristöministeriö 9/2022. Saatavilla:

https://valtioneuvosto.fi/documents/1410903/33891761/Selvitys_Vapaaehtosiin+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kompensaatioihin+liittyv%C3%A4t+erityiskysymykset-FINAL-.pdf/ece9af07-2cf1-e9f3-206f-7c8bbc90d4c5/Selvitys_Vapaaehtosiin+p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kompensaatioihin+liittyv%C3%A4t+erityiskysymykset-FINAL-.pdf?t=1664526153936

Lehtilä ym. 2023. Quantitative assessments of NEGEM scenarios with TIMES-VTT. NEGEM Deliverable 8.2.

Saatavilla: https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/11/NEGEM_D8.2_NEGEM-scenarios.pdf

Martin J., Neumann A., Ødegård A. 2023. Renewable hydrogen and synthetic fuels versus fossil fuels for trucking, shipping and aviation: A holistic cost model. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 186, 2023, 113637, ISSN 1364-0321. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113637>

MISU 2022. Valtioneuvoston selonteko maankäyttösektorin ilmastosuunnitelmasta. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2022:15. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164301>

Northern Lights 2020. Northern Lights A European CO2 transport and storage network. Presentation at the ZEP Conference: How European CO2 Transport and Storage Infrastructure can enable an Innovative Industrial Transition at European Parliament, 28 January 2020. Saatavilla: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/ZEP-Conference-Presentations.pdf>

Northern Lights, n.d.a. Work with us. Viitattu: 7.11.2023. Saatavilla: <https://norlights.com/work-with-us/>

Northern Lights, n.d.b. How to store CO2 with Northern Lights. Viitattu: 29.9.2023. Saatavilla: <https://norlights.com/how-to-store-co2-with-northern-lights/>

Onarheim, K., Santos, S., Kangas, P., & Hankalin, V. 2017a. Performance and costs of CCS in the pulp and paper industry part 1: Performance of amine-based post-combustion CO2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control, 59, 58–73. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2017.02.008>

Onarheim, K., Santos, S., Kangas, P., & Hankalin, V. 2017b. 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, 66, 60–75. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2017.09.010>

Porthos 2023. Porthos CO2 transport & storage – Project. Viitattu: 30.10.2023. Saatavilla: <https://www.porthosco2.nl/en/project/>

Prognos, Fraunhofer & DBFZ 2018. Status and perspectives of liquid energy sources in the energy transition. A Study by Prognos AG, the Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology UMSICHT and the German Biomass Research Centre DBFZ. 28456. Saatavilla: https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/en/documents/publication/180607_Prognos-Study-Status-and-Perspectives-of-Liquid-Energy-Sources-final-engl.pdf

Project Greensand 2023. Why should we store CO2? Viitattu: 7.11.2023. Saatavilla: <https://www.projectgreensand.com/en>

Rodrigues, L., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Keel, S. G., Mondini, C., Plaza, C., & Leifeld, J. 2023. The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. European Journal of Soil Science, 74(4), e13396. <https://doi.org/10.1111/ejss.13396>

Roussanaly S., Anantharaman R., Lindqvist K., Hagen B. 2018. A new approach to the identification of high-potential materials for cost-efficient membrane-based post-combustion CO2 capture. Sustainable Energy & Fuels, Issue 6, 2018. Saatavilla: <https://doi.org/10.1039/C8SE00039E>

Stolaroff J. K., Pang S. H., Li W., Kirkendall W. G., Goldstein H. M., Aines R. D., Baker S. E. 2021. Transport Cost for Carbon Removal Projects With Biomass and CO₂ Storage. *Frontiers in Energy Research*, 9, 2021. Saatavilla: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.639943>

Suomen ilmastopaneeli 2023. Suuntaviivoja Suomen ilmastotoimien tehostamiseen. Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 1/2023.

