



Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen,
Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen &
Soile Aatos

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa

Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa

Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen,
Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä & Matti Nieminen

VTT

Soile Aatos

Geologian tutkimuskeskus



ISBN 978-951-38-7697-5 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7698-2 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2011

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Kansikuva Sebastian Teir

Kopijyvä Oy, Kuopio 2011

Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa [Application of carbon capture and storage (CCS) in Finnish conditions]. Espoo 2011. VTT Tiedotteita – Research Notes 2576. 76 s. + liitt. 3 s.

Avainsanat CCS, carbon dioxide, capture, storage, transport, climate change, mitigation, Finland

Tiivistelmä

CCS-teknologia (Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi) on tehokas keino vähentää hiilidioksidipäästöjä tulevaisuudessa. VTT:n koordinoimassa CCS Suomi -projektissa (2008–2011) VTT ja GTK ovat tutkineet hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) soveltamista Suomen olosuhteissa. Kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen potentiaalia on tarkasteltu sekä kansallisella energiajärjestelmätasolla että muutamien yksittäisten esimerkkilaitosten tasolla. Suomen hiilidioksidipäästöjä on kartoitettu ja geologisia edellytyksiä hiilidioksidin varastointiin on tarkasteltu.

Projektin tulosten mukaan 10–30 % Suomen hiilidioksidipäästöistä voidaan vähentää CCS-teknologian avulla vuonna 2050, mikäli päästöoikeuden hintataso nousee noin 70–90 €/t CO₂ vuoteen 2050 mennessä. Päästövähennyksiä olisi mahdollista saada aikaan soveltamalla CCS:ää muutamiiin suuriin laitoksiin. Suomen oma maankamara ei mahdollista talteen otetun hiilidioksidin pysyvää varastointia, joten valtiorajoja ylittävä kuljetus on vaatimus sovellettaessa CCS:ää Suomessa.

Tulokset osoittavat, että mikäli tavoitellaan merkittäviä globaaleja (80–90 %) kasvihuonekaasupäästövähennyksiä, on CCS:n soveltamiselle mahdollisuuksia myös Suomessa. CCS-teknologioiden kaupallistumisen tärkein edellytys on sitova ja kunnianhimoinen kansainvälinen ilmastopimus. Teknologian kehittämisellä ja demonstroinnilla voidaan nopeuttaa kaupallistumista, mutta taloudelliset edellytykset syntyvät kansainvälisen yhteisymmärryksen ja ilmastopimuksen myötä.

Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa [Application of carbon capture and storage (CCS) in Finnish conditions]. Espoo 2011. VTT Tiedotteita – Research Notes 2576. 76 p. + app. 3 p.

Keywords CCS, carbon dioxide, capture, storage, transport, climate change, mitigation, Finland

Abstract

Carbon capture and storage (CCS) technology is an effective method for reducing carbon dioxide emissions in the future. In the VTT-coordinated project called CCS Finland (2008–2011) VTT and GTK have studied the application of CCS in Finnish conditions. Costs and the potential for reducing CO₂ emissions have been studied both on a national energy system level and an application level by a few example facilities. Finnish carbon dioxide point sources have been mapped and the geological prerequisites for storage of CO₂ have been assessed.

According to the results from the project, Finland's carbon dioxide emissions could be reduced by 10–30% by 2050 using CCS technology, if the price for emission allowance rights rise to 70–90 €/t CO₂ by 2050. The emission reductions could be achieved by applying CCS to a few large facilities. The geological conditions in Finland do not enable permanent storage of captured carbon dioxide, making cross-border transportation a requirement for applying CCS in Finland.

The results indicate that if significant (80–90%) global greenhouse gas emission reductions are pursued, there are possibilities for CCS applications also in Finland. The most important prerequisite for commercialisation of CCS technologies is a binding global climate agreement. Commercialisation can be accelerated by developing and demonstrating the technology, but the economical prerequisites arise from an international mutual understanding and a climate agreement.

Alkusanat

Tämä julkaisu on yhteenveto ”CCS Suomi – CCS:n soveltaminen Suomen olosuhteissa” -projektin tuloksista. Runsaan kolmen vuoden pituinen (1/2008–2/2011) tutkimusprojekti kuului Tekesin ClimBus-ohjelmaan. Tutkimuksen toteuttivat VTT ja Geologian tutkimuskeskus (GTK). Projektia rahoittivat Tekesin lisäksi Fortum Oyj, Foster Wheeler Energia Oy, Metso Power Oy, Pohjolan Voima Oy, Rautaruukki Oyj ja Vapo Oy. Projektipäällikkönä toimi Sebastian Teir ja projektikoordinaattorina Matti Nieminen. Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimi Joonas Rauramo ja sihteerinä Antti Arasto. Johtoryhmään kuuluivat Erkki Pisilä, Jorma Isotalo, Mikko Anttila, Arto Hotta, Pekka Sirén, Martti Korkiakoski, Pia Salokoski, Tiina Koljonen, Soile Aatos, Janne Kärki, Eemeli Tsupari ja Ilkka Savolainen. Johtoryhmän varajäseninä toimivat Mikko Iso-Tryykäri, Jorma Kautto, Reijo Kuivalainen, Mika Timonen, Raimo Nevalainen, Kalle Nuortimo, Pentti Arhippainen ja Matti Manner.

Haluamme kiittää myös Ilkka Savolaista, Sampo Soimakalliota ja Markus Hurskaista osallistumisesta raportin taustatyöhön ja luonnoksen kommentointiin.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
Symboliluettelo	8
Yhteenveto	10
1. Johdanto	1
1.1 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)	15
2. CCS:n toteuttamisen edellytykset	1
2.1 Ilmasto- ja energiapolitiikka	17
2.2 Nykyinen CO ₂ -päästörakenne Suomessa	22
2.3 Teknologian kilpailukyky	25
2.3.1 CCS-tekniikan kypsytys ja kehitys	25
2.3.2 Eri hiilidioksidipäästövähennyskeinojen vertailu	29
2.4 Kuljetus- ja varastointimahdollisuudet	31
2.4.1 Mahdollisuudet hiilidioksidin varastointiin Suomessa	31
2.4.2 Logistiikkaratkaisut Suomelle	33
3. CCS:n soveltaminen sektoreittain	1
3.1 Energiantuotanto	35
3.2 Terästeollisuus	36
3.3 Öljynjalostusteollisuus	37
3.4 Sementti- ja kalkkiteollisuus	37
3.5 Bioperäisen hiilidioksidin talteenotto	38
4. CCS:n kustannukset	1
4.1 Talteenoton kustannukset	41
4.2 Kuljetuskustannukset	44
4.3 Varastointikustannukset	46
4.4 Koko CCS-ketjun kustannustarkastelut esimerkkisovelluksissa Suomessa	47
5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti	1
5.1 Laskentamenetelmän kuvaus	55
5.2 Suomen energia- ja päästöskenaarioita vuoteen 2050	56
5.3 Yhteenveto	61
6. CCS:n toteuttaminen Suomessa	1
6.1 Roadmap CCS:n toteuttamiseen Suomessa	62
6.2 Laajamittaisen toteuttamisen hyödyt ja haitat	65
6.3 CCS-tekniikoiden kaupallistuminen	68
6.4 Suositukset	70

Lähdeluettelo..... 73

Liite A: Suomen suurimmat laitoskohtaiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2008

Symboliluettelo

BtL	<i>Biomass to liquid</i> eli biopolttoaineen tuotantoprosessi
CCS	<i>Carbon capture and storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CGS	<i>CO₂ geological storage</i> eli hiilidioksidin geologinen varastointi
CHP	<i>Combined heat and power</i> eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CLC	<i>Chemical looping combustion</i> eli hapen kantajiin perustuva poltto
EEPR	<i>European Energy Programme for Recovery</i>
EOR	<i>Enhanced oil recovery</i> eli tehostettu öljyntuotanto esim. hiilidioksidin avulla
EU ETS	<i>European Union Emission Trading Scheme</i> eli EU:n päästökaup-pajärjestelmä
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGCC	<i>Integrated gasification combined cycle</i> eli kaasutuskombivoi-malaitos
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> eli hallitusten välinen ilmastopaneeli
KHK	Kasvihuonekaasu
kt	Tuhat tonnia
LNG	<i>Liquefied natural gas</i> eli nesteytetty maakaasu
LULUCF	Maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous (LULUCF) -sektori
MEA	Monoetanoliamiini

Mt	Miljoona tonnia
NER300	Euroopan komission investointiohjelma innovatiivisten vähähii- listen teknologioiden edistämiseksi
OSPAR	Koillis-Atlantin merellisen ympäristön suojelua koskeva yleisso- pimus
PCC	<i>Precipitated calcium carbonate</i> eli saostettu kalsiumkarbonaatti
RES	<i>Renewable energy sources</i> eli uusiutuvat energialähteet
SNG	<i>Synthetic natural gas</i> eli synteettinen maakaasu
TIAM	<i>TIMES Integrated Assessment Model</i>
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System
USD	Yhdysvaltain dollari

Yhteenveto

CCS-teknologia (Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi) on tehokas keino vähentää hiilidioksidipäästöjä tulevaisuudessa. VTT koordinoimassa CCS Suomi -projektissa (2008–2011) VTT ja GTK ovat tutkineet CCS:n soveltamista Suomen olosuhteissa. CCS:n soveltamista on tarkasteltu sekä kansallisella energiajärjestelmätasolla että muutamilla yksittäisillä esimerkkilaitoksilla.

CCS perustuu hiilidioksidin talteenottoon voimalaitoksissa tai teollisuuslaitoksissa. Talteenoton jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, paineistetaan ja kuljetetaan pysyvään varastointiin putkiston tai säiliöalusten avulla. Koska talteen otettavat hiilidioksidimäärät ovat valtavia, hiilidioksidille on olemassa vain muutamia mahdollisia lopullisia varastointivaihtoehtoja, kuten ehtyneet öljy- ja kaasukentät sekä maanalaiset suolavesikerrostumat. CCS on parhaillaan voimakkaan maailmanlaajuisen kehitystyön kohteena. Menetelmän haasteina ovat suuret talteen otettavat hiilidioksidimäärät, hiilidioksidin pitkäaikaiseen varastointiin liittyvät epävarmuudet ja vastuukysymykset sekä CCS:stä aiheutuvat kustannukset.

Jotta Kööpenhaminan sitoumuksen kahden asteen tavoitteeseen päästään, pitäisi Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) mukaan kehittyneiden maiden, mukaan lukien EU:n ja Suomen, rajoittaa kasvihuonekaasupäästöjään 80–95 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Tämän saavuttamiseksi tarvittaisiin globaali sitova ilmastopimus päästövähennysvelvoitteineen jatkona Kioton sopimukseen, joka loppuu vuonna 2012, mutta tätä ei ole vielä saatu aikaan. Mikään teknologia ei yksin riitä päästövähennysten saavuttamiseen. Useissa julkisissa lähteissä suurimmat tulevaisuuden kasvihuonekaasujen päästövähennyksistä on asetettu energian loppukulutuksen tehostumiselle. Muut merkittävät keinot ovat ydinvoima, uusiutuva energia, energiatehokkuuden nostaminen energiantuotannossa, hiilen vaihto maakaasuun polttoaineena ja CCS.

EU:n jäsenmaana Suomi noudattaa EU:n päästövähennystavoitteita. Ilmasto- ja energiastrategian mukaisesti päästöjen vähentämiskeinot perustuvat Suomessa

lähitulevaisuudessa enimmäkseen ydinvoiman, tuulivoiman ja puuperäisten polttoaineiden osuuden kasvattamiseen sekä energiatehokkuuden parantamiseen. Lisäksi liikenteen päästöjä vähennetään nestemäisten biopolttoaineiden osuutta lisäämällä. Suomen hallituksen tulevaisuusselonteon mukaan Suomessakin tavoitellaan 80 %:n päästövähennystä vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta, ja CCS on mainittu yhtenä mahdollisena päästövähennyskeinona, mikäli teknologian esteitä saadaan raivattua.

Hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologiaa on jo osittain kaupallisesti saatavilla, mutta CCS:ää ei ole vielä demonstroitu suurimittaisena voimalaitossovelluksena. Kehitystyötä talteenottoteknologioiden parantamiseksi tarvitaan, sillä kustannukset ovat nykyteknologialla selvästi liian korkeita. Sen lisäksi kaikki talteenottomenetelmät vaativat energiaa ja huonontavat huomattavasti voimalaitosten hyötysuhdetta. Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla nähdään lupaavana teknologiana Suomelle sekä teknologiaviennin että voimalaitossoveltamisen kannalta. Hiilidioksidin putkikuljetus, komprimointi sekä puhdistus ja prosessointi ovat jo tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla tarvittavassa kokuoluokassa. Myös varastointiin tarvittavat ratkaisut ovat olleet vuosia käytössä mm. Norjan ja Pohjois-Amerikan tehostetussa öljyn- ja maakaasun tuotannossa. Kuitenkin varastointiin, erityisesti varastointikapasiteetteihin ja niiden arviointeihin, liittyy edelleen merkittäviä epävarmuuksia. Epävarmuuksia liittyy myös pitkäaikaisen varastoinnin pysyvyyteen ja suureen yleisön hyväksyntään.

Suomen oma maankamara ei mahdollista talteenotetun hiilidioksidin kotimaista loppusijoittamista, joten valtiorajat ylittävä kuljetus on vaatimus sovellettaessa CCS:ää Suomessa. Suomea lähimmät hiilidioksidin loppusijoitukseen mahdollisesti soveltuvat alueet sijaitsevat Puolan ja Saksan pohjoisosissa, eteläisessä Tanskassa sekä Itämeren eteläosan merialueilla, Barentsinmerellä ja Pohjanmerellä. Tällä hetkellä hiilidioksidia loppusijoitetaan kaupallisesti Suomen läheisyydessä vain Snöhvitin ja Sleipnerin kaasukentillä Pohjan- ja Barentsinmerellä.

Huomattavia päästövähennyksiä olisi kuitenkin mahdollista saada aikaan soveltamalla CCS:ää muutamiin suuriin laitoksiin. Suomen päästökaupparekisterin melkein 600 laitoksesta päästöjen perusteella 14 suurinta laitosta vastaa yli puolta rekisterissä olevien laitosten yhteenlasketuista päästöistä. Suomen suurimmat hiilidioksidin päästäjät ovat voimalaitoksia, terästehtaita ja öljynjalostamoja. Lisäksi voitaisiin liikenteen biopolttoaineiden ja suurten voimaloiden yhteydessä ottaa talteen myös bioperäinen CO₂. Kaksi viidesosaa Suomen 77 suurimman laitoksen hiilidioksidipäästöistä on peräisin biomassasta, joka on päästökaupassa määriteltä hiilineutraaliksi polttoaineeksi. Kolme viidesosaa on peräisin hiilen,

maakaasun, öljyn ja turpeen käytöstä. Monille teollisuuslaitoksille – terästehtaille, polttoainetalostamoille, sementtitehtaille ja kalkinpolttolaitoksille – CCS on yksi harvoista menetelmistä, joilla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä tuntuvasti. Teollisuuslaitoksille on olemassa kuitenkin vähemmän talteenottomenetelmiä kuin voimalaitoksille.

Valtaosa suurimmista hiilidioksidipäästäjistä sijoittuu rannikon läheisyyteen, mikä mahdollistaa hiilidioksidin kuljetuksen varastointipaikkaan laivalla. Laivakuljetus nähdään potentiaalisimpana kuljetusmenetelmänä kaupallistumisen alkuvaiheessa infrastruktuurin nopean rakentamisen ja putkikuljetusta edullisempien kokonaiskustannusten takia. Pitkä kuljetusmatka tekee kuitenkin CCS-tekniikan kalliimmaksi soveltaa Suomessa kuin esimerkiksi Norjassa tai muissa manner-Euroopan maissa.

CCS-tekniikan suurimmat kustannukset liittyvät yleensä talteenottovaiheeseen. Kaikki hiilidioksidin talteenottoon vaativat paljon lisälaitteistoja ja talteenotto sekä paineistus vaativat runsaasti energiaa. Vältettyjen päästöjen julkiset kustannusarviot hiilidioksidin talteenotolle ja varastoinnille vaihtelevat paljon ja ovat karkeasti n. 50–100 €/t CO₂. CCS Suomi -projektissa arvioitiin CCS:n soveltamista yksityiskohtaisesti kolmessa eri Suomessa sijaitsevassa sovelluskohteessa, joiden oletettiin kustannustarkasteluissa käynnistyvän vuonna 2015. Tulokset näyttivät, että CCS:n kustannukset ovat voimakkaasti riippuvaisia itse tarkastelevan sovelluskohteen ominaisuuksista ja toimintaympäristöstä, mutta lisäksi käytetyistä tarkasteluiden rajauksista ja oletuksista. Vältettyjen hiilidioksidipäästöjen kustannukset vaihtelivat tyypillisesti 70 €/t CO₂ ja 110 €/t CO₂ välillä. Tietyissä sovelluskohteissa voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia parannuksia hyödyntämällä tehokkaasti CCS:n ja perusprosessin välisiä lämpö-integrointeja sekä lämmön hyötykäytöllä esim. kaukolämmön tuotannossa. Lisäksi toiminnan taloudellisuutta voidaan tehostaa CCS:n mahdollistamalla, uudentyyppisillä prosessien ajotaparatkaisilla, esim. ohittamalla CCS-prosessi korkean sähkön markkinahinnan aikana.

CCS:n roolia Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti arvioitiin skenaariotarkasteluissa, joissa hyödynnettiin projektissa arvioituja hiilidioksidin erotuksen ja kuljetuksen kustannuksia sekä energiantuotannossa että teollisuuslaitoksissa. Skenaariolaskelmien johtopäätöksenä voidaan todeta, että 10–30 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä voitaisiin vähentää CCS-tekniikan avulla vuonna 2050. Tämä edellyttää päästöoikeuden hintatason nousua noin 70–90 €/tonn CO₂ vuoteen 2050 mennessä. Päästöoikeuksien korkea hinta nostaisi myös teollisuuden tuotteiden kustannuksia sekä huonontaisi kansainvälistä kilpailukykyä.

Tulosten mukaan CCS:n avulla tätä kustannuspainetta voitaisiin lieventää. Herkkyystarkastelut osoittivat, että mahdollinen tulevaisuuden ydinvoimakapasiteetin lisääminen ei vaikuttanut juurikaan CCS-potentiaaliin, koska alhaisempi sähkön hintataso ydinvoimakapasiteetin kasvaessa paransi CCS:n kannattavuutta teollisuuden prosesseissa. Skenaariotarkastelut osoittavat, että tavoiteltaessa suuria päästöleikkauksia, CCS:llä voisi olla merkittävä rooli Suomen energiajärjestelmässä. Mahdollisuudet hyödyntää bio-CCS:ää kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä lisääisivät CCS:n potentiaalia merkittävästi erityisesti Suomessa.

Fortumin Meri-Pori-hankkeen kaaduttua on epätodennäköistä, että yhtäkään CCS-laitosta rakennettaisiin Suomeen ennen vuotta 2020. Suomessa ensimmäiset kaupalliset sovelluskohteet nähdään todennäköisesti polttoainjalostuksessa, koska käytännön kokemus hiilidioksidin talteenottamisesta ja kuljetuksesta laivoilla löytyy jo tästä teollisuudenhaarasta. Tulevat biopolttoaineen tuotantolaitokset nähdään hyvin potentiaalisina ensimmäisinä CCS:n sovelluskohteina, koska hiilidioksidin talteenottamisesta aiheutuvat lisäkustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat kuin esim. voimalaitoksista talteenotettaessa. EU:n nykyinen päästökauppajärjestelmä ei kuitenkaan sisällä mitään taloudellisia kannustimia bioperäisen hiilidioksidin talteenottoon. Suomeen tullaan rakentamaan melko paljon uutta energiantuotantokapasiteettia lähivuosikymmeninä, mikä avaa mahdollisuuden soveltaa CCS:ää tai CCS-valmiutta voimalaitoksiin. Varsinkin suuret, uudet CHP-laitokset, jotka pystyvät polttamaan hiiltä, biomassaa tai turvetta, nähdään lupaavina CCS-sovelluskohteina.