Teir, S., Kujanpää, L., Suomalainen, M., Kankkunen, K., Kojo, M., Kärki, J., Sonck, M., Zevenhoven, R., Eloneva, S., Myöhänen, K., Tähtinen, M., Laukkanen, T., Jakobsson, K., Tsupari, E., Pikkarainen, T., Vepsäläinen, J., Turpeinen, E., Keiski, R., & Sormunen, R. (Eds.) 2016. CCSP Carbon Capture and Storage Program: Final report 1.1.2011–31.10.2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavilla: http://ccspfinaalreport.fi/reports/CCSP_Final_report.pdf

TEM 2016. Uusiutuvan energian tukijärjestelmien kehittämistyöryhmän loppuraportti. 16/2016. Julkaisu saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74933/TEMjul_16_2016.pdf

Tilastokeskus 2023. Liikenteen energiankulutus laski 4 % vuonna 2022. Tiedote 9.6.2023, Energian hankinta ja kulutus 2022. Saatavilla: <https://www.stat.fi/julkaisu/cl8mxl4xx1wo10cvzn321a0ss>

Valtioneuvosto 2023. Vahva ja välittävä Suomi. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma. Valtioneuvoston julkaisu 2023:58. Saatavilla: https://valtioneuvosto.fi/hallitukset/hallitusohjelma#

Wessel, R. 2022. Medway Hub - Carbon Capture & Storage Project. OILEX Ltd. 24.2.2022. Viitattu: 13.11.2023. Saatavilla: <https://www.synergiaenergy.com/sites/synergia-energy-ltd/files/synergia-energy-ltd/operations/united-kingdom/medway-hub-ccs-r7-we.pdf>

Yara 2022. Major milestone for decarbonizing Europe. 29.8.2022. Viitattu: 29.9.2023. Saatavilla: <https://www.yara.com/news-and-media/news/archive/news-2022/major-milestone-for-decarbonising-europe/>

Yugo M., Shafiei E., Ellingsen L.A.-W., Rogerson J. 2021. Concawe's Transport and Fuel Outlook towards U 2030 Climate Targets. Report no. 2/21. Concawe, Brussels, April 2021. Available: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_21-2.pdf

Yugo M., Soler A. 2019. A look into the role of e-fuels in the transport system in Europe (2030–2050) (literature review). Concawe Review Volume 28, Number 1, October 2019. Saatavilla: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/E-fuels-article.pdf>

ZEP 2010. The Cost of CO₂ Transport – Post Demonstration CCS in the EU. European Zero Emissions Technology & Innovation Platform. Saatavilla: <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/119811/costs-co2-transport-post-demonstration-ccs-eu.pdf>

LIITE 1. SUOMEN PÄÄSTÖREKISTERIIN KUULUVIEN LAITOSTEN CO2-PÄÄSTÖT

Tiedot perustuvat Euroopan päästörekin tietoihin (EEA 2023). **Mekaanisesti päivitetty data ja sen selvennykset on merkitty taulukkoon punaisella fontilla.**