Yhteenvetona projektin tuloksista voidaan todeta, että mikäli tavoitellaan suuria globaaleja 80–90 %:n päästövähennyksiä, CCS:lle on tilaa myös Suomessa. CCS-tekniologioiden kaupallistumisen tärkein edellytys on sitova, kansainvälinen ilmastopuolitus. Tekniologioiden kehittämisellä ja demonstroinnilla voidaan nopeuttaa kaupallistumista, mutta taloudelliset edellytykset syntyvät kansainvälisen yhteisymmärryksen ja ilmastopuolituksen myötä.

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillintää pidetään yhtenä aikakautemme suurimmista haasteista. Kansainvälisessä politiikassa on muodostumassa yhteisymmärrys siitä, että ilmaston muutoksesta seuraavia haittoja voidaan lieventää merkittävästi, mikäli onnistutaan rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu noin kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Tämän saavuttaminen vaatisi jopa 50–85 %:n kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksen vuoden 2000 tasosta vuoteen 2050 mennessä (IPCC 2007). Maailman nykyinen energiajärjestelmä perustuu kuitenkin fossiilisiin polttoaineisiin, joiden käyttö kasvaa jatkuvasti.

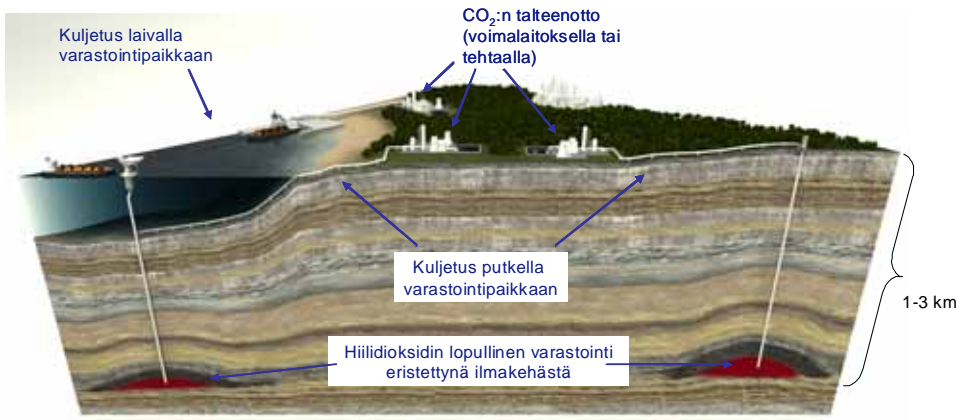
Jotta kahden asteen tavoitteeseen päästään, olisi maailman nouseva hiilidioksidipäästötrendi käännettävä laskuun jo lähivuosina. Sitä varten tarvitaan nopeasti rajuja toimenpiteitä, joista kansainvälisesti sitova ilmastopimus olisi yksi tärkeimmistä edistysaskeleista. EU:n jäsenmaana Suomi on jo sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään vuoteen 2020 mennessä 20 %:lla, ja mikäli kansainvälinen ilmastopimus aikaansaadaan, vähennysvaatimukset kiristynevät.

Keinoja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä on useita. Ilmastohaasteen ratkaisu edellyttää, että kaikki keinot ovat käytettävissä. IEA:n mukaan tärkein lyhyen tähtäimen päästövähennyskeinoista olisi tehokkaampi energian käyttö, jolla saavutettaisiin runsaat puolet vuoden 2030 tavoitelluista päästövähennyksistä (IEA 2009). Tämän lisäksi uusiutuvalla energialla saavutettaisiin runsaat 20 % päästövähennystavoitteesta, ydinvoimalla 10 % ja hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla (CCS) 10 %. Vuonna 2050 CCS:llä saavutettaisiin jopa viidennes päästövähennystavoitteesta.

Tässä raportissa on tarkasteltu CCS:n mahdollista roolia Suomessa hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinona.

1.1 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) on laajan tutkimuksen ja kehityksen kohteena maailmanlaajuisesti. Teknologia perustuu hiilidioksidin talteenottamiseen suurissa pistelähteissä, kuten teollisuuslaitoksissa ja voimalaitoksissa, minkä jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, paineistetaan ja kuljetetaan pitkäaikaiseen säilytykseen (Kuva 1.1). Lupaavimmat teknologiat voimalaitoksia varten voidaan jakaa kolmeen eri konseptiin, joita ovat talteenotto savukaasuista, talteenotto ennen polttoa tai talteenotto happipolton avulla. Kaikki vaihtoehdot vaativat kuitenkin paljon energiaa. Eri talteenottomenetelmillä on hyvät ja huonot puolensa, ja talteenottomenetelmän valinta onkin käytännössä tapauskohtaista.



Kuva 1.1. Periaatekuva hiilidioksidin talteenotosta, kuljetuksesta ja lopullisesta varastoinnista (kuva: Bellona).

Talteenoton jälkeen hiilidioksidi on varastoitava pysyvästi eristettynä ilmakehästä. Hiilidioksidin kuljetusta varastointipaikkaan tarvitaan, ellei sopiva varastointipaikka sijaitse talteenottolaitoksen läheisyydessä. Kuljetus kaasuputkia pitkin on kaupallista teknologiaa ja tavallisin menetelmä hiilidioksidin kuljetuksessa. Hiilidioksidia voidaan kuljettaa myös nesteinä laivoilla lämpöeristetyissä tankeissa, joissa lämpötila on matalampi kuin huonelämpötila ja paine huomattavasti matalampi kuin putkikuljetuksessa.

Koska talteenotettavat hiilidioksidimäärät ovat suuria, miljoonia tonneja vuosittain, hiilidioksidille on olemassa vain muutamia mahdollisia lopullisia varastointivaihtoehtoja. Ainoa täysimittaisesti demonstroitu menetelmä on varastointi

1. Johdanto

geologisiin muodostumiin, kuten ehtyneisiin öljy- ja kaasukenttiin ja suolavesikerrostumiin. USA:ssa ja Kanadassa käytetään hiilidioksidia hiipuvan öljykentän tuotannon lisäämiseen useissa kohteissa, jolloin suurin osa hiilidioksidista pidättyy kenttään. Maailman öljy- ja kaasukenttien varastointikapasiteetilla ei kuitenkaan yksinomaan saavuteta päästövähennystavoitetta. Sen sijaan maailman maanalaiset suolavesikerrostumat voisivat kansainvälisten tutkimusten perusteella olla kapasiteetiltaan riittäviä. Suolavesikerrostumat ovat maanalaisia suolaisen veden täyttämiä huokoisia sedimentti- tai kivikerroksia, jotka voivat soveltua hiilidioksidin varastointiin. Hiilidioksidia sijoitetaan jo nykyisin merenpohjan alla sijaitseviin suolavesikerrostumiin muutamassa demonstraatioprojektissa, esim. Pohjanmerellä ja Barentsin merellä.

Silikaattimineraalien avulla voitaisiin teoriassa sitoa hiilidioksidia myös kiinteiksi karbonaattimineraaleiksi. Sitomisprosessien suurten energiavaatimusten takia tämä menetelmä ei ole vielä toteuttamiskelpoinen. Teollisuudessa on myös käyttöä hiilidioksidille, mutta tarvittavat määrät ovat hyvin pieniä ja hiilidioksidi päätyy yleensä kuitenkin ilmakehään käytön jälkeen.

Kaikki kehitteillä olevat hiilidioksidin talteenottomenetelmät vaativat merkittäviä laiteinvestointeja ja kuluttavat energiaa. Toisaalta teknologian kehityksen myötä kustannusten ja energiankulutuksen on arvioitu laskevan, kun taas hiilidioksidin päästöoikeuksien hinnan on arvioitu pitkällä aikavälillä nousevan huomattavasti. Kustannusten alentamisen lisäksi haasteisiin kuuluu myös varastoidun hiilidioksidin pysyvyyden varmistaminen sekä päästövähennyksen vahvistamiseksi että mahdollisten ympäristö- ja terveysriskien välttämiseksi. Suurimmat hiilidioksidivuodon riskit ovat meri- tai pohjaveden pilaantuminen, merenpohjan tai maaperän happamoituminen sekä ilman ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu. Jotta CCS:llä olisi toivottu vaikutus ilmastonmuutoksen hillinnässä, lähes kaiken varastoidun hiilidioksidin olisi pysyttävä varastossa eristettynä ilmakehästä tuhansia vuosia. EU pyrkii uudella direktiivillä takaamaan hiilidioksidin turvallisen varastoinnin ja riittävän valvonnan. Direktiivissä on esitetty useita vaatimuksia toiminnanharjoittajille. Yksi direktiivin tavoitteista on lisätä jäsenmaiden kansalaisten luottamusta CCS:ää kohtaan.

CCS:stä löytyy tarkempaa tietoa CCS Suomi -projektin muista raporteista (Teir et al. 2009, Teir et al. 2011).

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

2.1 Ilmasto- ja energiapolitiikka

EU:n jäsenmaana Suomen tulee noudattaa kansallisessa energia- ja ilmastopoliitikassaan ja lainsäädännössään EU:n ilmasto- ja energiapoliittisia linjauksia ja niitä koskevia direktiivejä. CCS:n toteuttamisen edellytyksiin tämä vaikuttaa mm. päästökaupan ja hiilidioksidin geologisen varastoinnin lainsäädännön kautta. Näitä EU:n laajuisia säädöksiä on kuvattu tarkemmin mm. raportissa Teir et al. (2011). Samassa raportissa on esitelty myös muuta kansainvälistä CCS:ään liittyvää lainsäädäntöä ja sopimuksia, kuten esimerkiksi merikuljetuksiin liittyvää OSPAR-sopimusta. Tässä luvussa keskitytään kansainvälisten säädösten sijaan enemmän CCS:n toteuttamisen edellytyksiin erityisesti Suomessa.

Kioton pöytäkirjan yhteinen kasvihuonekaasupäästöjen (KHK-päästöjen) vähennysvelvoite EU-15-maille on edelleen jaettu EU:n sisäisen taakanjakosopimuksen mukaisesti maakohtaisiksi velvoitteiksi. Suomen velvoitteena on pitää mukaan laskettavat KHK-päästöt vuosina 2008–2012 keskimäärin vuoden 1990 tasolla (YM 2010). Vuonna 2008 Suomen kyseiset KHK-päästöt olivat noin 1,2 % alle velvoitetason (Tilastokeskus 2010a). EU:n ilmasto- ja energiapaketin tavoitteen mukaisesti EU:n kasvihuonekaasupäästöjä on edelleen vähennettävä 20 % vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoteen 1990 (EC 2009a). Vuoden 2020 päästövähennystavoite on EU:ssa jaettu EU-laajuiseen ns. päästökaupasektoriin (ETS) ja päästökaupan ulkopuolelle jäävien sektorien muodostamaan jäsenmaakohtaiseen kansalliseen sektoriin (ei-ETS). Suomessa noin puolet KHK-päästöistä kuuluu ETS-sektorille, jonka päästövähennystavoite on 21 % vuoden 2005 päästömäärään verrattuna. Kansallinen päästövähennystavoite ei-ETS -sektorille vuonna 2020 on -16 % vuoden 2005 tasosta (EC 2009b). Mikäli kattava kansainvälinen sopimus saadaan aikaan, EU on valmis nostamaan päästövähennystavoitteen 30 %:iin vuoteen 1990 verrattuna. Tällöin tapa, jolla päästö-

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

tavoite jaetaan päästökauppasektorin ja kansallisten kiintiöiden kesken, on edelleen avoin, ja riippuu mm. maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätaloussektorin kansainvälisistä laskentasäännöistä.

Käytännössä CCS:n toteutumisen kannalta myös Suomessa edellä mainittuja jo sovittuja päästövähennystavoitteita olennaisempia tulevat olemaan kansainväliset sopimukset pidemmän aikavälin KHK-päästövähennyksistä sekä niiden sitovuus ja aikataulu. Kööpenhaminan sitoumuksen (UNFCCC 2009) ja Euroopan Unionin valtionpäämiesten neuvoston (Eurooppa-neuvoston) tavoitteiden mukaisesti pitkällä aikavälillä pyritään pysäyttämään maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Kehittyneiden maiden, mukaan lukien EU:n ja Suomen, tulee tällöin IPCC:n arvion (IPCC 2007) mukaan rajoittaa päästöjään vähintään 80–95 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Suomen hallituksen tulevaisuusselonteon mukaan Suomessa tavoitellaan 80 %:n päästövähennystä vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta (VNK 2009). Tulevaisuusselonteon mukaan CCS:llä voisi olla rooli vähäpäästöisessä Suomessa, mikäli hiilen talteenoton ja varastoinnin esteitä saadaan rai-vattua. CCS:n yhdistäminen bioenergian tuotantoon mainitaan ”pitkän aikavälin radikaalin vähäpäästöisten polkujen kannalta kiinnostavimpana mahdollisuutena”.

Potentiaaliset CCS-sovelluskohteet kuuluvat lähes poikkeuksetta päästökaupan piiriin. Edellä kuvatut sitovat päästövähennysvelvoitteet luovat reunaehdot mm. päästökaupassa käytettävissä olevien päästöoikeuksien määrään. Päästöoikeuksien määrä puolestaan vaikuttaa päästöoikeuden hintaan ja siten erilaisten päästövähennysinvestointien taloudelliseen kannattavuuteen. CCS:n toteutuminen kaupallisin perustein Suomessa riippuu erityisesti ennusteesta päästöoikeuden hinnalle. Lisäksi CCS:n taloudellinen kannattavuus riippuu mm. sähkön, lämmön ja polttoaineiden hinnoista sekä vaihtoehtoisten energian tuotantotapojen tai päästövähennyskeinojen kilpailukyvyistä. Päästöoikeuden hinnan pitäisi myös olla tarpeeksi ennustettava riittävän pitkällä aikavälillä, jotta CCS-investointeja kannattaa tehdä. Tämä vaatii sitovia ja tarpeeksi pitkäjänteisiä KHK-päästövähennysvelvoitteita. On kuitenkin hyvä korostaa, että korkea päästöoikeuden hinta voi joissain tapauksissa tarkoittaa myös kannattamatonta toimintaa, jolloin tuotantolaitoksen sulkeminen voi tulla kyseeseen ennen CCS:ään investoimisen kannattavuutta.

Eduskunnan päätökset myöntää luvat kahdelle uudelle ydinvoimalalle heinäkuussa 2010 vaikuttavat muiden energiantuotantoinvestointien kannattavuuteen Suomessa. Valmistuttuaan uudet ydinvoimalat oletettavasti laskevat sähkön markkinahintaa vähentäen kiinnostusta investoida muihin uusiin energiantuotanto-

laitoksiin. Lisäksi eduskunnan joulukuussa 2010 hyväksymä hallituksen esitys energiaverotusta koskevan lainsäädännön muuttamisesta korottaa fossiilisten polttoaineiden verotusta merkittävästi (VM 2010), mikä vähentää edelleen kiinnostusta investoida fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaan energiantuotantoon. EU:n energia- ja ilmastopakettin ns. RES-direktiivin mukaan Suomen tulee lisätä uusiutuvien energianlähteiden osuutta energian loppukulutuksesta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä (EC 2009c). Vuonna 2005 vastaava osuus oli 28 %, joten tavoite on haastava. Suomen kansallisen ilmasto- ja energiastrategian mukaisesti (VN 2008) tavoitteeseen pyritään lisäämällä merkittävästi mm. tuulivoimaa ja puuperäisten polttoaineiden käyttöä. Tähän kannustetaan päästökaupan lisäksi myös pienpuun energiatuella, syöttötariffeilla ja mahdollisesti investointituilla. Syöttötariffijärjestelmän ulkopuolelle jäävälle metsähakkeeseen perustuvalla sähkön tuotannolle maksettaisiin edelleen kiinteää tukea (TEM 2010). Osittain puupolttoaineiden lisääminen tulee korvaamaan turvetta olemassa olevissa kattiloissa, mutta myös useita uusia puuta polttavia laitoksia tullaan todennäköisesti rakentamaan. Laskennallisesti negatiiviset päästöt eivät kuitenkaan ole päästökaupassa ainakaan toistaiseksi mahdollisia (KTM 2007), joten myös lainsäädännöllisiä muutoksia vaadittaisiin, että näihin uusiin laitoksiin kannattaisi investoida täyden mittakaavan CCS:ää. Osittainen (fossiilisista polttoaineista syntyvää CO₂-määrää vastaava) hiilidioksidin talteenotto hiilineutraalien ja fossiilisten polttoaineiden rinnakkaispoltosta voisi kuitenkin jo nykyllä tulla kyseeseen, mikäli se osoittautuu kustannustehokkaaksi.

Ilmasto- ja energiastrategiassa keskeisen huomion kohteena on kotimainen energia. Strategian mukaan turve on kotimainen energialähde, jonka käyttö on energiahuollon normaali- ja poikkeusaikojen varmuuden ja energiarakenteen monipuolistamisen kannalta tärkeää. Strategiassa myös mainitaan tavoitteeksi, että turpeen tuotantoon ja käyttöön panostetut voimavarat voitaisiin jatkossakin hyödyntää työllisyyttä ja alueellista kehitystä edistäen (VN 2008). CCS parantaisi turpeen asemaa myös ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta. Laitosten verrattain pieni kokoluokka ja sijainti tyypillisesti sisämaassa voivat kuitenkin huonontaa turve-CCS:n kannattavuutta.

Tulevaisuudessa lainsäädäntöä mahdollisesti muutetaan siten, että myös laskennallisesti negatiiviset CO₂-päästöt ovat päästökaupassa mahdollisia. Tämä parantaisi CCS:n laajamittaisen käytön kannattavuutta Suomessa mm. rinnakkaispolttolaitoksissa. Suomessa kuitenkin myös rinnakkaispolttolaitokset ovat pääsääntöisesti verrattain pieniä, jolloin suhteelliset investointikustannukset ovat suurempia kuin isoissa laitoksissa. Lisäksi laitokset sijaitsevat usein sisämaassa.

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

CCS:n soveltaminen esimerkiksi terästeollisuudessa, mineraaliteollisuudessa tai tulevaisuuden biopolttonestelaitoksissa voi mahdollisten lämpöintegrointien, hapen, korkeiden lämpötilojen ja muiden prosessiominaisuuksien hyödyntämisen sekä suurempien CO₂-pitoisuuksien vuoksi olla energia- ja kustannustehokkaampaa kuin CCS voimalaitosten yhteydessä. Runsaiden kotimaisten biomassaja turvevarantojen takia on mahdollista, että Suomeen tullaan rakentamaan esimerkiksi Fischer–Tropsch-prosessia hyödyntäviä biodiesel-laitoksia, joista syntyy joka tapauksessa lähes puhdasta hiilidioksidia (katso myös alakohta 3.5). Mikäli biopolttonestelaitokset rajataan päästökaupan ulkopuolelle tai päästökaupassa ei hyvitetä laitoksia ”negatiivisista” päästöistä, CCS:n soveltaminen tällaisiin, mahdollisesti hyvinkin kustannustehokkaisiin kohteisiin vaatisi jonkin muun taloudellisen kannustimen.

Moniin muihin maihin verrattuna Suomessa on myös hyvät mahdollisuudet hyödyntää CCS-prosesseista syntyvää hukkalämpöä esimerkiksi olemassa olevissa kaukolämpöverkoissa. Hukkalämpöä syntyy huomattavia määriä sekä happipolttoon että post-combustion-ratkaisuihin perustuissa CCS-prosesseissa. Vaikka prosessien kehittyminen ja tehostuminen oletettavasti tulevat vähentämään hukkalämpöjen määrää, voi niiden hyödyntäminen parantaa merkittävästi CCS:n taloudellisuutta. Koska hukkalämpöjä syntyy nykyisissä CCS-prosesseissa kokoluokasta riippuen jopa satoja megawatteja, tulisi niiden hyödyntäminen vaikuttamaan merkittävästi alueen nykyiseen kaukolämmön tuotantoon ja siten todennäköisesti myös vähentämään olemassa olevaa CHP-sähköntuotantoa. Muissa saman kaukolämpöverkon laitoksissa menetetty sähköntuotanto siis oletettavasti vähentää hukkalämpöjen hyödyntämisestä saatavaa nettohyötyä jonkin verran, tapauksesta ja mm. sähkön hinnasta riippuen. Suomeen ollaan rakentamassa myös useita uusia jätteenpolttolaitoksia. Jätteenpolttolaitokset tuottavat kaukolämmön peruskuormaa kyseisten alueiden verkkoon pienentäen alueen muuta lämmöntuotannon tarvetta. Näin ollen myös uudet jätteenpolttolaitokset vähentävät CCS:n potentiaalia Suomessa, sillä CCS:n soveltaminen jätteenpoltossa lienee liian haasteellista.

Hukkalämpöjen hyödyntäminen parantaisi merkittävästi myös CCS:n energiatehokkuutta. Paljon energiaa kuluttavat CCS-prosessit ovat ristiriitaisia EU:n energia- ja ilmastopakettien energiatehokkuustavoitteen sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategian kanssa. Sitovia velvoitteita energian loppukulutuksen tai päämäärienergian kulutuksen vähentämiselle valtiotasolla ei ole kuitenkaan esitetty, mutta EU:n energiatehokkuuden toimintasuunnitelmassa mainitaan komission

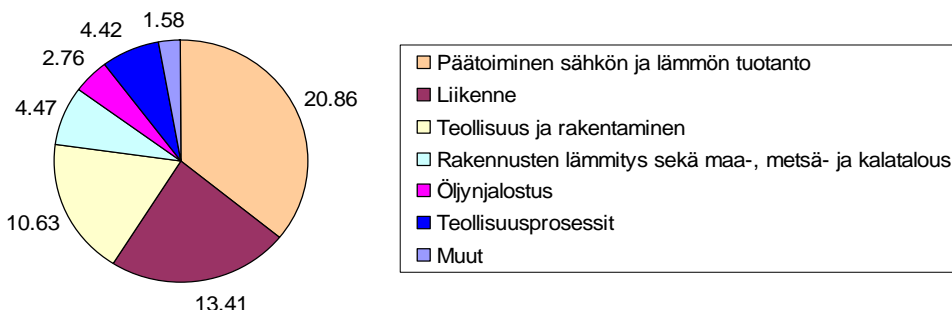
mahdollisesti harkitsevan sitovia tehokkuuden vähimmäisvaatimuksia uusille sähkön, lämmön ja jäähdytysenergian tuotantolaitoksille (EC 2006).

Suomessa sovelletaan osittain CCS:ää jo nyt Nesteen jalostamolla Porvoossa sekä muutamassa paperitehtaassa PCC:n (engl. *precipitated calcium carbonate*, paperin pinnoitteena käytettävä CaCO_3) muodossa. PCC:n valmistuksessa sidottu hiilidioksidi voidaan päästökaupassa vähentää laitoksen päästöistä (päästökaupassa termillä siirretty hiilidioksidi). Edellytyksenä vähentämiselle on, että vähennys tehdään myös kansallisessa inventaariossa (KTM 2007). PCC:n valmistukseen tarvitaan kuitenkin poltettua kalkkia, jonka tuotanto synnyttää enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin PCC:n valmistuksessa sitoutuu. Porvoon jalostamolta talteenotetaan muutamia satoja tuhansia tonneja hiilidioksidia vuodessa, jota puhdistetaan ja myydään teollisuuskäyttöön. Suomessa on siis jo olemassa eräänlaisia ennakkotapauksia CCS:n kaltaisten prosessien soveltamisesta päästökauppajärjestelmässä.

Yhteenvetona CCS:n toimintaedellytyksistä Suomessa voidaan todeta, että EU:n jäsenmaana Suomi noudattaa EU:n päästövähennystavoitteita, mutta ilmasto- ja energiastrategian mukaisesti päästöjen vähentämiskeinot perustuvat Suomessa lähitulevaisuudessa enimmäkseen ydinvoiman, tuulivoiman ja puupöytäisten polttoaineiden osuuden kasvattamiseen sekä energiatehokkuuden parantamiseen (VN 2008). Fossiilisten polttoaineiden verotusta ollaan kiristämässä huomattavasti, mutta huoltovarmuuden ja omavaraisuuden takia turve oletettavasti pysyy Suomessa merkittävänä polttoaineena, ja on mahdollista, että siitä aletaan valmistaa myös dieseliä. Turve tarjoaa siis useita mahdollisia CCS-sovelluskohteita, joskin laitosten verrattain pieni kokoluokka ja usein kaukana rannikolta oleva sijainti voivat huonontaa kannattavuutta. CCS:n toimintaedellytysten kannalta Suomessa on olennaista päästökaupan tai muun kannustinjärjestelmän kehittäminen siten, että toimijoita hyvitettäisiin ”negatiivisista” CO_2 -päästöistä, jolloin myös puupolttoaineista tai biodieselin valmistuksesta peräisin olevan CO_2 :n talteenotto voi tulla hyvinkin kannattavaksi. Lisäksi raskaasta teollisuudesta, jossa joissain kohteissa polttoaineita on vaikea korvata vähemmän CO_2 -päästöjä aiheuttavilla, voi löytyä potentiaalisia CCS-sovelluskohteita. Moiniin muihin maihin verrattuna CCS:n hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuus kaukolämpöverkossa parantaa CCS:n energiatehokkuutta ja kannattavuutta Suomessa, mutta toisaalta verrattain huonot yhteydet varastointipaikoille nostavat kustannuksia.

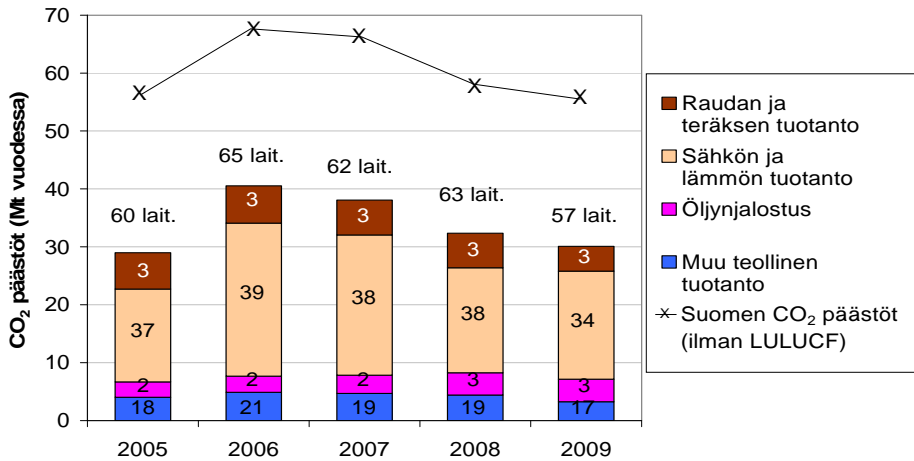
2.2 Nykyinen CO₂-päästörakenne Suomessa

Suomen kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2008 noin 70 Mt CO₂-ekv., josta hiilidioksidipäästöt olivat 58 Mt (Tilastokeskus 2010a). Suurin hiilidioksidipäästösektori oli sähkön- ja lämmöntuotanto (20,9 Mt CO₂). Liikenne oli toiseksi suurin sektori sekä teollisuus ja rakentaminen kolmanneksi suurin sektori (Kuva 2.1).



Kuva 2.1. Suomen hiilidioksidipäästöt vuonna 2008 (ei sisällä biogeenisiä CO₂-päästöjä eikä LULUCF-sektori). Yksikkö: Mt (Tilastokeskus 2010a).

Suurimpia yksittäisiä hiilidioksidipäästölähteitä Suomessa on tarkasteltu päästökaupparekisterin avulla potentiaalisimpien CCS-sovelluskohteiden hahmottamiseksi. Ainoastaan laitokset, joiden vuosittaiset hiilidioksidipäästöt ylittävät 100 000 t, on otettu mukaan tarkasteluun. Vuonna 2008 EU:n päästökauppaan oli rekisteröity 594 Suomen laitosten hiilidioksidipäästöjä (fossiilisia ja mineraaliperäisiä). Yhteensä näiden laitosten päästöjen summa oli 36,2 Mt CO₂. Näistä laitoksista 63 suurimman laitoksen (päästöjen perusteella) hiilidioksidipäästöt ylittivät 100 000 t, ja niiden yhteenlasketut päästöt olivat 32,3 Mt CO₂, eli 89 % päästökaupparekisterissä olevien laitoksien yhteenlasketuista päästöistä ja 55 % Suomen CO₂-päästöistä (ilman LULUCF-luokkaa) vuonna 2008. 14 suurimman laitoksen päästöt vastasivat yli puolta (52 %) päästökaupparekisterissä olevien laitoksien yhteenlasketuista päästöistä. Näistä suurimmat päästäjät (> 1 Mt CO₂ v. 2008) olivat terästehdas Raahessa, öljynjalostamo Porvoossa, ja voimalaitokset Meri-Porissa, Naantalissa, Vuosaarella (Helsingissä) ja Vaskiluodossa.



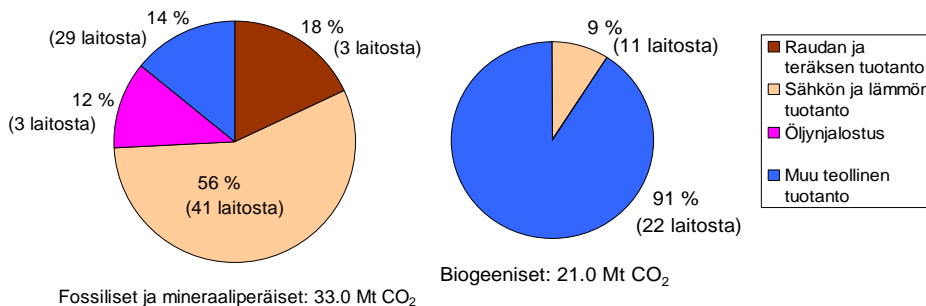
Kuva 2.2. Hiilidioksidipäästöjen perusteella Suomen suurimpien laitosten yhteenlasketut päästöt ja laitosten lukumäärä sektoreittain. Tarkasteluun on otettu vain laitokset, joiden fossiiliset ja mineraaliperäiset hiilidioksidipäästöt ylittivät 100 000 t per vuosi (lähteet: EMV 2010, Tilastokeskus 2010b).

Päästökaupparekisterissä olevien laitosten lukumäärä ja niiden hiilidioksidipäästöjen vaihtelu vuosina 2005–2009 on hahmoteltu Kuvassa 2.2. Suurin osa päästöistä on peräisin sähkön ja lämmön tuotantolaitoksista. Huomattava osa päästöistä on myös keskittynyt muutamaankin raudan ja teräksen tuotantolaitokseen sekä kahteen öljynjalostamoon. Loput päästöistä on peräisin pääosassa sementin ja kalkin tuotantolaitoksista sekä massan- ja paperintuotantolaitoksista.

Tarkastelua laajennettiin ottamalla huomioon myös biomassan poltosta peräisin olevia hiilidioksidipäästöjä. Biomassan poltosta peräisin olevat (biogeeniset) hiilidioksidipäästöt eivät kuitenkaan kuulu tällä hetkellä päästökaupan piiriin. Siksi tietokantaa täydennettiin käyttämällä massan- ja paperintuotantolaitosten raportoituja biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä vuodelle 2008 ja laskettuja hiilidioksidipäästöjä sähkön ja lämmöntuotantolaitosten biopolttoaineiden käytön perusteella. Kun myös biogeeniset hiilidioksidipäästöt huomioitiin, kasvoi tietokanta 12:lla massan- ja paperintuotantolaitoksella ja yhdellä voimalaitoksella, joiden laitoskohtaiset kokonaishiilidioksidipäästöt ylittivät 100 000 t vuodessa. Laitokset ovat listattuina liitteessä A. Kuvassa 2.3 näkyy fossiilisten ja mineraaliperäisten sekä biomassaperäisten hiilidioksidipäästöjen jako sektoreittain. Kun laitoskohtaiset kokonaishiilidioksidipäästöt (sekä biogeeniset että fossiiliset ja mineraaliperäiset hiilidioksidipäästöt) otetaan huomioon, tuli massan- ja pape-

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

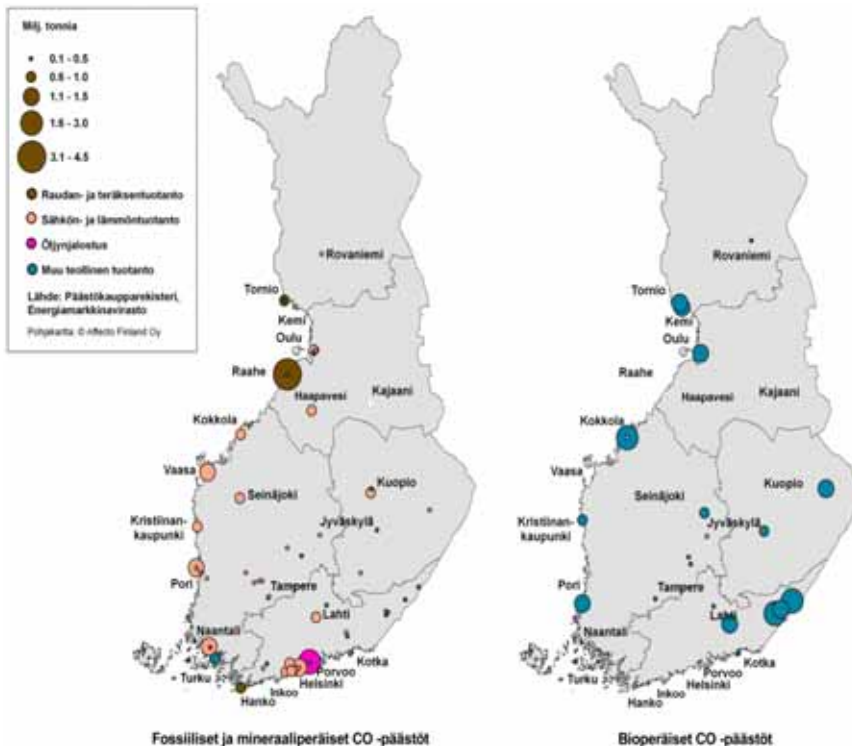
rintuotantoon liittyvistä laitoksista hieman enemmän päästöjä (22,3 Mt CO₂) kuin yhteiskunnan sähkön ja lämmöntuotannosta (20,4 Mt CO₂).



Kuva 2.3. Hiilidioksidipäästöjen perusteella Suomen suurimpien laitosten yhteenlasketut päästöt ja laitosten lukumäärä sektoreittain vuonna 2008. Tarkasteluun on otettu vain laitokset, joiden kokonaishiilidioksidipäästöt ylittivät 100 000 t vuonna 2008.

On huomioitava, että osa liitteessä A listattujen teollisuuslaitosten hiilidioksidipäästöistä tulee myös tavallisista höyrykattiloista, kuten esimerkiksi massa- ja paperituotantolaitoksien kuorikattiloista. Tämä on tapauskohtaista ja riippuu siitä, onko teollisuuslaitoksen omasta sähkön- ja lämmöntuotannosta tulevat hiilidioksidipäästöt sisällytetty laitoksen päästötaseeseen vai raportoitu erikseen. Laskelmiemme mukaan huomattava osa bioperäisistä hiilidioksidipäästöistä on lähtöisin massa- ja paperituotantolaitoksien soodakattiloista.

Suurimpien hiilidioksidia päästävien laitosten sijainti esitetään Kuvassa 2.4. Kaksitoista suurinta fossiilisen ja mineraaliperäisen hiilidioksidin päästäjää sijaitsee rantaviivan lähellä, mikä helpottaisi talteenotetun hiilidioksidin kuljetusta säiliöaluksilla varastointipaikalle.



Kuva 2.4. Laitoskohtaiset hiilidioksidipäästöt Suomessa vuonna 2008. Tarkasteluun on otettu vain laitoksia, joiden hiilidioksidipäästöt ylittivät 100 000 t per vuosi (GIS-karttaesitykset Matti Partanen, GTK).

2.3 Teknologian kilpailukyky

2.3.1 CCS-tekniikan kypsyyden ja kehitys

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on järjestelmä, jossa on kolme vaihetta: talteenotto, kuljetus ja varastointi. Periaatteessa hiilidioksidin talteenottoteknologiat on jaettavissa kolmeen kategoriaan: talteenottoon savukaasuista pesurilla, talteenottoon happipolton avulla ja talteenottoon polttoaineena käytettävästä kaasusta. Mitään näistä teknologioista ei voida pitää selkeästi muita parempana vaihtoehtona, vaan kaikilla on omat erityispiirteensä, hyvät ja huonot puolensa, sekä tyypilliset sovelluskohteet. Nykyinen talteenottoteknologian kehitys ei rajoitu vain state-of-the-art-teknologioiden suorituskyvyn parantamiseen vaan myös kokonaan uusien teknologioiden kehittämiseen. Kehittyviä teknologioita, jotka vielä ovat laboratorio- tai pilottivaiheessa, ovat muun muassa karbonaatti-

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

järjestelmät, metalli-orgaaniset järjestelmät (engl. *metal organic framework*), entsyymeihin perustuva erotus, ioniset nesteet sekä hapenkantajiin perustuva poltto ja kaasutus (engl. *chemical looping combustion*, CLC). Lähempänä kaupallistumista olevia uusia teknologioita ovat kehittyneet liuottimet, kiinteät sorbentit ja membraanit. Hiilidioksidin talteenotossa suurimmat haasteet liittyvät skaalaukseen ja teknologian integrointiin. Hiilidioksidin varastoinnissa taas suurimmat haasteet liittyvät varastointipotentiaalien arviointiin ja varastoinnin pysyvyyteen.

Kaikista talteenottomenetelmistä aiheutuu lisäkustannuksia ja prosessin energiankulutuksen kasvua. Talteenottoprosessista ei ole hyötyä varsinaiselle tuotantoprosessille energiatuotannossa tai teollisuudessa muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Lisäksi uusien, kehitysvaiheessa olevien yksikköprosessien lisääminen tuotantolinjaan aiheuttaa ongelmia käytettävyydessä ja luotettavuudessa. Näitä kustannuksia ja ongelmia voidaan laskea kiihdytetyllä tutkimuksella ja demonstraatiolla, mihin mm. EU:n demorahat tähtäävät. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kehittäminen on keskittynyt enimmäkseen energiantuotannon sovelluksiin. CCS:n kehitystyö on hyvin kansainvälistä toimintaa. Teknologiaa kehitetään useissa maissa ja sitä voidaan demonstroida vielä näidenkin maiden ulkopuolella, joten teknologian kotimaata on toisinaan vaikea nimetä. Useimmat CCS-teknologiaa kehittävät yritykset ovat globaaleja toimijoita. Esimerkiksi Foster Wheeler Energian suomalaisen teknologiaan perustuvaa happipoltton demonstraatiota valmistellaan Espanjaan. CCS-teknologian kehityksessä tiiviisti mukana olevia alueita ovat USA ja Kanada, Australia ja mahdollisesti myös Kiina. Eurooppa on ilman muuta kehityksessä mukana, ja toteutuessaan Eurooppaan suunnitellut demot ovat hyvin kehityksen kärjessä. Ensimmäiset kaupallisen kokoluokan demot ovat odotettavissa Euroopassa vuonna 2015. Näiden demojen onnistuessa voidaan teknologian odottaa kaupallistuvan vuonna 2020.

Hiilidioksidin talteenottoteknologiaa on jo nykyään kaupallisesti saatavilla, mutta mitään teknologiaa ei ole demonstroitu suuressa mittakaavassa. Kehitystyötä talteenottoteknologioiden parantamiseen tarvitaan, sillä kustannukset ovat nykyteknologialla merkittävästi liian korkeita. Lisäksi kehitystyötä tarvitaan talteenottoteknologioiden soveltamiseksi esimerkiksi teollisuuden kaasuvirtoihin sekä biomassan ja turpeen raaka-ainekäyttöön liittyen. Erityisesti Suomen näkökulmasta myös muutkin sovelluskohteet kuin kivihiihtä ja maakaasua polttavat lauhdevoimalat ovat potentiaalisia. Euroopan laajuisesti on teknisesti mahdollista toteuttaa suunnitellut 20 integroitua, kaupallisen kokoluokan CCS-demonstraatiota vuoteen 2020 mennessä. Kaikki CCS-ketjun komponentit ovat olemassa kaupall-

lisessa kokoluokassa öljy- ja kaasuteollisuudessa sekä kemianteollisuudessa. CCS arvoketjun teknologiaosia ei kuitenkaan koskaan ole integroitu eikä sovellettu energiantuotannossa tai teollisuudessa CCS:n soveltamisen vaatimassa kokoluokassa.