Reporting Year	parentCompanyName	nameOfFeature	mainActivityName	Bio ktCO2	Fossil ktCO2	Total ktCO2	Selvennys
2021	UPM Communication Papers Oy, UPM Specialty Papers Oy	Jämsänkosken paperitehdas	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	274,1	60,9	335	
2021	Mondi Powerflute Oy	Puunjälustusteollisuus, Mondi Powerflute Oy	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	195	101	296	
2021	STORA ENSO OULU OY	Oulun tehdas	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	1071,3	58,7	1130	
2021	UPM-Kymmene Oyj	Tervasaari, Valkeakoski	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	212	115	327	
2021	Stora Enso Publication Papers Oy Ltd	Anjalankosken tehtaat (anjala ja inkeroinen)	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	160	103	263	
2021	Stora Enso Oyj	Varkauden tehtaat	Industrial plants for the production of paper and board and other primary wood products (such as chipboard, fibreboard and plywood)	660,2	63,8	724	
2021	Stora Enso Oyj, Uimaharjun tehdas	Uimaharjun tehdas, Enocellin tehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	1521,2	68,8	1590	
2021	Stora Enso Oyj	Heinolan Flutingtehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	214	112	326	
2021	Stora Enso Oyj	Imatran tehtaat	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	2141	189	2330	
2021	Metsä Fibre Oy	Joutsenon tehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	1473,9	16,1	1490	
2021	MM Kotkamills Oy	Kotkan tehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	251	240	491	
2021	UPM-Kymmene Oyj	Kymi	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	1501,2	88,8	1590	
2021	UPM-Kymmene Oyj	Kaukaan tehtaat	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	1581,6	88,4	1670	
2021	Metsä Fibre Oy	Rauman tehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	1340,3	69,7	1410	
2021	Metsä Board Oyj	Metsä Board Kaskinen Pulp Mill	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	187,54	1,46	189	
2021	Metsä Fibre Oy	Äänekosken biotuotetehdas	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	2610	0	2610	
-	Metsä Fibre	Kemi	Industrial plants for the production of pulp from timber or similar fibrous materials	4170		4170	Päivitetty vastamaan uuden biotuotetehtaan tietoja pohjautuen ympäristöluvun PSAVI 164/2020 tietoihin
2021	Vantaan Energia Oy	Molemmat polttolaitokset		164	249,9	413,9	
		Jätevoimala	Installations for the incineration of non-hazardous waste in the scope of Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste	164	164	328	Lisätty puuttuva bio-CO2 oletuksella 50 % bio
		Vaarallisen jätteen polttolaitos			85,9	85,9	Tiedot lisätty, uusi laitos
2021	Riikinvoima Oy	Jätteenpolttolaitos	Installations for the incineration of non-hazardous waste in the scope of Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste	57,1	60,9	118	
2021	Fortum Waste Solutions Oy	Riihimäen toimipiste	Installations for the recovery or disposal of hazardous waste	345	345	690	Lisätty puuttuva bio-CO2 oletuksella 50 % bio
2021	Neste Oyj	Porvoon jalostamo	Mineral oil and gas refineries	0	2390	2390	
2021	Sappi Finland Operations Oy	Kirkkiemen voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	79	229	308	
2021	Porvoon Energia Oy	Tolkisten voimalaitokset	Thermal power stations and other combustion installations	199,9	0,0779	200	
-	Helen Oy	Vuosaaren biolämpölaitos	Thermal power stations and other combustion installations	585,4		585	Tiedot lisätty, uusi laitos
2021	Vantaan Energia Oy	Martintilaakso	Thermal power stations and other combustion installations	284	276	560	
2021	Loimua Oy	Vanajan voimalaitos, Hämeenlinna	Thermal power stations and other combustion installations	172,9	5,14	178	
2021	Savon Voima Joensuu Oy	Joensuun voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	248	103	351	
2021	Kainuun Voima Oy	Kajaalin Höyryvoimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	246,5	64,5	311	
2021	Turun Seudun Energiantuotanto Oy	Naantalin voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	677	383	1060	
2021	OULUN ENERGIA, Toppilan voimalaitokset, Oulu	Toppilan voimalaitokset	Thermal power stations and other combustion installations	146	220	366	
2021	Pori Energia Oy	Aittaluodon voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	254,6	21,4	276	
2021	Seinäjoen Voima Oy	Seinäjoen voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	235	366	601	
2021	Tampereen Sähkölaitos Oy	Naistenlahden voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	148	229	377	
2021	Vaskiluodon Voima Oy	Vaasan voimalaitos, VL2	Thermal power stations and other combustion installations	230	382	612	
2021	Mäntän Energia Oy	Mäntän Energia Oy, Voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	132,7	3,3	136	
2021	Kokkolan Energia Oy	Kokkolan Energia Oy, Voimalaitos Power	Thermal power stations and other combustion installations	94,3	82,7	177	
2021	KUMPUNIEMEN VOIMA OY	KUMPUNIEMEN VOIMA OY, Voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	104,7	0,251	105	
2021	Metsä Fibre biovoimalaitos (30.11.2019 alkaen, aiemmin Äänevoima Oy), Energiantuotanto	Metsä Fibre biovoimalaitos (30.11.2019 alkaen, aiemmin Äänevoima Oy), Energiantuotanto	Thermal power stations and other combustion installations	251,2	34,8	286	
2021	Fortum Power and Heat Oy	Kivenlahden lämpökeskus	Thermal power stations and other combustion installations	286,3	0,681	287	
2021	ETELA-SAVON ENERGIA OY	PURSIALAN VOIMALAITOS	Thermal power stations and other combustion installations	228,7	75,3	304	
2021	Kotkan Energia Oy	Hovinsaaren voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	141,1	54,9	196	