Hiilidioksidin talteenottoa savukaasuista pidetään kypsänä teknologiana mo- niin sovellutuksiin ympäri maailman. Useita, aminipohjaisiin liuottimiin perus- tuvia pilottikokoluokan laitoksia, on käynnissä ympäri maailman CO₂:n talteen ottamiseksi savukaasuista. Perusteknologiaa yritetään parantaa kehittämällä vä- hemmän energiaa vaativia liuottimia sekä pienentämällä liuotinkatota ja korroosio- ongelmia. Savukaasupesureita pidetään potentiaalisena ratkaisuna erityisesti retrofit-ratkaisuihin, koska varsinaiseen ydinprosessiin tarvitsee tehdä vain vä- hän muutoksia. Integrointi ydinprosessiin on kuitenkin avainasemassa parannet- taessa koko prosessin kokonaishyötysuhdetta.

Hiilidioksidin talteenotto polttoaineena käytettävistä kaasuista soveltuu lähinnä IGCC (kaasutuskombi, engl. *integrated gasification combined cycle*) voimaloi- hin ja maakaasun reformointiin. Joitakin kaupallisen kokoluokan IGCC-laitoksia on jo olemassa, mutta ilman varsinaista hiilidioksidin talteenottoa. Hiilidioksidin talteenoton integrointi vaatii kaasuturbiinin, jossa voidaan käyttää polttoaineena vetyä. Suurimpia kehityskohteita IGCC-sovellutuksissa ovat laitoksen käytettä- vyyden parantaminen, vesikaasun siirtoreaktioon tarvittavan höyrymäärän pie- nentäminen sekä erityisesti vetyturbiinin ja sen hyötysuhteen parantaminen.

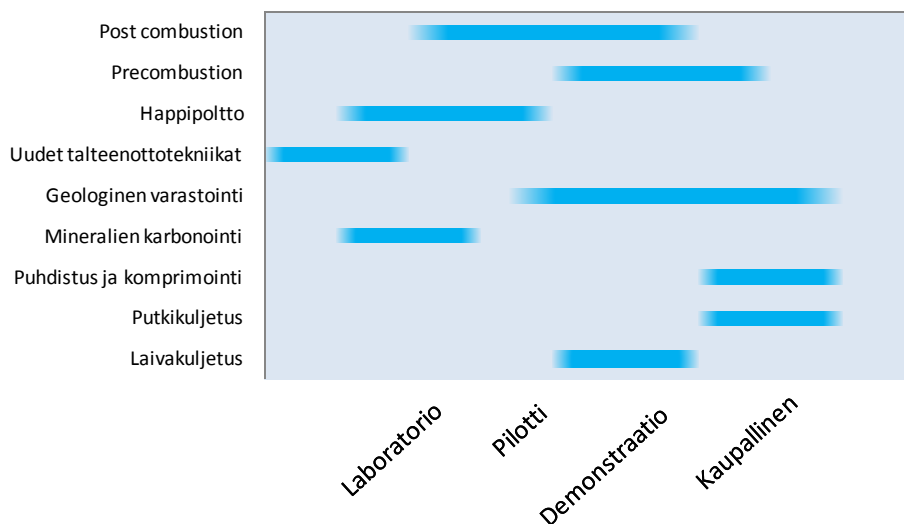
Happipolttolto tarkoittaa polttoaineen polttamista kierrätetyn savukaasun ja puhta- aan hapen sekoituksella ilman sijasta. Tuloksena syntyy savukaasuvirta, joka koostuu lähinnä hiilidioksidista ja vedestä. Teknologiaa voidaan soveltaa eri polttoaineille; niin kiinteille kuin kaasumaisille sekä pölypoltto- että leijukeros- kattiloissa. Happipolttoltoa on mahdollista soveltaa myös jo olemassa oleviin lai- toksiin, mutta muutokset koko laitokseen ovat kohtuullisen suuria. Merkittä- vimät kehityskohteet happipolttoteknologiaan liittyen ovat happitehtaan ener- giankulutuksen pienentäminen, kaasujen puhtausvaatimukset sekä kattilamateriaa- leihin ja tiiveyteen liittyvät kysymykset.

Hiilidioksidin putkikuljetus, komprimointi sekä puhdistus ja prosessointi ovat jo tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla tarvittavassa kokoluokassa. Jopa valta- kunnan rajan ylittävä hiilidioksidin putkikuljetus on ollut pitkään käynnissä Pohjois- Amerikassa USA:n ja Kanadan välillä. Myös varastointiin tarvittavat ratkaisut ovat olleet vuosia käytössä mm. Norjassa ja Pohjois-Amerikassa EOR:ään (tehos- tettu öljyntuotanto, engl. *enhanced oil recovery*) tai maakaasun puhdistamiseen liittyen. Kuitenkin varastointiin, ja erityisesti varastointikapasiteetteihin ja niiden

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

arviointeihin, liittyy edelleen merkittäviä epävarmuuksia. Epävarmuuksia liittyy myös pitkäaikaisen varastoinnin pysyvyyteen. CCS-tekniologioista löytyy tarkempaa kuvausta muualla (Teir et al. 2011).

Teknologian kehitysprosessi on huomattavasti monimutkaisempi kuin lineaarinen kehitys tutkimuksesta ja kehityksestä demonstraatioon, kaupallistumiseen ja laajaan läpilyöntiin. CCS-tekniologian kehitysvaiheita, ja keskinäistä edistystä on kuitenkin tässä pyritty hahmottamaan lineaarisella, neliportaisella kehitysjaanalla (Kuva 2.5).



Kuva 2.5. Eri CCS-ketjun teknologioiden kehitysvaiheet voimalaitossovelluksissa.

Teollisen kokoluokan demonstraatioprojektien toteutuminen on seuraava askel hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniologioiden kehityksessä. Demonstraatiot perustuvat ensimmäisiin saatavilla oleviin teknologioihin, mutta CCS:n kehitys, ja erityisesti sen nopeus, on kiinni näiden demonstraatioprojektien kyvystä tuottaa olennaista tietoa ja vakuuttaa investoijat, poliitikot, asiantuntijat ja muut sidosryhmät teknologian kyvystä vastata ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousuun. Myös globaali tiedon jakaminen on olennaisessa roolissa CCS-tekniologian kehityksessä ja sen kustannusten alentamisessa. CCS-tekniologia-kehitys onkin luonteeltaan hyvin kansainvälistä. Tekniologiaa kehitetään useissa maissa, sitä voidaan demonstroida vielä näidenkin maiden ulkopuolella ja soveltaa kaikkialla muualla. Suomi on mukana tekniologiakehityksen eturintamassa esimerkiksi leijupolttoon perustuvan happipolttotekniologian kehittämisessä.

Yrityksille ja teknologiakehittäjille sitoutuminen CCS:ään on valtava riski. Tällä hetkellä hyvin harva yritys uskaltaa investoida teknologiaan. Moni varteenotettava ja pitkälle edennyt CCS-hanke onkin lopetettu tai siirretty odottamaan varmempia signaaleja niin politiikasta kuin teknologiankehittäjiltä. Jotta CCS-teknologioiden käyttöönotto voidaan tehdä ilmastonmuutoksen vaatimassa aikataulussa, tarvitaan useita, kaupallisen kokoluokan demonstraatiohankkeita. Puhumattakaan siitä, että prosesseja ei ole vielä koskaan integroitu kaupallisiin perustein toimivaan kokonaisuuteen, jonka pääasiallinen tarkoitus on tuottaa sähköä markkinoille. Tähän tarpeeseen pyritään vastaamaan mm. EU:ssa komission NER300-rahoitusinstrumentilla sekä EEPR (European Energy Programme for Recovery) rahoituksella.

2.3.2 Eri hiilidioksidipäästövähennyskeinojen vertailu

Jos haluamme saavuttaa tavoitteen rajoittaa ilmaston lämpeneminen 2 °C:seen, mikään teknologia ei yksin näyttäisi riittävän päästövähennysten saavuttamiseen. Näyttäisi siltä, että näitä tavoitteita on lisäksi erittäin vaikea saavuttaa ilman CCS:ää.

Kivihiilen käytön korvaaminen maakaasulla pienentää hiilidioksidipäästöjä. Maakaasu ei kuitenkaan ole hiilineutraali polttoaine, joten ilman CCS:ää se ei ole ratkaisu ilmastonmuutokseen pitkällä aikavälillä ja tavoiteltaessa rajuja päästövähennyksiä. Lisäksi maakaasua ei ole saatavilla kaikkialla, edes nesteytettynä.

Bioenergialla on merkittävä rooli erityisesti Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Biomassan saatavuus, ja erityisesti sen kestävä saatavuus, ovat ongelma niin globaalisti kuin jossain määrin myös Suomessa. Suomessa ongelma on hankala, sillä biomassan merkittävä ohjautuminen energiantuotantoon saattaa nostaa suomalaisen, biomassaa raaka-aineena käyttävän teollisuuden kustannuksia. Lisäksi laajamittaisen käytön kasvun ennustetaan nostavan polttoaineena käytettävän biomassan hintaa myös globaalisti. Viimeaikoina on myös herännyt julkinen keskustelu siitä, mitkä ovat biomassan energiakäytön lyhyen aikavälin ilmastovaikutukset sekä vaikutukset mm. maaperän hiili- ja lannoitetasaisiin.

Tuulienergian määrän odotetaan kasvavan Suomessa moninkertaiseksi lähitulevaisuudessa uuden syöttötariffijärjestelmään perustuvan tuen myötä. Lähtötaso tuulivoimakapasiteetissa on kuitenkin hyvin pieni, ja myös tulevaisuudessa tuulivoiman osuuden odotetaan jäävän kohtuullisen pieneksi, sillä Suomea ei pidetä yhtä hyvänä tuulivoimakohteena kuin monia muita Euroopan maita. Tuulivoiman lisäyksen yhteydessä on myös huomattavan usein törmätty paikallisten ihmisten vastustukseen.

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

Ydinvoimatuotantoa ollaan Suomessa lisäämässä merkittävästi valtioneuvoston periaatepäätöksen myötä. Laitosten suorien CO₂-päästöjen osalta päästöttömänä energiantuotantomuotona ydinvoimalla on kuitenkin ongelmia liittyen polttoaineen saatavuuteen ja riittävyteen ilman hyötöreaktoreja. Lisäksi ongelmallisia ovat erityisesti jätteiden käsittelyyn ja varastointiin liittyvät turvallisuus- ja kestävyysnäkökulmat. Hyväksyttävyyden onkin merkittävä tekijä uutta ydinvoimakapasiteettia suunniteltaessa. Lisäksi polttoaineen valmistusketjusta tulee mm. kaivos-toimintaan liittyen hiilidioksidipäästöjä.

Aurinkoenergian laajamittainen käyttöönotto energiantuotannossa koetaan Suomessa hankalaksi pohjoisesta sijainnista johtuen. Vaikka monet pienen kokoluokan ratkaisut ovatkin toimivia myös näillä leveysasteilla, ei näköpiirissä ole teknologiaa, mikä pystyisi tuottamaan suuria määriä sähköä energijärjestelmän vaatimusten mukaisesti.

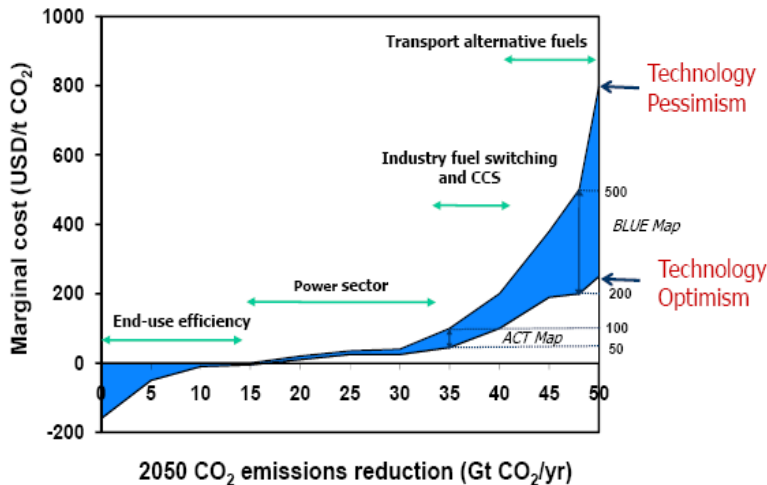
Maalämmön hyödyntäminen on potentiaalinen päästövähennyskeino suoran sähkölämmityksen tai öljylämmityksen korvaajana. Kaukolämpöalueilla maalämmön käytön ilmastovaikutukset riippuvat laskentatavasta ja alueen energijärjestelmästä. Maailmalla myös geoterminen energiantuotanto on kiinnostava ja nopeasti kasvava energian tuotantomuoto.

Kivihiilen käytössä voimantuotannossa on kivihiilen tuotantoon liittyviä sosiaalisia ja ympäristöongelmiin ongelmia. Ennen kaikkea kivihiilen käyttö energiantuotannossa lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Tämä voitaneen ratkaista CCS:llä, mutta siinä ongelmia ovat kustannusten nousu ja huonontunut hyötysuhde, ja siitä aiheutuva kasvava polttoaineen tarve. Lisäksi kivihiilivarat ovat jakautuneet maapallolle epätasaisesti, joskin kivihiiltä on helpompi kuljettaa laivalla kuin esimerkiksi maakaasua. Iso osa kehittyvien maiden kasvavasta energiantarpeesta ennustetaan täytettävän kivihiilen käytöllä.

Useissa julkisissa lähteissä suurimmat odotukset tulevaisuuden KHK-päästövähennyksistä on asetettu energiatehokkuuden paranemiselle. Erityisesti energian loppukulutuksen odotetaan tehostuvan, mutta myös tuotannon tehostumisella on roolinsa. Kuvassa 2.6 esitetään IEA:n arvio eri KHK-päästövähennyskeinojen kustannuksista ja globaaleista päästövähennyspotentiaaleista. Todellisuudessa päästövähennyskustannukset ovat erittäin voimakkaasti tapauksesta ja tarkastelutavasta riippuvaisia.

Kuten kuvasta nähdään, joidenkin päästövähennystoimien kustannusten on arvioitu olevan negatiivisia, eli päästöjen vähentämisen lisäksi toimilla säästetään myös kustannuksia. Näistä toimista lähes kaikki ovat energiatehokkuuden paran-

tamiseen liittyviä. Luonnollisesti tämäkin riippuu tehdyistä oletuksista, vaaditusta investoinnin takaisinmaksuajasta ja esimerkiksi energian hintojen kehitymisestä.



Kuva 2.6. IEA:n arvio eri päästövähennyskeinojen kustannuksista ja globaaleista päästövähennyspotentiaaleista (IEA ETP 2008).

2.4 Kuljetus- ja varastointimahdollisuudet

2.4.1 Mahdollisuudet hiilidioksidin varastointiin Suomessa

Suomen maankamaralla ja talousvyöhykkeellä Itämerellä ei esiinny hiilidioksidin pysyvään varastointiin soveltuvia öljy- ja kaasuesiintymiä tai syviä, suolaista pohjavettä sisältäviä, huokoisia sedimenttikivimuodostumia (Koistinen et al. 2001, Solismaa 2009). Toisaalta aiemmissä tutkimuksissa on todettu Itä-Suomessa olevan runsaasti serpentiniitti- ja serpentiinimuodostumia. Ne voisivat tulla kyseeseen, jos hiilidioksidin sitomiseen kehittyä sopivia CCS-mineraali-karbonaatioteknologioita ja jos sijoitusvaihtoehto tulee ympäristöllisesti ja taloudellisesti kannattavaksi (Teir et al. 2006). Perusteita ja mahdollisuuksia CO₂:n geologiseen väli-varastointiin CCS-laitoksen yhteydessä Suomen oloissa on alettu tutkia (Aatos et al. 2010, Lindberg 2010 sekä tämän julkaisun alakohta 2.4.2). Maailmalla ja Suomessa on toimivia esimerkkejä muiden nesteiden ja kaasujen varastoinnista kalliotiloihin joko paineistettuna tai jäähdytettynä, vaikkakaan hiilidioksidin varastoinnista kalliotiloissa ei ole vielä kokemusta. Kalliovarastoinnin etuja olisivat maanpäällisiä säiliöitä edullisemmat rakentamis-, huolto-, turvallisuus- ja

2. CCS:n toteuttamisen edellytykset

vakuutuskustannukset. Lisäksi maanalainen kalliiovarastointi vapauttaisi maanpintaa muuhun käyttöön (Lindberg 2010). Jos hiilidioksidin välivarastointia kalliotiloissa aletaan tulevaisuudessa toteuttaa Suomessa, maanalaisen sijoittamisen hiilidioksidista aiheutuvien geologisten ympäristövaikutusten arvioidaan rajoittuvan pääasiassa välivaraston toiminta-aikaan (Solismaa 2010).

Euroopan geologiset tutkimuslaitokset ovat selvittäneet hiilidioksidin geologista varastointikapasiteettia jo 1990-luvun alkupuolelta lähtien laajoissa kansainvälisissä tutkimusprojekteissa (Joule II, GESTCO, Castor ja EU GeoCapacity). Suomi ei ole osallistunut näihin projekteihin, mutta on mukana mm. alkavassa eurooppalaisten geologisten tutkimuslaitosten CGS Europe -verkostohankkeessa maana, jolla ei ole loppusijoitusmahdollisuutta omalla maankamarallaan. Kattavimman ja ajantasaisimman arvion Euroopan loppusijoituskapasiteetista on laatinut EU:n rahoittama GeoCapacity-projekti, jonka projektimaiden yhteenlaskettu varovainen arvio kapasiteetista vuonna 2009 oli 96 Gt suolaisissa akvifereissa, 20 Gt ehtyneissä hiilivetykentissä ja 1 Gt hiilikerrostumissa. Yhteensä 117 Gt:n kapasiteetti riittäisi kattamaan 25 arvioidun maan suurten pistemäisten päästölähteiden hiilidioksidipäästöjen sijoittamiseen n. 60 vuodeksi. Euroopan suurin kapasiteetti (25 %) on Norjan tyhjentyvillä öljy- ja kaasukentillä (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Venäjän CCS-loppusijoituskapasiteettiarviot ovat myös kehittymässä yhteiseurooppalaiseen suuntaan. Luoteis-Venäjän öljy- ja kaasukenttien hyödyntämiskelpoiseksi kapasiteetiksi on arvioitu noin 19–23 Gt (Cherepovitsyn & Ilinsky 2006). Ruotsin akviferien sijoituskapasiteetiksi on arvioitu noin 1,6 Gt ilman tarkempaa potentiaalisuuden tarkastelua (Ekström et al. 2004).

Vaikka Euroopan hiilidioksidin varastointikapasiteetti on tämänhetkisen geologisen tietämyksen perusteella kohtalainen, kapasiteettiarviot perustuvat kuitenkin useimmiten alueellisiin laskelmiin, jolloin yksittäisten varastointipaikkojen todelliset kapasiteetit jäävät epävarmoiksi ilman kohteellisia geologistaloudellisia tutkimuksia. Lisäksi akviferien kapasiteettiarvioiden epävarmuutta lisää se, että akviferien geologia, ja siten niiden taloudellis-geologinen soveltuvuus eri käyttötarpeisiin, on nykyisin vielä melko tuntematonta. Luotettavimpia arvioita hiilidioksidin loppusijoituskapasiteetista ovat tehneet maat, joilla on tai on ollut omaa öljyn- tai kaasuntuotantoa. Suomea lähimmät lupaavimmat hiilidioksidin loppusijoitusalueet sijaitsevat Pohjois-Saksan, Tanskan, Norjan, Puolan ja Venäjän meso- ja kenotsooisissa sedimenttikivimuodostumissa (Vangkilde-Pedersen et al. 2009, Sigmond 2002, Koistinen et al. 2001).

Valtioiden oma loppusijoitustarve saattaa ylittää varastointikapasiteetin, joten hiilidioksidipäästöjä tuottavat, kotimaassa sijaitsevat yritykset joutuvat kilpailemaan

loppusijoittamisluvista ja -varastointitilasta vapaaksi jäävillä varastointialueilla. Myös geopoliittiset seikat, tai muut kaasujen tai nesteiden varastointitarpeet samoihin geologisiin muodostumiin, saattavat estää loppusijoittamisen joihinkin maihin tai soveltuville loppusijoitusalueille (esim. EGEN 2009, Streimikiene & Mikalauskiene 2010), mikä pienentää vapaan varastointitilan määrää vastaavasti.

2.4.2 Logistiikkaratkaisut Suomelle

Suomen oma kallio- tai maaperä ei mahdollista talteenotetun hiilidioksidin koti- maista loppusijoittamista (Solismaa 2009), joten valtiorajat ylittävä putki- tai laivakuljetus on vaatimus sovellettaessa CCS:sää Suomessa. Suomea lähimmät hiilidioksidin loppusijoitukseen mahdollisesti soveltuvat alueet sijaitsevat Puolan ja Saksan pohjoisosissa, eteläisessä Tanskassa sekä Itämeren eteläosan meri- alueilla, Barentsinmerellä ja Pohjanmerellä (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Tällä hetkellä Suomen läheisyydessä hiilidioksidia loppusijoitetaan kaupallisesti kuitenkin vain norjalaisen öljy- ja kaasuyhtiö StatoilHydro Snöhvitin ja Sleipnerin kaasukentillä Pohjan- ja Barentsinmerellä.

Kuljetusetäisyyksien ollessa pitkiä, ja suurimpien päästölähteiden sijaitessa enimmäkseen rannikolla, olisi laivakuljetus tärkeä vaihtoehto Suomessa talteen- otetun hiilidioksidin siirtämisessä loppusijoitusalueille. Säiliöaluksilla toteutettu kuljetusinfrastruktuuri on myös putkilinjan rakentamista kevyempi niin lupame- nettelyjen kuin investointikustannusten osalta. Merikuljetuksen tapauksessa ei myöskään jouduta hankkimaan putkilinjojen vaatimia maankäyttöoikeuksia.

Putkilinjan raskaista investoinneista ja aikaavievästä toteutuksesta huolimatta, saatetaan kuljetusetäisyydestä riippuen saavuttaa alhaiset kuljetuskustannukset CO₂-tonnia kohden usean päästölähteen syöttäessä talteenotetun CO₂:n samaan runkolinjaan. Merkittävimpien pistelähteiden sijainti Suomen rannikkoa myöten antaisi omalta osaltaan edellytykset kapasiteetiltään hyvin suuren runkolinjan kustannustehokkaaseen hyödyntämiseen. Suuren runkolinjan rakentaminen edel- lyttäisi CCS:n täydellistä kaupallistuneisuutta, sekä kapasiteetiltaan riittävää ja todistettua loppusijoituspaikkaa Suomea lähimmillä soveltuvilla geologisilla muodostumilla, kuten Barentsinmeren alaisissa suolavesikerrostumissa.

3. CCS:n soveltaminen sektoreittain

Päästökaupparekisterin melkein 600 laitoksesta päästöjen perusteella 14 suurinta laitosta vastaa yli puolta rekisterissä olevien laitosten yhteenlasketuista päästöistä. Tämä viittaa siihen, että huomattavia päästövähennyksiä olisi mahdollista saada aikaan soveltamalla CCS:ää muutamiin suuriin laitoksiin. Potentiaalisimpia päästölähteitä hiilidioksidin talteenoton soveltamiseksi teknologian kaupallistumisen alkuvaiheessa, niin energiantuotannossa kuin hiilidioksidi-intensiivisessä teollisuudessa, karakterisoi kaksi piirrettä: sijainti rannikon läheisyydessä sekä kohtuullisen suuret hiilidioksidipäästö määrät. Sijainti rannikon läheisyydessä mahdollistaa hiilidioksidin kuljetuksen varastointipaikkaan laivalla, mikä nähdään potentiaalisimpana kuljetusmenetelmänä kaupallistumisen alkuvaiheessa, infrastruktuurin nopean rakentamisen ja putkikuljetusta edullisempien kokonaiskustannusten takia. Suuret hiilidioksidipäästö määrät pienentävät yksikkökustannuksia ainakin suunnittelun, laitteistojen, infrastruktuurin ja kuljetuksen osalta. Suuret yritykset nähdään potentiaalisempina ensivaiheen sovelluksen toteuttajina kuin pienemmät yritykset. Suuremmista henkilöstö- ja pääomaresursseista johtuen yrityksillä on usein paremmat mahdollisuudet mittaviin päästöjenhallintakokonaisuuksiin ja strategisiin linjauksiin. Suurilla pienempien päästölähteiden keskittymillä saattaa myös olla synergiaetuja esimerkiksi kuljetus- ja varastointiratkaisuissa. Teollisuudessa hiilidioksidin talteenotto lisää merkittävästi tuotannosta syntyviä kustannuksia, ja globaaleilla markkinoilla toimivat tuotantolaitokset kokevat hiilivuodon todellisenä uhkana toiminnalleen. Hiilivuodolla tarkoitetaan tässä yhteydessä hiili-intensiivisen tuotannon siirtämistä/siirtymistä maihin, joissa hiilidioksidipäästöistä ei aiheudu tuotannolle kustannuksia. Tässä luvussa käsitellään lyhyesti hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin soveltamisen mahdollisuuksia eri teollisuuden sektoreilla. Kuva 3.1 antaa yhteenvedon CCS-teknologian kehitysvaiheista eri teollisuuden haaroissa.



Kuva 3.1. Eri CCS-tekniikan suuntaa antavat kehitysvaiheet eri teollisuuden aloilla.

3.1 Energiantuotanto

Energiantuotanto Suomessa on hyvin monipuolista, eikä siten altistu hiilidioksidin markkinahinnoille yhtä voimakkaasti kuin eräissä muissa maissa, jotka käyttävät energiantuotannossaan pääasiassa kivihiihtä. Olemassa olevan laitostekniikan ikä vaikuttaa voimakkaasti hiilidioksidin talteenottotekniikan soveltamismahdollisuuksiin. Jos laitosta ajetaan enää todennäköisesti muutamia vuosia perusvoiman tuotannossa, siihen ei todennäköisesti kannata investoida hiilidioksidin talteenottoyksikköä huipunkäyttöajan ja alhaisen hyötysuhteen takia. Vanhemmissa laitoksissa sähköntuotannon hyötysuhde on jo lähtökohtaisesti niin alhainen, että hiilidioksidin talteenotto muuttaisi laitoksen ajamisen hyvin epätaloudelliseksi. Tällaisessa tapauksessa hiilidioksidin talteenoton soveltaminen nähdään mahdolliseksi lähinnä laitoksen uusimisen tai peruskorjaukseen liittyvän tehonnoston yhteydessä.

Suomeen tullaan rakentamaan melko paljon uutta energiantuotantokapasiteettia lähivuosikymmeninä, kun samalla vanhaa kapasiteettia, kuten hiililauhdetta, poistuu käytöstä. Tämä avaa myös mahdollisuuden soveltaa uusinta tekniikkaa – mukaan lukien CCS:ää – uusiin energialaitoksiin. Kuitenkin melko vähän uusia fossiilisiin polttoaineisiin perustuvia laitoksia on nähtävissä lähitulevaisuudessa, joten potentiaalisimpina alkuvaiheen sovelluskohteina pidetään olemassa olevia suuren kokoluokan laitoksia, joilla on vielä pitkä käyttöikä jäljellä eikä mahdollisuuksia merkittävästi muuttaa polttoainevalikoimaansa. Hiilivoimalat ovat potentiaalisimpia suuren kokoluokkansa takia, ja koska niillä on vain rajatut mahdollisuudet käyttää hiilidioksidineutraaleja polttoaineita ilman lisäinvestointeja. Myös turvevoimaloilla saattaa olla tarve hiilidioksidin talteenoton soveltamiseen

3. CCS:n soveltaminen sektoreittain

vähentääkseen päästökaupasta syntyviä kustannuksia ja oikeuttaakseen fossiilisen polttoaineen käytön ilmastonäkökulmasta.

Jos mahdollisuus lämmön tehokkaaseen hyötykäyttöön on olemassa esimerkiksi kaukolämpöverkossa, se nähdään kokonaisenergiataloutta parantavana seikkana hiilidioksidin talteenottoa sovellettaessa. Kaukolämpöverkkoon on mahdollista saada talteen iso osa hiilidioksidin talteenottoprosesseissa käytetystä energiasta matalampitasoisena lämpönä. Jätelämpöjen parempi hyötykäyttö johtaa parempaan energiatalouteen ja kokonaishyötysuhteeseen lauhdelaitoksiin verrattuna. Tämä tekee suuren kokoluokan voimalaitokset urbaanien keskittymien läheisyydessä potentiaalisiksi sovelluskohteiksi, sillä usein näissä on valmiiksi lämpökuormaa tarjolla. Kuitenkin vain muutama suuri kohde rannikon läheisyydessä on identifioitavissa.

CCS:n soveltaminen voimalaitokseen saattaa muuttaa voimalaitoksen ajotapaa merkittävästi. CCS lisää laitoksen pääomakustannuksia, omakäytösähkön kulu- tusta ja muita kustannuksia. Se myös huonontaa tuotannon hyötysuhdetta mutta vähentää päästöoikeuksista aiheutuvia kustannuksia oletettavasti enemmän (mi- käli päästöoikeuden hintataso on niin korkea, että CCS-laitokseen on kannatta- nut investoida). Näin laitos siirtyy ajojärjestyksessä aikaisemmaksi verrattuna laitokseen ilman CCS:ää. Jos päästöoikeuden hintataso laskee, muuttuu CCS:llä varustetun laitoksen paikka ajojärjestyksessä. Mahdollisuudet ajaa laitosta ilman CCS:ää voivat tuoda merkittäviä etuja säädettävyyden ja talouden kannalta ja vaikuttaa myös ajojärjestykseen.

Energia- ja ilmastostrategian selonteossa todetaan, ettei CCS olisi taloudellista kaikelle lauhdevoimakapasiteetille, koska Suomessa lauhdevoimalaitokset täy- dentävät sähkönhankintaa pohjoismaisen vesivoiman ja tuonnin vaihteluiden mukaan (VN 2008). Toisaalla selonteossa todetaan kuitenkin, että voidakseen siirtyä lähes päästöttömään energiatalouteen vuonna 2050, Suomeen ei voitaisi tulevina vuosikymmeninä enää rakentaa yhtään uutta fossiilisia polttoaineita pääpolttoaineena käyttävää voimalaitosta tai lämpökeskusta ilman hiilidioksidin talteenottoa.

3.2 Terästeollisuus

Suomen suurimpana pistelähteenä terästeollisuus nähdään potentiaalisena hiili- dioksidin talteenotto- ja sovelluskohteena. Metallinjalostusteollisuuden soveltuvi- ssa hiilidioksidin talteenottomenetelmissä on kuitenkin vähemmän erilaisia vaihto- ehtoja kuin esimerkiksi energiantuotannossa. Hiilidioksidi voidaan ottaa talteen

laitoksen savukaasuista pesurilla. Toinen vaihtoehto hiilidioksidin talteenottoon masuuniin perustuvassa raudan tuotantoprosesseissa on happimasuuni, joka on kehitystyön kohteena tällä hetkellä. Happimasuunia sovellettaessa tehtaan oma energiantuotanto kuitenkin pienenee, eikä tämä vaihtoehto ole sovellettavissa kaikkiin teräsentuotantoyksiköihin. Näin ollen ostosähkön osuus kasvaa, ja kokonaisuudessa vältettyjen päästöjen määrä riippuu korvaavan sähköntuotannon päästöistä. Yleisesti ottaen terästehtaan savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on korkeampi kuin voimalaitosten savukaasun hiilidioksidipitoisuus, mikä alentaa ainakin jonkin verran pesurilaitteiston investointikustannuksia. Laitosalueella hiilidioksidipäästöt tulevat kuitenkin useasta piipusta, mikä hankaloittaa niiden käsittelyä. Riippuen terästehtaalla olevista yksikköprosesseista suurimmat hiilidioksidipäästöt tehdasalueella tulevat masuunilta ja voimalaitoksesta. Pohjanlahden rannikolla Suomessa ja Ruotsissa on terästehtaita kohtuullisen lähellä toisiaan, ja niiden yhteenlasketut hiilidioksidipäästöt ylittävät 6 Mt/a. Näiden laitosten yhteistyö nähdään potentiaalisena niin teknologiaratkaisujen kuin myös erityisesti kuljetusyhteistyön suhteen. Varsinaisen teräksen tuotantoprosessia ei haluta hankaloittaa tai häiritä hiilidioksidin talteenotolla. Tästä syystä laitokseen tulevat suuret ja pitkäikäiset investoinnit vaikuttavat merkittävästi aikatauluun, jolla hiilidioksidin talteenotto voitaisiin ottaa käyttöön terästehtaalla.

3.3 Öljynjalostusteollisuus

Kuten terästeollisuudessa, myös Suomen öljynjalostusteollisuudessa on suuria hiilidioksidin pistelähteitä. Nämä hiilidioksidilähteet ovat terästeollisuuteen verrattuna kokoluokaltaan pienempiä (0,4–2,7 Mt/a), mutta niillä on jo valmiiksi kokemusta hiilidioksidin talteenottoprosessien kaltaisista prosesseista. Yksi Euroopan suurimmista hiilidioksidin tuotantolaitoksista sijaitsee Kilpilahdessa, Porvoossa. Laitoksella on valmius tuottaa 400 000 tonnia hiilidioksidia vuosittain ottamalla hiilidioksidia talteen Porvoon jalostamon vedyntuotantoprosessista. Jotkin öljynjalostusteollisuuden kaasuvirrat saattavat myös koostumuksensa takia soveltua helpommin hiilidioksidin talteenottoon kuin energiantuotannon savukaasuvirrat.

3.4 Sementti- ja kalkkiteollisuus

Sementtitehtaat ovat kohtuullisen suuria hiilidioksidin pistelähteitä, kokoluokkaa 0,5 Mt/a, lisäksi niiden savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on suurempi kuin

3. CCS:n soveltaminen sektoreittain

teollisuuden sovellutuksissa keskimäärin. Toinen Suomen sementtitehtaista sijaitsee rannikolla, ja sen läheisyydessä on valmiiksi satamia. Sementtiteollisuuden ei ole mahdollista soveltaa kaikkia talteenottoteknologioita, eikä talteenottoa sementtiteollisuudesta ole tutkittu paljoa. Potentiaalisimpina vaihtoehtoina talteenottomenetelmiksi olisivat ainakin hiilidioksidin talteenotto savukaasuista tai jonkinlainen sovellutus happipoltosta.

Myös kalkkitehtaista tulee polttoaineperäisten hiilidioksidipäästöjen lisäksi raaka-aineen (kalsiumkarbonaatin) hajoamisesta peräisin olevia hiilidioksidipäästöjä. Suomessa on kolme suuruusluokaltaan 0,2 Mt/a hiilidioksidia päästävää kalkkitehdasta ja muutama pienempi. Osa kalkkitehtaista sijaitsee muiden suurien pistelähteiden (esim. teräs- ja sementtiteollisuus) yhteydessä.

3.5 Bioperäisen hiilidioksidin talteenotto

Suuri osa Suomen hiilidioksidipäästöistä on peräisin biomassan poltosta. Suuria pistemäisiä päästölähteitä on sekä teollisuudessa että energiantuotannossa. Lisäksi Suomessa on useita muutamien pistelähteiden muodostamia keskittymiä, joiden yhteenlasketut päästöt ovat useita miljoonia tonneja vuodessa.

Fotosynteesissä ilmakehän hiiltä sitoutuu biomassaan. Ottamalla talteen ja varastoimalla biomassan poltosta syntyvä hiilidioksidi poistettaisiin se pysyvästi hiilen kierrosta, eli siitä muodostuisi hiilidioksidinielu. Toisin sanoen alennettaisiin ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Bioperäisen hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (bio-CCS) tuotiin esille myös kansainvälisen ilmastopaneelin neljännessä arviointiraportissa (IPCC 2007). Tämänhetkiset politiikkatoimet kohtelevat kuitenkin fossiilista alkuperää olevia hiilidioksidipäästöjä eri tavalla kuin bioperäisiä. Euroopan komission kasvihuonekaasupäästöjen tarkkailu- ja raportointiohjeiden (EC 2007) mukaan *sellaisissa tapauksissa, joissa osa siirretystä hiilidioksidista on peräisin biomassasta tai jos laitos kuuluu ainoastaan osittain direktiivin 2003/87/EY soveltamisalaan, toiminnanharjoittaja voi vähentää ainoastaan sen osan siirretyn hiilidioksidin massasta, joka on peräisin direktiivin soveltamisalaan kuuluviin toimintoihin käytetyistä fossiilisista polttoaineista ja materiaaleista*. Täten toimijalle ei ole taloudellista tai muuta kannustinta ottaa talteen bioperäistä hiilidioksidia kuin enintään kyseisen kohteen fossiilisia päästöjä vastaava määrä. Paraikaa käydään kuitenkin keskustelua, pitäisikö talteenotettua ja varastoitua bioperäistä hiilidioksidia kohdella kuten talteenotettuja fossiilisiakin päästöjä.

Lähtökohtaisesti samat teknologiat soveltuvat sekä bioperäisen että fossiilisen hiilidioksidin talteenottoon. Jotkin prosessit vaativat kuitenkin omat erityispiirteensä johtuen joko tyypillisistä prosessiparametreista tai epäpuhtauksien määrästä. Varsinaisia teknisiä rajoituksia bioperäisen hiilidioksidin talteenotolle ei ole.

Joissain prosesseissa, kuten suunnitteilla olevissa kaasutukseen ja Fischer-Tropsch-synteesiin perustuviissa biodiesel-tuotantolaitoksissa (tai BtL-laitos) tai termisen bio-SNG:n tuotannossa, on prosessista saatavilla hyvin puhtaita, kohtuullisen kokoisia (0,3–0,8 MtCO₂/a) hiilidioksidivirtoja erittäin pienellä vaivalla. Koska hiilidioksidia täytyy joka tapauksessa poistaa prosessista, voisivat nämä sovellutukset toteutuessaan olla varhaisia sovelluskohteita hiilidioksidin talteenotolle Suomessa. Hiilidioksidin talteenotto ei kuitenkaan ole pääsyy näiden laitosten rakentamiseen vaan biopolttoainedirektiivin asettamat käyttövelvoitteet ja investointituet kannustavat näiden laitosten investointiin. Tässä mielessä nämä eivät ole varsinaisia kaupallisia CCS sovellutuksia, vaikka tukea itse talteenottoon ei saataisikaan. Samankaltaisia, hyvin edullisesti talteenotettavia hiilidioksidivirtoja saattaa löytyä myös muista sovellutuksista, kuten biokaasun puhdistuksesta ja vedyn tuotannosta.

Paperi- ja sellutehtaat Suomessa ja myös Ruotsissa ovat merkittäviä biogeenisen hiilidioksidin pistelähteitä. Jo tällä hetkellä metsäteollisuudessa otetaan hiilidioksidia talteen PCC:n valmistuksessa, mutta nämä menetelmät eivät kuitenkaan sovellu laajamittaiseen hiilidioksidin talteenottoon. Hiilidioksidin talteenotto metsäteollisuusintegraatin savukaasuista näyttäisi olevan haastavampaa kuin energiasovellutuksissa keskimäärin. Voimakkaat kemikaalit, epäpuhtaudet savukaasuissa, CCS:n tilantarve sekä kohtalaisen pienten päästöasteiden hajanainen sijainti ympäri tehdasaluetta, vaikeuttavat toteutusta ja nostavat siten talteenoton kustannuksia. Hiilidioksidin talteenottoa metsäteollisuudesta on toistaiseksi tutkittu hyvin vähän.

Helpoin ja yksinkertaisin bioperäisen hiilidioksidin talteenottotapa teknologian kaupallistumisen alkuvaiheessa lienee hiilidioksidin talteenotto rinnakkaispolton yhteydessä. Laitokset, joissa biomassan lisäksi käytetään myös muita polttoaineita, esimerkiksi turvetta, ovat lähtökohtaisesti kokoluokaltaan suurempia, ja siten edullisempia sovelluskohteita hiilidioksidin talteen ottamiselle. Yleisesti puhtaasti biomassasovellutukset ovat kokoluokaltaan pienempiä ja sijaitsevat sisämaassa, mikä koetaan hankalaksi hiilidioksidin talteenoton kannalta.