2021	Oy Alholmens Kraft Ab	Pietarsaaren voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	455	338	793	
2021	Kokkolan Energia Oy	Voimalaitos Voima (Yksipihlajan voimalaitos)	Thermal power stations and other combustion installations	81,6	25,4	107	
2021	Järvi-Suomen Voima Oy	Ristinän voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	133,9	1,1	135	
2021	Kaukaan Voima Oy	Kaukaan Voima Oy, Energiantuotanto	Thermal power stations and other combustion installations	564,3	43,7	608	
2021	OULUN ENERGIA OY	Laanilan ekovoimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	60,5	62,5	123	
2021	Porin Prosessivoima Oy	Porin Prosessivoima Oy, Energiantuotanto	Thermal power stations and other combustion installations	242,3	77,7	320	
2021	Rauman Biovoima Oy	Rauman voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	307,4	45,6	353	
2021	Tornion Voima Oy	Röyttäen teollisuusalueen voimalaitos ja kattilalait	Thermal power stations and other combustion installations	92	279	371	
2021	Alva-yhtiöt Oy, Jyväskylän Voima Oy	Keljonlahden voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	464	206	670	Lisätty arvio puuttuvan bio-CO ₂ :n määrästä pohjautuen lähteeseen KSML 2012
2021	Keravan Lämpövoima Oy	Keravan voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	159,9	0,058	160	
2021	Vantaan Energia Keski-Uusimaa Oy	Järvenpään voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	171,8	16,2	188	
2021	Oulun Energia Oy	Laanilan Biovoimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	482	116	598	
2021	Linde Gas Oy Ab	Linde Gas Oy Ab, Kipliläiden vedyntuotantolaitos	Chemical installations for the production on an industrial scale of basic inorganic chemicals: Gases, such as ammonia, chlorine or hydrogen chloride, fluorine or hydrogen fluoride, carbon oxides, sulphur compounds, nitrogen oxides, hydrogen, sulphur dioxide, carbonyl chloride	0	150	150	
2021	Borealis Polymers Oy	Borealis Polymers Oy, Petrokemian laitokset	Chemical installations for the production on an industrial scale of basic organic chemicals: Simple hydrocarbons (linear or cyclic, saturated or unsaturated, aliphatic or aromatic)	0	546	546	
2021	Finnsementti Oy	Finnsementti Oy, Lappeenrannan sementtitehdas	Installations for the production of cement clinker in rotary kilns	0	368	368	
2021	Finnsementti Oy	Finnsementti Oy, Parainen / Sementtitehdas	Installations for the production of cement clinker in rotary kilns	0	539	539	
2021	NORDKALK Oyj Abp	NORDKALK Oyj Abp, Raahen kalkinpolttammo	Installations for the production of lime in rotary kilns	0	170	170	
2021	SSAB Europe Oy (ent. RUUKKI METALS OY)	SSAB Europe Oy (ent. RUUKKI METALS OY), Raahen terästehdas	Installations for the production of pig iron or steel (primary or secondary melting) including continuous casting	0	2240	2240	
2021	Outokumpu Chrome Oy, Outokumpu Stainless Oy	Outokumpu Chrome Oy, Outokumpu Stainless Oy, Tornion tehtaot	Installations for the production of pig iron or steel (primary or secondary melting) including continuous casting	0	718	718	
2021	Helen Oy	Helen Oy, Vuosaaren voimalaitokset	Thermal power stations and other combustion installations	0	739	739	
2021	Fortum Power and Heat Oy	Suomenojan voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	0	560	560	
2021	Tampereen Sähkölaitos Oy	Tampereen Sähkölaitos Oy, Lielahden voimalaitos	Thermal power stations and other combustion installations	0	130	130	
2021	Raahen Voima Oy	Raahen Voima Oy, Energiantuotanto	Thermal power stations and other combustion installations	0	1960	1960	