Lähtökohtaisesti biomassaa polttoaineena käytettäviä voimaloita ei pidetä todennäköisimpänä kaupallistumisen alkuvaiheen ratkaisuna, vaikka bioperäiset päästöt laskettaisiinkin nieluksi päästökaupassa. Biomassalaitokset välttävät

3. CCS:n soveltaminen sektoreittain

hiilidioksidimarkkinoiden aiheuttaman kustannusriskin jo polttoainevalinnallaan. Näiden laitosten taloudelliset riskit kasvavat, jos ne investoivat teknologiaan, jonka takaisinmaksu on kiinni päästöoikeuden hinnasta. Jos kuitenkin toimija altistuu päästökaupan aiheuttamalle markkinariskille, esimerkiksi käyttämällä myös turvetta polttoaineena, CCS-investointi saattaa pienentää riskiä ja olla potentiaalisempi vaihtoehto laitokselle.

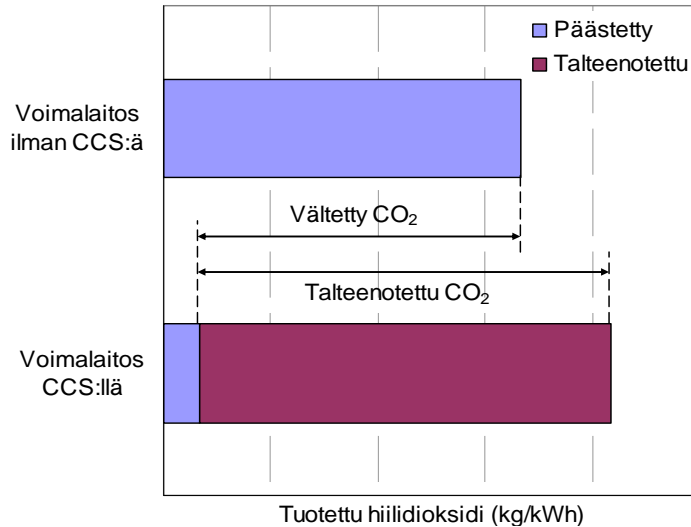
4. CCS:n kustannukset

4.1 Talteenoton kustannukset

CCS-tekniikan suurimmat kustannukset liittyvät yleensä talteenottovaiheeseen. Kaikki hiilidioksidin talteenottokonseptit vaativat paljon lisälaitteistoja, ja talteenotto sekä paineistus vaativat runsaasti energiaa. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin vaatimia kustannuksia lasketaan yleensä taseelle, jossa 80–90 % laitoksen päästöistä vältetään. Teknisesti olisi mahdollista päästä korkeampiin päästövähennyksiin, mutta tämä vaatisi suhteellisesti huomattavasti enemmän energiaa. Voimalaitos, missä CCS:ä sovelletaan, vaatii enemmän polttoainetta tuottamaansa sähkötehoa kohden kuin vastaava voimalaitos ilman CCS:ä, jolloin myös syntyy enemmän hiilidioksidia polttoprosessissa. Siksi yleensä talteenottoon liittyviä kustannuksia verrataan siihen, paljonko hiilidioksidipäästöjä vältetään, eikä suoraan talteenotetun hiilidioksidin määrään (Kuva 4.1).

Kirjallisuudessa on esitetty lukuisia arvioita vältettyjen päästöjen kustannuksista, mutta CCS:n takia menetetyn sähköntuotannon korvaamisen päästövaikutuksia on arvioitu hyvin erilaisilla tavoilla. Vältetyn päästön kustannuksiin tulee suuri ero jo siitä, arvioidaanko menetetty sähköntuotanto tuotettavan samalla CCS:llä varustetulla laitoksella, jollain muulla tietyllä sähköntuotantolaitoksella/-tuotantomuodolla vai esimerkiksi jonkin alueen keskimääräisellä sähköntuotannolla. Menetetyn tuotannon korvaaminen samalla laitoksella on mahdotonta, mikäli laitos ajaa jo vertailutilanteessa täyttä kuormaa tai on mitoitettu alueen lämpökuorman tai taloudellisesti saatavilla olevan polttoainemäärän mukaisesti. Viimeksi mainittuja voidaan pitää lähes suomalaisina erityispiirteinä, minkä takia vertailukelpoisten laskelmien löytäminen voi olla haasteellista. Varsinkin uuden laitoksen CCS-tarkastelun yhteydessä voi kuitenkin olla hyvin perusteltua vertailla tilannetta, jossa hyötysuhteen menetys korvataan lisääntyneellä polttoainekäytöllä samassa laitoksessa.

4. CCS:n kustannukset



Kuva 4.1. Talteenotetun hiilidioksidin ja vältetyn hiilidioksidipäästöjen ero (IPCC 2005). Eron suuruusluokka riippuu eniten CCS:n aiheuttaman hyötysuhteen pudotuksen suuruudesta sekä menetetyt tuotannon korvaavan tuotantomuodon päästöistä.

Julkaisussa Teir et al. (2011) on esitetty katsaus eräisiin kirjallisuudessa esitettyihin CCS:n kustannustietoihin. Useiden arvioiden mukaan voimalaitosten kokonaisinvestointikustannukset nousisivat CCS:n myötä tyypillisesti noin 50–100 %, mutta joidenkin arvioiden mukaan jopa reilusti yli 100 % riippuen voimalaitostyyppistä ja talteenottoteknologiasta. McKinseyn (2008) raportin mukaan CCS:n kustannukset jälkiasennuksena voivat olla jopa 30 % korkeammat n. 10 vuoden ikäisissä voimalaitoksissa kuin uusissa, ja tämä arvio näyttäisi sopivan myös kuvaajaan kerättyyn aineistoon. Ero johtuu lähinnä jälkiasennuksen korkeammista investointikustannuksista, lyhyemmästä laitoksen käyttöiästä, suuremmasta energiantuotannon hyötysuhteen pudotuksesta ja CCS:n asentamisen vaatiman ajan tuotantokatveesta.

Kaiken kaikkiaan tiedoissa on laaja vaihteluväli. Suuria eroja kustannusarvioiden välillä on perusteltu vaihteluvälin yläpäässä mm. ensimmäisten uuden teknologian sovellusten vaatimalla ylimääräisellä suunnittelutyöllä ja mahdollisesti sen yliarvioinnilla (ns. *overengineering*) ja toisaalta kustannusten alapäässä liian karkeilla tarkasteluilla. Joka tapauksessa monessa lähteessä on esitetty epävarmuuksina kustannustasolle vähintään ± 30 %.

Jotta 80–90 % hiilidioksidipäästöistä saataisiin talteen otettua nykypäivän parhaan CCS-teknologian avulla ja laitoksen sähköntuotanto pidettyä muuttu-

mattomana, tarvittaisiin 10–40 % enemmän polttoainetta verrattuna perinteiseen voimalaitokseen riippuen voimalaitostyyppistä (IPCC 2005). Vastaavasti, jos laitoksen käyttötuntimäärä ja polttoaineteho, eli vuosittainen polttoainekäyttö, pysyvät muuttumattomina, sähköntuotanto vähenee hyötysuhdetappion verran. Kirjallisuuskatsauksen mukaan sähköntuotannon ominaiskustannukset CCS-voimalaitoksella olisivat tyypillisesti 50–100 % korkeampia kuin vastaavalla voimalaitoksella ilman CCS:ää (Teir et al. 2011).

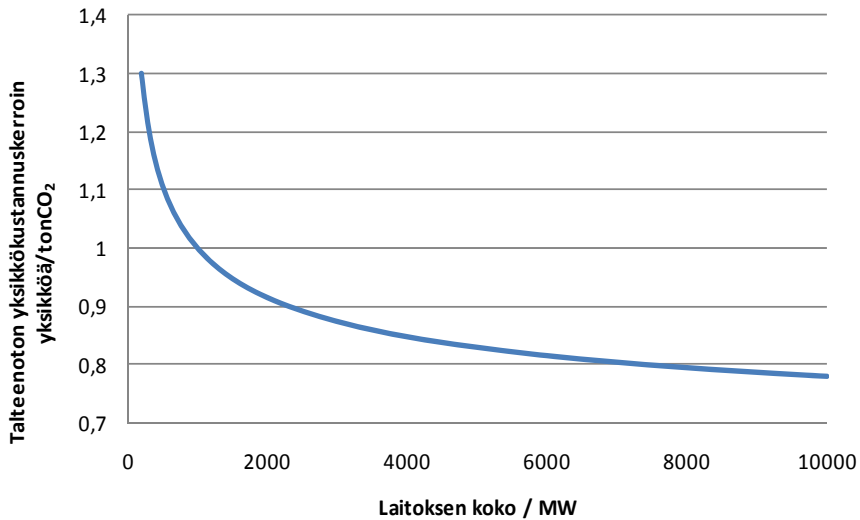
Vältettyjen päästöjen kustannukset ilman kuljetusta ja varastointia ovat kirjallisuudessa keskimäärin tasolla 40–50 €/t CO₂. Todelliset investointi- ja käyttökustannukset tulevat eroamaan projektista toiseen riippuen suuruusluokasta, sijainnista ja teknologiasta. Hiilidioksidin talteenottoa ei ole vielä sovellettu täyden mittakaavan voimalaitoksessa, ja siksi kustannusarviointeihin liittyy suurta epävarmuutta. Tulevaisuusskenaariot kustannusten kehityksestä riippuvat sen lisäksi suuresti teknologiakehityksen tuomasta kustannusvähennyksestä ja polttoaineiden hintakehityksestä. Kuvassa 4.2 on esimerkki hiilidioksidin talteenoton yksikkökustannusten muutoksesta sovelluskohteen koon funktiona.

Yleisesti voidaan todeta, että hiilidioksidin talteenotto on liian kallista matalan hyötysuhteen voimalaitoksissa. Lisääntyneen polttoaineenkulutuksen takia myös polttoaineperäisten epäpuhtauksien kokonaismäärä savukaasuissa nousee, mikä asettaa korkeampia vaatimuksia savukaasupuhdistuslaitteisiin. Toisaalta hiilidioksidille asetut laatuvaatimukset ja tiettyjen talteenotto-prosessien vaatima savukaasujen esipuhdistaminen asettaisi myös erilaiset vaatimukset savukaasujen puhdistuslaitteille kuin tavanomaisessa voimalaitoksessa.

CCS:n tuoman hyötysuhdemenetyksen minimoimista varten vaaditaan optimointia ja talteenotto-prosessin integrointia voimalaitoksen höyrypiiriin. Tulevaisuuden innovaatiot, kuten kehitetyt metalliseokset, vetykaasuturbiinit ja kehittyneemmät hiilidioksidin talteenottomenetelmät, voisivat nostaa CCS-voimalaitoksien hyötysuhteet vastaamaan nykypäivän voimalaitoksia ilman CCS:ää.

Kirjallisuudessa ilmoitetut voimalaitosten CCS-kustannukset ovat yleensä lauhdelaitoksille. Näissä CCS:n tarvitsemasta energiasta mahdollisesti saatavaa hukkalämpöä ei voida hyödyntää yhtä tehokkaasti kuin kaukolämpöverkkoon kytketyissä laitoksissa. Suomessa kaukolämpökytkennät olisivat kuitenkin todennäköisiä, jolloin hiilidioksidin erotuksen kustannukset mahdollisesti pienensivät.

4. CCS:n kustannukset



Kuva 4.2. Esimerkki hiilidioksidin talteenoton yksikkökustannusten muutoksesta sovelluskohteen koon funktiona. Karkeassa arvioissa käytetty esimerkkinä talteenottoa savukaasuista.

4.2 Kuljetuskustannukset

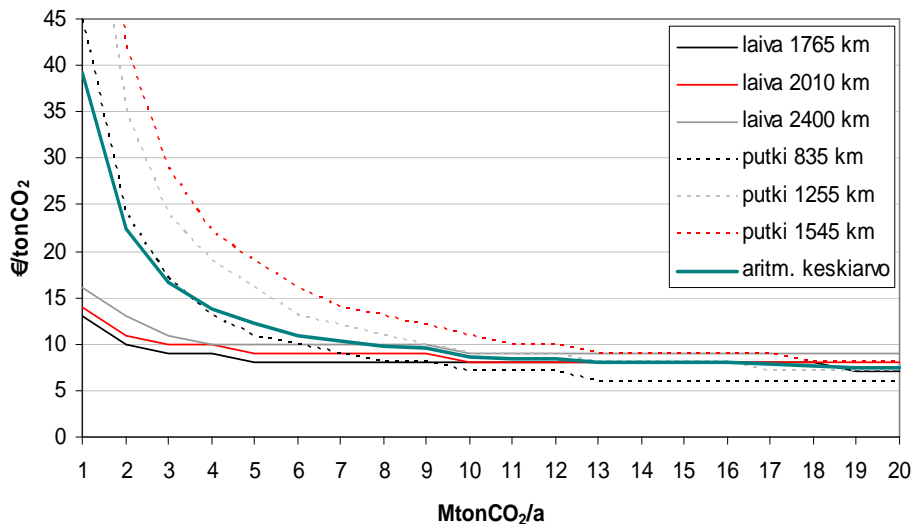
Suomessa talteenotetun hiilidioksidin vaatima kuljetusinfrastruktuuri eroaa valtaosasta kirjallisuudessa esitetyistä tarkasteluista pitkien kuljetusetäisyyksien vuoksi. Tämän vuoksi valmista Suomen olosuhteisiin sovellettavaa ajankohtaista kustannustietoa on rajallisesti saatavilla. IEA:n vuonna 2008 julkaisemassa selvityksessä 1 000–5 000 km kuljetusetäisyyksiä vastaaviksi kustannuksiksi esitettiin 15–30 USD/t CO₂ (IEA 2008), mikä vastaa nykyisellä kurssilla noin 11–23 €/a/t CO₂. Laivakuljetuksen kustannus etäisyyttä kohden alenee välimatkojen kasvaessa, mikä vaikeuttaa kuljetushintojen vertailua ja skaalausta. Putkikuljetuksen kustannukset puolestaan kasvavat melko lineaarisesti etäisyyden mukaan, mutta kuljetettavalla ainemäärällä on suurempi merkitys kuin laivakuljetuksen tapauksessa. Putkikuljetuksen kustannukset siirrettävää CO₂-määrää kohden laskevat voimakkaasti ainevirran kasvaessa, kun laivakuljetuksessa kustannusetu suuresta CO₂-määrästä on pienempi. Viimeksi mainitussa selvityksessä (IEA 2008) putkikuljetuksen kustannuksiksi esitettiin 100 km:ä kohden 2–6 USD/t CO₂ (nykykurssilla n. 1,5–4,5 €/t CO₂), kun siirrettävä CO₂-määrä on 2 Mt CO₂/a.

CCS Suomi -projektissa laskettiin hiilidioksidin siirtokustannuksia sekä meri- että putkikuljetuksen osalta. Laivakuljetuksen puolesta tarkasteltiin etäisyyksiä, jotka kattavat laivareitit koko Suomen rannikolta Pohjanmeren loppusijoituskohteita

edustavalle Sleipnerin kaasukentälle. Vastaava selvitys suoritettiin Barentsinmeren rannalle johtavalle putkilinjalle suurten päästölähteiden alueen kattaville etäisyyksille. Suomesta lähtevän putkilinjan päätepisteeksi oletettiin Norjan Melköya, jonka LNG-tuotantolaitokselta nykyhetkellä syötetään vuosittain 0,7 Mt hiilidioksidia Tubåenin merenalaiseen suolavesikerrostumaan, joka sijaitsee n. 150 km kohti luodetta. Laskelmien tuloksia hyödynnettiin energiajärjestelmätarkasteluissa (luku 4).

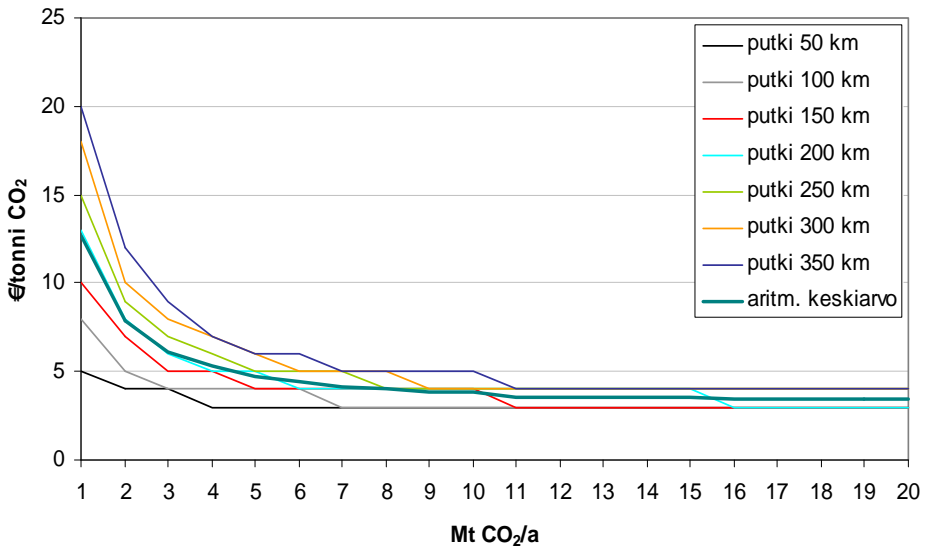
Suomen olosuhteissa CO₂:n siirtäminen loppusijoitusterminaaliin säiliöaluksin osoittautuisi tulosten mukaan putkilinjoin toteutettavaa kuljetusta halvemmaksi alle 6 Mt CO₂/a kuljetusmäärillä (Kuva 4.3). Putkikuljetuksella ei saavutettaisi tulosten valossa myöskään merkittävää kustannusetua tätä suuremmilla ainemäärillä. Hiilidioksidin laivakuljetuksen kustannus alkaa vakiintua alle tasolle 10 €/t CO₂ jo 5 Mt CO₂/a ainemäärillä. Käytännössä kyseisten CO₂:n talteenottomäärien saavuttaminen vaatisi useamman pistelähteen päästöjen yhdistämistä.

Barentsimerelle asti ulottuvaan kustannustehokkaaseen putkikuljetukseen vaadittavan CO₂-virran kerääminen sisämaahan rakennettavista talteenottolaitoksista voi olla haastavaa. Vaihtoehtona on siirtää CO₂:a putkilinjalla rannikolle suurten talteenottolaitosten yhteyteen edelleen säiliöaluksin tai runkolinjaa pitkin loppusijoitusalueelle kuljetettavaksi. Hiilidioksidin putkikuljetuksen yleiset kustannukset sisämaasta rannikolle vaadituin etäisyyksin esitetään Kuvassa 4.4.



Kuva 4.3. Yleiset kuljetuskustannukset CO₂:lle Suomen rannikolta Pohjanmeren ja Barentsinmeren loppusijoitusalueille.

4. CCS:n kustannukset



Kuva 4.4. Yleiset putkikuljetuskustannukset sisämaasta Suomen rannikolle.

4.3 Varastointikustannukset

Hiilidioksidin loppusijoituksen kustannukset riippuvat loppusijoitustavasta, ja eroavat alueellisesti. Lisäksi kustannukset eroavat tapauskohtaisesti. Hiilidioksidin lopullisen varastoinnin osalta kustannuksia on esitetty eniten suolavesikerrostumiin injektoimisen osalta. Kuten talteenoton ja kuljetuksen kustannusten osalta, tulokset eroavat toisistaan laadultaan sekä taustaoletuksiltaan merkittävästi. Vuoteen 2007 mennessä julkaistuissa selvityksissä merenalaiselle loppusijoitukselle esitettiin alle 10 €/t CO₂ kustannuksia (IPCC 2005, IEA GHG 2005, Rubin et al. 2007). Myöhemmin julkaistuissa IEA:n ja McKinseyn raporteissa kustannukset varastoimiselle suolavesikerrostumaan merenalaisessa maankuoressa olivat nousseet tasolle 12 €/t CO₂ (McKinsey 2008) sekä 8,4–16,9 €/tCO₂ (IEA 2008). Maanalaiselle loppusijoitukselle kirjallisuudessa esitetyt kustannukset ovat pääsääntöisesti alhaisempia kuin merenalaisten suolavesikerrostumien tapauksille, vaihdellen karkeasti välillä 1–5 €/t CO₂ (IPCC 2005, McKinsey 2008).

Suolavesikerrostumien lisäksi voidaan hiilidioksidia varastoida ehtyneisiin öljy- ja kaasukenttiin injektoimalla tai vaihtoehtoisesti hyötykäyttämällä kaasua tehostetussa öljynporauksessa ja hiilikerrostumien metaanivarantojen talteenottamisessa. Hiilidioksidin varastoimisesta ehtyneisiin öljy- ja kaasuesiintymiin on esitetty kirjallisuudessa laajempaa skaalaa kustannuksille kuin suolavesikerrostumien tapauksissa. Halvimmillaan ehtyneisiin hiilivetykerrostumiin varastointi on IEA

GHG:n vuoden 2005 laskelmissa, joiden mukaan loppusijoituksen hinta on 1–3 €/t CO₂. McKinseyn (2008) esittämät kustannukset vastaavalle toiminnalle ovat puolestaan 4 (maalainen) – 11 €/t CO₂ (merenalainen). Suurimmat kustannukset, 8,4–21,1 €/t CO₂, esitti IEA (2008).

Loppusijoitettavan hiilidioksidin hyötykäytöllä tehostettuun öljynporaukseen tai hiilikerrostumien metaanivarantojen talteenottamiseen voidaan pyrkiä kattamaan varastoinnin kustannuksia. Kustannushyöty määräytyy tapauskohtaisesti. CO₂:n injektoimiselle hyödynnettävään öljykenttään on esitetty selvästi korkeampia kustannuksia kuin suolavesikerrostumiin injektoimiselle (30 €/t CO₂) kuten myös injektoimiselle hiilikerrostumiin (40 €/t CO₂) (IEA GHG 2005). Tarkemat laatuvaatimukset loppusijoitettavalle hiilidioksidille, samoin kuin öljyn- ja kaasuntuotantolaitosten investoinnit CO₂:n erotus- ja jälleeninjektointikapasiteettiin laskevat osaltaan lisääntyneestä lopputuotannosta saatavaa voittoa. Rubin et al. 2007 esittävät 12,7 €/t CO₂ hyvitystä CCS-ketjulle, joka ohjaa talteenotetun hiilidioksidin tehostettuun öljyntuotantoon.

4.4 Koko CCS-ketjun kustannustarkastelut esimerkkisovelluksissa Suomessa

CCS Suomi -projektissa arvioitiin CCS:n soveltamista käytännön prosesseissa kolmessa eri sovelluskohteessa. Sovelluskohteiden osalta tarkasteltiin prosessimulointien avulla konseptien toimivuutta sekä energia- ja ainetaseita sekä määritettiin kustannukset ja kasvihuonekaasupäästötaseet. Tarkastelujen ajankohtana käytettiin vuotta 2015, jolloin tapaukset edustavat ns. demonstraatiovaiheen tilannetta sekä teknologioiden että kustannusten osalta. Tarkasteltavat kolme sovelluskohdetta olivat:

- Sovelluskohde 1: Lauhdevoimala rannikolla

Tälle sovelluskohteelle ominaisia piirteitä ovat suuri kokoluokka (1 300 MW_{pa}) ja sijainti rannikolla. Polttoaineena käytetään kivihiihtä. Tätä kohdetta tarkasteltiin retrofit laitoksena hiilidioksidin talteenotolla savukaasuista pesuriteknikalla. Liuottimena käytettiin sekä MEA:a että toista kehittyneempää (energiataloudellisempää) liuotinta. Talteenottokapasiteetti on suuruusluokkaa 3 Mt/a, ja hiilidioksidin kuljetus tapahtuisi laivoilla.

4. CCS:n kustannukset

- Sovelluskohde 2: CHP-laitos sisämaassa

Tälle sovelluskohteelle ominaisia piirteitä ovat sähkön ja lämmön yhteistuotanto käyttäen jyrksinturvetta sekä mahdollisuus polttoaineen vaihtoon ml. biomassan käyttö. Hiilidioksidin kuljetusvaihtoehtoja silmälläpitäen sijainti sisämaassa on hallitseva piirre (putkikuljetus rannikolle). Tätä kohdetta tarkasteltiin uutena laitoksena (500 MW_{pa}) sekä happipoltolla että talteenotolla savukaasuista pesuriteknikalla käyttäen liuottimena MEA:ta. Talteenottokapasiteetti on suuruusluokkaa 1,5 Mt/a.

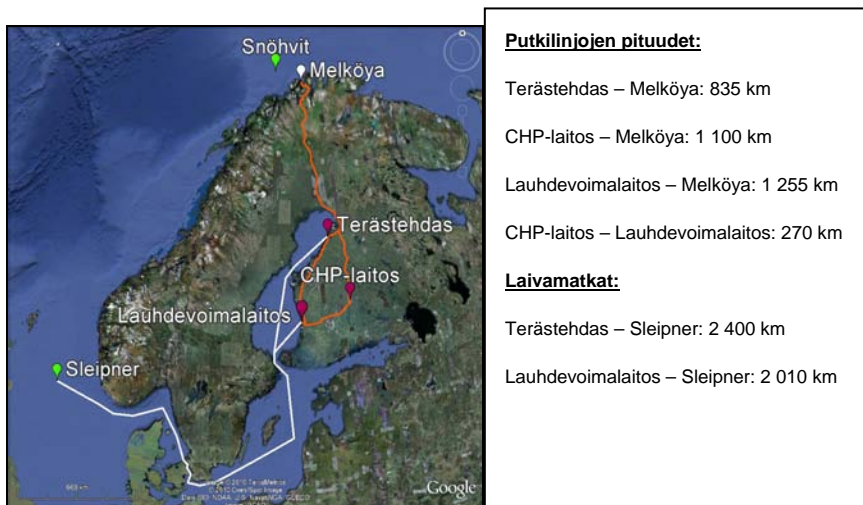
- Sovelluskohde 3: Terästehdas rannikolla

Tämä sovelluskohde edustaa hiilidioksidi-intensiivistä teollisuutta, jossa on tarjolla ylimääräisiä prosessilämpöjä liuottimen regeneroinnissa hyödynnettäviksi. Sijainti rannikolla ja hyvin erilaiset prosessi-integraatiomahdollisuudet verrattuna puhtaisiin voimalaitossovellutuksiin karakterisoivat tätä tarkastelukohdetta. Projektin puitteissa tarkasteltiin lähemmin retrofit- hiilidioksidin talteenottoa savukaasuista pesuriteknikalla käyttäen liuottimena MEA:ta, kehittyneempää liuotinta (sama kuin sovelluskohteessa 1) sekä tähän kohteeseen kehiteltyä, fiktiivistä, matalammassa lämpötilassa regeneroituvaa, liuotinta. Sovelluskohteelle tehtiin useita case-tarkasteluita erilaisilla väliottohöyrymäärillä sekä erilaisilla investoinneilla tehdään hukkalämpöjen talteenottoihin johtaen erikokoisiin CCS-laitoksiin. Hiilidioksidin kuljetus tapahtuisi laivoilla. Talteenottokapasiteetti vaihtelee casetarkasteluissa välillä 0,2–3 Mt/a.

Sovelluskohteiden kustannuksia tarkasteltiin useissa tuotanto- ja markkinatilanteissa erilaisten toiminnan reunaehtojen ja herkkyystarkasteluiden avulla. Kustannuslaskelmissa pyrittiin käyttämään mahdollisimman realistisia lähtöarvoja sovelluskohteen toimintaympäristön kannalta. Sekä laiva- että putkikuljetuksen kustannukset on selvitetty jokaisesta sovelluskohteesta talteenotetulle hiilidioksidille. CHP-laitoksella talteenotettu CO₂ kuljetetaan putkilinjan avulla rannikolle myös tapauksessa, jossa CO₂ laivataan Pohjanmerelle. Sovelluskohteiden sijainnit sekä tapaustarkastelujen kuljetusreitit ovat esitettynä Kuvassa 4.5. Varastoinnin on oletettu tapahtuvan etupäässä merenalaisen maankuoren suolavesikerrostumiin. Ottaen huomioon kirjallisuudessa ilmoitetuissa varastointikustannuksissa havaittavan hajonnan ja nousevan trendin, on esitettävissä kustannustarkasteluissa päädytty mukailemaan lähdeettä McKinsey et al. (2008), jolloin varastointikustannukset olisivat 11–12 €/t CO₂.

Päätulokset sovelluskohteiden yhteenvedosta esitetään Kuvissa 4.6–4.9. Laitoksen tuotannossa vältettyjen suorien CO₂-päästöjen kustannukset yhdessä CCS:stä aiheutuvien tuotantotappioiden ja lisäkustannusten kanssa määrittävät päästöoikeudelle keskimääräisen rajahinnan, jolloin CCS-laitokseen investoiminen ja toiminta muuttuvat edullisemmaksi kuin ilman CCS:ää (Kuvat 4.6 ja 4.7). Rajahinnoiksi saadaan esim. 80 €/MWh sähköhinnalla eri sovelluskohteissa n. 75–85 €/t (lauhde), n. 70–80 €/t (CHP) ja n. 70–100 €/t (teräs). Tässä lauhdetapauksessa referenssilaitoksen (ilman CCS:ää) huippukäyttöaika on 6 000 h/a, ja CHP-laitoksessa (sekä referenssi että CCS-case) on lauhdeperä käytössä sähkön tuotannon maksimoimiseksi. Korkeat kuljetuskustannukset nostavat sisämaassa sijaitsevan CHP-sovelluskohteen ja terästeollisuussovelluskohteen pienen talteenottomäärän rajahintoja verrattuna muihin tarkastelutapauksiin.

Rajahinta on luonnollisesti herkkä eri lähtömuuttujien arvoille. Mikäli esim. tarkastellaan tapausta, jossa sähkön hinta on 50 €/MWh (Kuva 4.7), lauhdetapauksessa referenssilaitoksen huippukäyttöaika on 4000 h/a, ja CHP-laitoksessa, jossa ei ole lauhdeperää käytössä, saadaan rajahinnoiksi n. 100–110 €/t (lauhde), n. 90–115 €/t (CHP) ja n. 55–100 €/t (teräs). Päästöoikeuden rajahinta ei kuitenkaan kerro laitoksen toiminnan kannattavuudesta; toiminta sekä CCS:llä että ilman voi olla tietyissä markkinatilanteissa kannattamatonta.



Kuva 4.5. CCS Suomi -projektin kolme sovelluskohdetta oletettuine kuljetusreitteineen. Laivareitit on merkitty valkoisilla linjoilla, putkilinjat oransseilla. Vihreät kyltit kuvaavat loppusijoituskohteita, Utsiran suolavesikerrostumaa Sleipnerin porauslautan alla, sekä Tubäenin muodostelmaa Snöhvitin kaasukentän yhteydessä. Putkilinjojen oletetaan päättyvän Melköyan tuotantolaitokselle.

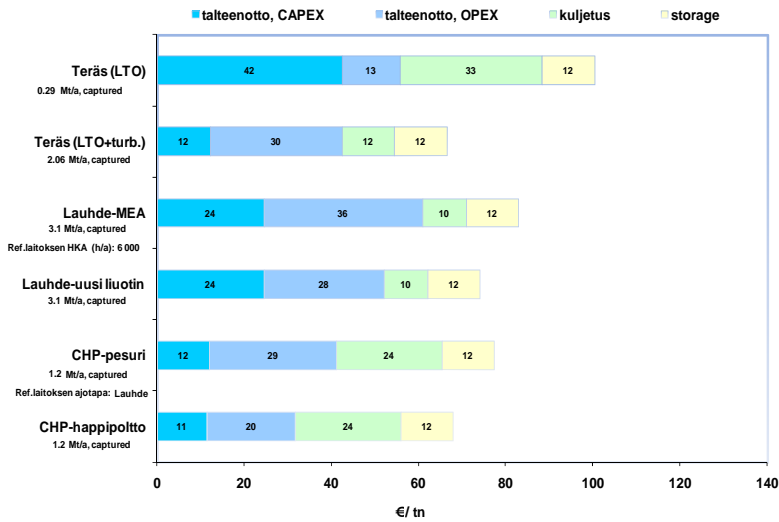
4. CCS:n kustannukset

Matalammassa lämpötilassa (n. 80 °C) regeneroitavan liuottimen käyttö laskisi terästedassoventilointikohteen rajahintaa merkittävästi, koska kohteessa on saatavilla huomattavasti enemmän hukkalämpöä tuolla lämpötilatasolla kuin MEA:n regeneroinnin vaatimissa lämpötiloissa. Matalan lämpötilan liuottimella Kuvien 4.6 ja 4.7 mukaiset rajahinnat muuttuisivat esimerkiksi terästedassoventilointikohteen *LTO+turb.-casessa*¹ 70 €sta 60 €oon/t ja 55 €sta 50 €oon/t.

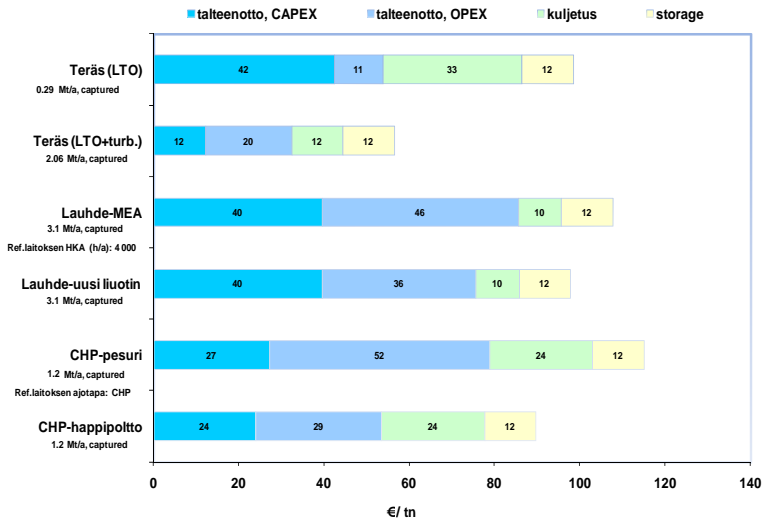
Korvaavan/korvattavan sähköntuotannon aiheuttamat CO₂-päästöt/päästövähennykset ja yksinkertaistetun elinkaaritarkastelun muut CO₂-päästöt voivat muuttaa globaalisti vältettyjen päästöjen rajakustannusta merkittävästi edellä esitetyistä toimijakohtaisista rajahinnoista. Laajempien ilmastovaikutusten kannalta erityisesti erot sähköntuotannon määrissä ilman ja kera CCS:n, sekä korvaavan/korvattavan sähköntuotannon päästöt, ovat ratkaisevia. Kun huomioidaan edellisiin tarkasteluihin lisäksi nämä korvaavan sähköntuotannon ja yksinkertaistetun elinkaaritarkastelun muut päästöt, niin (globaalisti) vältettyjen CO₂-päästöjen kustannuksiksi saadaan esim. 50 €/MWh sähkönhinnalla eri sovelluskohteessa n. 70–85 €/t (lauhde), n. 70–85 €/t (CHP) ja n. 90–110 €/t (teräs), kun korvaavan/korvattavan sähköntuotannon päästöt perustuvat kivihiihtuotantoon (Kuva 4.8). Mikäli tarkastellaan tilannetta, jossa korvaava/korvattava sähköntuotanto on hiilidioksidineutraalia (Kuva 4.9), tilanne muuttuu huomattavasti tapauksissa, joissa tarkastelukohteen sähköntuotanto CCS:n kanssa poikkeaa olennaisesti vertailutilanteesta. CCS:n myötä sähköntuotanto saattaa myös lisääntyä joissain case-tarkasteluissa, sillä on perusteltua olettaa, että CCS:llä varusteltu laitos ajaa suuria vuosittaisia tuntimääriä. Tällöin vältettyjen päästöjen kustannukset muuttuvat Kuvien 4.8 ja 4.9 välillä eri suuntiin kuin tyypillisemmissä tapauksissa, joissa vertailutilanteessa tuotetaan laitoksella enemmän sähköä.

¹ Liuottimen regeneroinnissa hyödynnetty tehtaan hukkalämpöä sekä voimalaitoksen turbiinilta saatavaa väliottohöyryä.

4. CCS:n kustannukset



Kuva 4.6. Päästöoikeuden rajahinta, jolloin CCS-laitoksen toiminta (sis. Investoinnin kuoletuksen) muuttuu edullisemmaksi kuin toiminta ilman CCS:ää. Sähkönhinta 80 €/MWh. Terästehdas- ja CHP-pesurisovelluksissa oli käytössä MEA-liuotin, ja lauhdesovelluksissa tarkasteltiin kahta eri liuotinta. Myös terästehdas- ja CHP-sovelluksissa olisi mahdollista käyttää kehittyneempiä tai sovelluskohteisiin paremmin sopivia liuottimia, mikä parantaisi näiden tapausten taloudellisuutta merkittävästi.



Kuva 4.7. Päästöoikeuden rajahinta sähkönhinnalla 50 €/MWh. Terästehtaan tapauksessa pelkän LTO:n lämpömäärän mukaisesti mitoitettu CCS on kallis pienen kokoluokan aiheuttaman suuren ominaisinvestoinnin ja korkeiden kuljetuskustannusten seurauksena. Suuret kuljetuskustannukset (sisämaa) nostavat CHP-tarkastelukohteen kustannuksia.

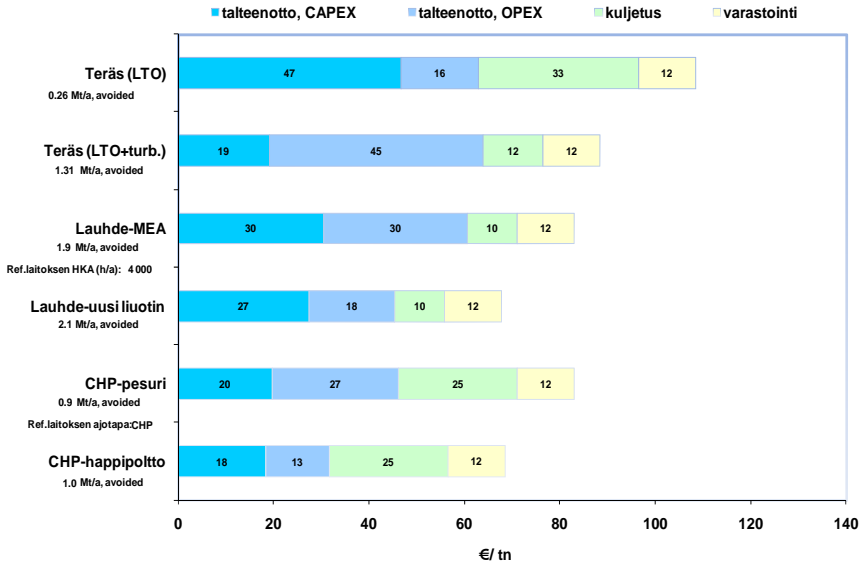
4. CCS:n kustannukset

Kuvissa 4.8 ja 4.9 esitetyt vältettyjen päästöjen kustannukset ovat erityisen herkkiä myös eri tapausten huipunkäyttöajoille. Esimerkiksi muuttamalla lauhdesovelluskohteen referenssitilanteen huipunkäyttöaika Kuvaa 5.10 vastaavassa tilanteessa 4 000 tunnista 6 000 tunniksi muuttuu vältetyn päästön kustannus MEA-tapauksessa 85 eurosta 100 euroon tonnilta. Vastaavasti, CHP-sovelluskohteen referenssitilanteessa (ilman CCS:ää), jossa korkealla sähkönhinnalla (80 €/MWh) tehdään lauhdetuotantoa, saadaan vältetyn päästön kustannuksiksi 145–170 euroa/tonni. Tämä on seurausta siitä, että referenssitilanteessa on korkeampi sähköntuotannon taso lauhdeperän ansiosta, jolloin CCS-tapauksissa menetetään enemmän sähköntuotantoa referenssitilanteeseen verrattuna. Tässä CHP-sovelluskohteen tapauksessa menetetään lisäksi tarkastelun piiriin kuuluvan apu-CHP-laitoksen biopolttoaineperäistä sähköntuotantoa, mikä laskee vältettyjen päästöjen tasoa.

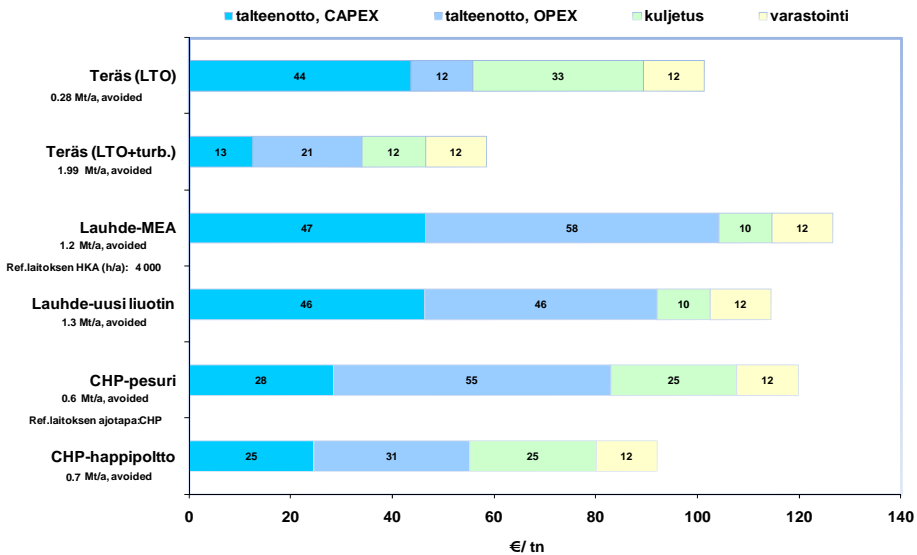
Yhteenvetona sovelluskohdetarkasteluista voidaan todeta, että CCS:n kustannukset ovat voimakkaasti riippuvaisia itse tarkastelevan sovelluskohteen ominaisuuksista ja toimintaympäristöstä, mutta lisäksi käytetyistä tarkasteluiden rajauksista ja oletuksista. Tietyissä sovelluskohteissa voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia parannuksia hyödyntämällä tehokkaasti CCS:n ja perusprosessin välisiä lämpöintegrointeja sekä lämpöjen hyötykäyttöä esim. kaukolämmön tuotannossa. Lisäksi toiminnan taloudellisuutta voidaan tehostaa CCS:n mahdollistamalla uudentyypisillä prosessien ajotaparatkaisuilla, esim. ohittamalla CCS-prosessi korkean sähkön markkinahinnan aikana.

Teknisesti CCS:n soveltaminen tarkasteltujen prosessien yhteydessä on mahdollista, mutta lähitulevaisuuden päästöoikeuden ja sähkön markkinahintojen tasoilla ei CCS ole vielä kannattavaa. Pesurisovelluksien tarkasteluissa käytettiin pääasiassa MEA-liuotinta, joka ei ole todennäköinen ratkaisu käytännön CCS-sovelluksissa tulevaisuudessa. Kehittyneimmillä liuotinratkaisuilla terästeollisuussovelluskohde voi olla edullisin tarkastelluista sovelluskohteista. CHP-sovelluksissa on lauhdelaitoksiin verrattuna enemmän vaihtoehtoja ja optimointimahdollisuuksia mm. tuotannon, hyötysuhteiden ja talteenoton suhteen.

4. CCS:n kustannukset



Kuva 4.8. Vältettyjen CO₂-päästöjen kustannukset eri sovelluskohteissa. Sähkönhinta 50 €/MWh ja korvaavan/korvattavan sähköntuotannon päästöt perustuvat kivihiiliin tuotantoon.



Kuva 4.9. Vältettyjen CO₂-päästöjen kustannukset eri sovelluskohteissa. Sähkönhinta 50 €/MWh ja korvaavan/korvattavan sähköntuotannon päästöt ovat hiilidioksidineutraaleja. Kustannus laskee terästeollisuussovelluskohteen LTO+turb.-casessa johtuen suhteellisesti suuremmasta CCS:n aiheuttamasta sähköntuotannon menetyksestä.

4. CCS:n kustannukset

Esimerkkeinä käytettyihin voimalaitossovelluskohteisiin tarkasteltiin karkeasti myös vaihtoehtoisten päästövähennysmenetelmien soveltuvuutta ja kustannuksia. Lauhdelaitossovelluskohteessa tarkasteltiin esimerkiksi biomassan lisäämistä pienellä osuudella (4 %) suoraan hiilimylyjen kautta ja suuremmalla osuudella (30 %) kaasutuksen kautta. CHP-sovelluskohteessa tarkasteltiin turpeen korvaamista biomassalla (70 % osuuteen asti) sekä hyötysuhteen nostamista (2 prosenttiyksiköllä) polttoainetta kuivaamalla. Näiden vaihtoehtoisten päästövähennyskeinojen käyttöönotto vaikuttaisi teknisesti mahdolliselta ja taloudellisesti kannattavammalta kuin CCS:n käyttöönotto. Päästöjen vähennyspotentiaalin osalta useimpien näiden keinojen soveltaminen on kuitenkin rajoitetumpaa kuin CCS:n myötä.

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti

CCS:n roolia Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti arvioitiin skenaariotarkasteluin, joissa hyödynnettiin hankkeessa arvioituja hiilidioksidin erotuksen ja kuljetuksen kustannuksia sekä energiantuotannossa että teollisuuslaitoksissa. Energiajärjestelmän kehitystä arvioitiin päästöoikeuden hinnan funktiona. Laskelmissa ja niiden lähtöoletuksissa huomioitiin tehdyt energia- ja ilmastopoliittiset päätökset sekä päästökauppa- että ei-päästökauppasektorien osalta. Lähtöoletuksena olivat siten eduskunnan päätökset uusista ydinvoimaluvista sekä uudet, vuonna 2011 voimaan astuneet polttoaineiden verot energia- ja liikennesektoreille. Sen sijaan Suomen tavoitteet uusiutuvan energian lisäyksistä vuoteen 2020 mennessä eri sektoreilla eivät täysin noudata Suomen kansallista toimintasuunnitelmaa (ks. TEM 2010), vaan ne perustuvat mallin optimoimiin tuloksiin. Skenaariolaskelelmien taustalla ovat lisäksi laskennalliset arviot nykyisten energiantuotanto- ja teollisuuslaitosten poistumasta, mikä vaikuttaa mallin laskemiin investointitarpeisiin eri vuosina.

5.1 Laskentamenetelmän kuvaus

CCS:n roolia Suomen energiajärjestelmässä arvioitiin VTT:n kehittämällä Nordic TIMES -energiajärjestelmämallilla. Nordic TIMES -malli on pohjoismainen sovellus globaalista ETSAP:n TIAM-mallista, jota on kehitetty kansainvälisessä yhteistyössä IEA:n ETSAP-ohjelman puitteissa. Nordic TIMES -mallissa on kuvattuna Suomen, Ruotsin, Norjan ja Tanskan energiajärjestelmä. Malli on linkitetty globaalimalliin, ja Pohjoismaiden lisäksi malli käsittää 11 muuta aluetta, joista mainittakoon Itä- ja Länsi-Eurooppa sekä Venäjä omina alueinaan. Näin ollen malli soveltuu erinomaisesti Suomen energiajärjestelmän kehityksen arviointiin, koska myös Suomen lähialueet, ml. energiainfrastruktuuri, ovat mukana laskennassa.

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti

Nordic TIMES -mallissa on kuvattuna energiahyödykkeiden ja päästöoikeuksien kansainvälinen kauppa. Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden hinta määräytyy mallissa globaalien kysynnän ja tarjonnan tasapainohinnan mukaan. Polttoaineen hintaan vaikuttavat lähinnä polttoaineen tuotanto- ja kuljetuskustannukset, joten mallin laskema tasapainohinta ei vastaa esim. raaka-ainepörssissä noteerattuja markkinahintoja. Nordic TIMES -malliin on myös kuvattu pohjoismainen sähkökauppa, eli sähkön hinta Suomessa määräytyy pohjoismaisena tasapainohintana. Tässä yhteydessä tulee kuitenkin huomata, että malli laskee sähkön hinnan pitkän aikavälin marginaalikustannusten perusteella, eikä lyhyen aikavälin marginaalikustannuksista, kuten sähkön pörssihinta nykyään määräytyy. Toisaalta malli voi investoida uusiin sähkön siirtoyhteyksiin esimerkiksi Nord Pool -alueelta Itä- tai Länsi-Eurooppaan, mikäli investointi on kannattavaa annetuilla lähtöoletuksilla.

Mallissa hiilidioksidin erotusinvestoinnit ovat sallittuja suuren kokoluokan sähköntuotannossa ja CHP-laitoksilla. Lisäksi CCS:ään voi investoida teräksen, metsäteollisuuden prosessien, öljynjalostuksen sekä sementin valmistusprosessien yhteyteen. CCS on sallittu sekä fossiilista polttoainetta että biopolttoainetta käytävillä laitoksilla, eli laskelmissa on oletettu, että toimija saa taloudellista hyötyä myös laskennallisesti negatiivisista päästöistä. Nykyisten kasvihuonekaasupäästöjen laskentasääntöjen mukaan biomassan polton aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä ei huomioida esim. kansallisessa khk-päästöinventaarissa eikä EU:n päästökauppajärjestelmässä.

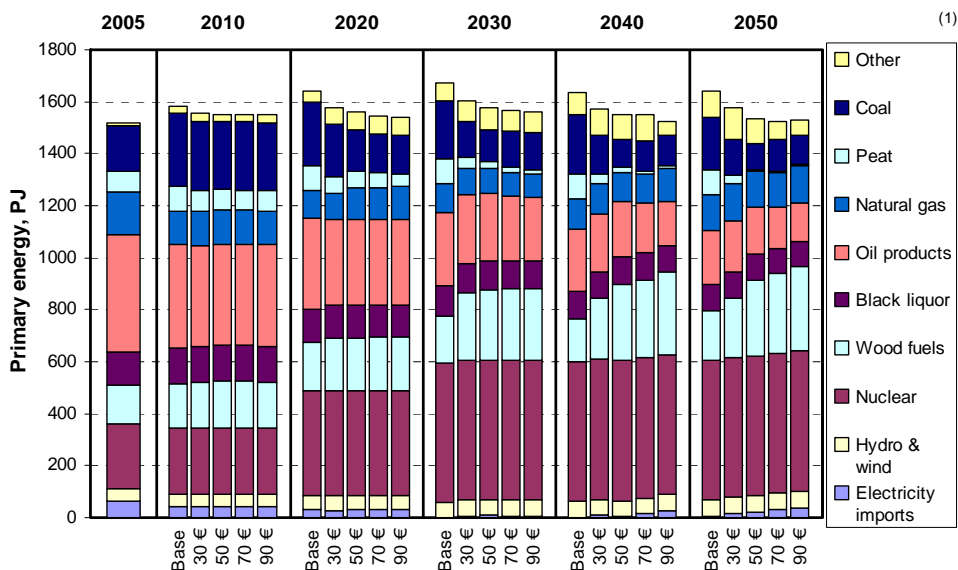
Hiilidioksidin kuljetuksen osalta malliin on määritelty kuljetuksen kustannukset sisämaasta rannikolle sekä rannikolta Norjanmerelle, Tanskan merialueille, Itä-Eurooppaan ja Länsi-Eurooppaan. Hiilidioksidin kuljetus ja varastointi on siten mahdollista sekä offshore- että onshore-varastoihin. Varastoinnin kustannukset ovat puolestaan määritelty varastotyyppin mukaan, eli vanhoihin öljy- ja kaasukenttiin varastointi on oletettu edullisemmaksi kuin suolavesikerroksiin varastointi. Lisäksi hiilidioksidin varastoille on määritetty varastokapasiteetit kirjallisuuden perusteella (GeoCapacity-projektista), ja kaikki alueet voivat kilpaila samoista varastoista, esim. myös Länsi-Euroopasta voidaan kuljettaa hiilidioksidia Norjanmerelle varastoitavaksi, mikäli se on kannattavaa.

5.2 Suomen energia- ja päästöskenaarioita vuoteen 2050

Kuvassa 5.1 on esitetty primäärienergian käytön kehitys vuoteen 2050 päästöoikeuden eri hintatasoilla. Laskennassa päästöoikeuden hinta nousee lineaarisesti tasolta 20 €/t CO₂ vuonna 2010 tasolle 30–90 €/t CO₂ vuonna 2040. Baseline-

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti

skenaariossa päästöoikeuden hinta on nolla. Ydinvoiman osalta on oletettu, että sekä TVO että Fennovoima investoivat 1 600 MW_e reaktoriin, ja lisäksi Fortumin Loviisan voimala korvautuu uudella 1 600 MW_e reaktorilla. Näin ollen oletuksena on, että ydinvoimakapasiteetti ei missään vaiheessa pienene.

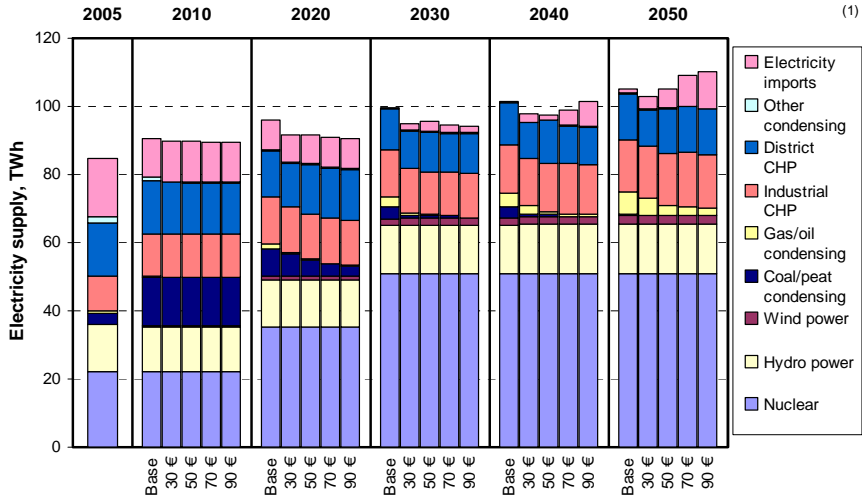


Kuva 5.1. Primäärienergian kulutus eri päästöoikeuden hintatasoilla.

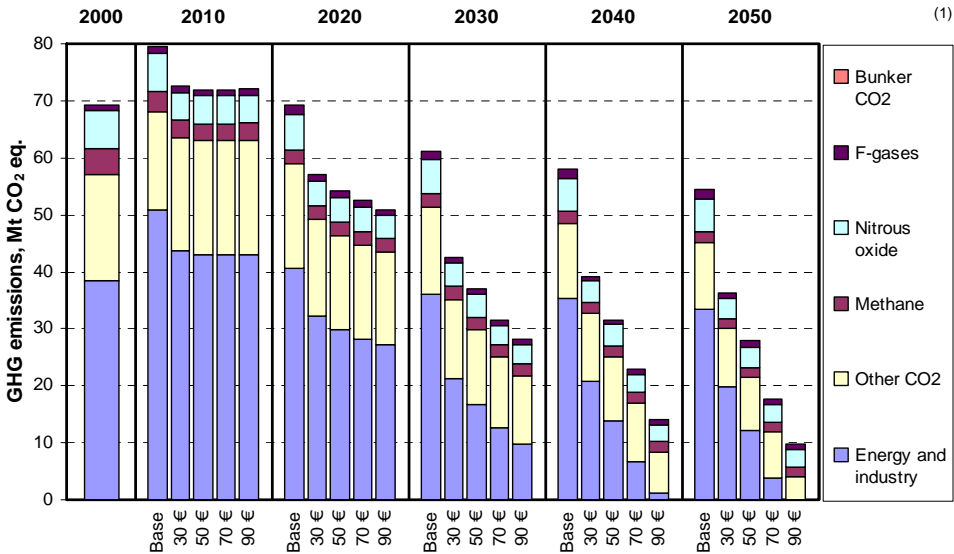
Kuvasta nähdään, että primäärienergian kulutus pysyy lähes nykyisellä tasolla, kun päästöoikeuden hinta nousee tasolle 50 €/t CO₂. Toisaalta ydinvoiman osuuden kasvun lisäksi puubiomassan käytön lisäys on huomattava, ja toisaalta fossiilisten polttoaineiden käyttö pienenee, erityisesti öljyn osalta.

Kuvassa 5.2 esitetään vastaavasti Suomen sähköntuotanto päästöoikeuden eri hintatasoilla ja Kuvassa 5.3 kasvihuonekaasupäästöjen kehitys. Malliin on kuvattu kaikki Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähentämistekniikat, joten Kuvassa 5.3 näkyy myös muiden kasvihuonekaasupäästöjen kuin hiilidioksidin kehitys. Toisin kuin primäärienergian kulutus, sähkön kulutus kasvaa selkeästi etenkin korkeammilla päästöoikeudenhintatasoilla, eli havaittavissa on energiajärjestelmän sähköistyminen ilmastotavoitteiden kiristyessä. Ydinvoimat tuotannon lisäksi CHP:n osuus kasvaa sekä yhdyskunnissa että teollisuudessa.

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti



Kuva 5.2. Sähkön tuotanto Suomessa päästöoikeuden eri hintatasoilla.



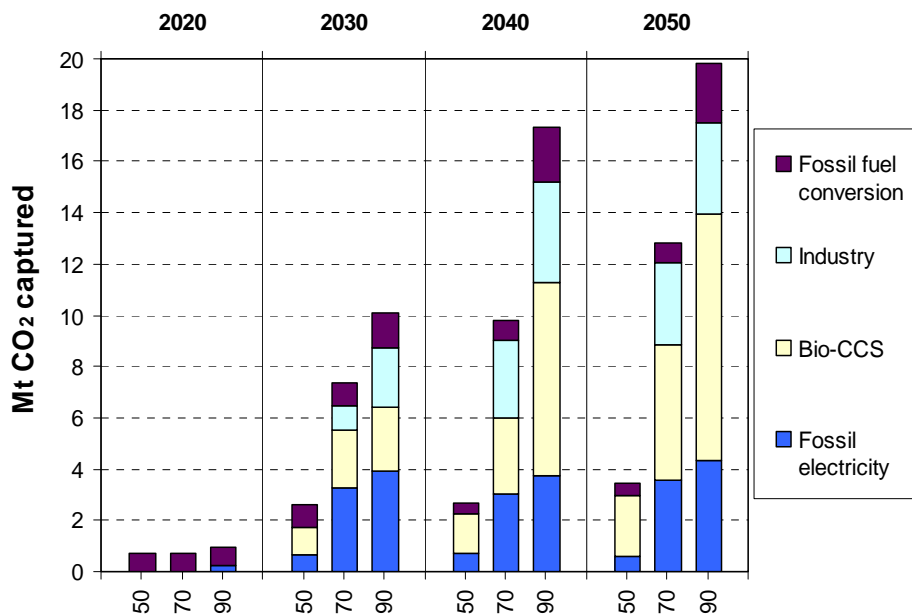
Kuva 5.3. Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys päästöoikeuden eri hintatasoilla.

Kuvasta 5.3 nähdään kasvihuonekaasupäästöjen kääntyminen laskuun jopa päästöoikeuden hintatasolla nolla. Taustalla on fossiilisten energiavarojen hupeneminen ja sitä myöden niiden hinnan nousu sekä lisäksi Suomessa vuonna 2011 voimaan astuneet uudet polttoaineverot, jonka vuoksi investoinnit erityisesti

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti

energiatohokkuuden lisäämiseen tulevat kannattaviksi. Hintatasolla 90 €/t CO₂ energiantuotannon ja teollisuuden hiilidioksidipäästöt ovat laskeneet nolnaan vuonna 2050 kokonaiskasvihuonekaasupäästöjen ollessa noin 10 Mt CO₂ eq.

Kuvissa 5.4 ja 5.5 esitetään erotetun hiilidioksidin määrät, kun bio-CCS on huomioitu (1. bio-CCS sallittu) tai ei ole huomioitu päästövähennyskeinona (bio-CCS ei-sallittu). Jälkimmäisessä tapauksessa on oletettu, että ”negatiivisista” päästöistä ei ole mahdollista saada taloudellista hyötyä esim. päästöoikeuksina. Kuvista käy selkeästi ilmi bio-CCS:n suuri merkitys Suomelle, eli erotetun hiilidioksidin määrät voisivat nousta jopa tasolle 20 Mt CO₂/a vuoteen 2050 mennessä, mikäli päästöoikeuden hinta olisi noin 90 €/t CO₂. Vastaavasti erotetun hiilidioksidin määrä olisi noin 9 Mt CO₂, mikäli CCS sallitaan vain fossiilista polttoainetta käyttävissä laitoksissa.

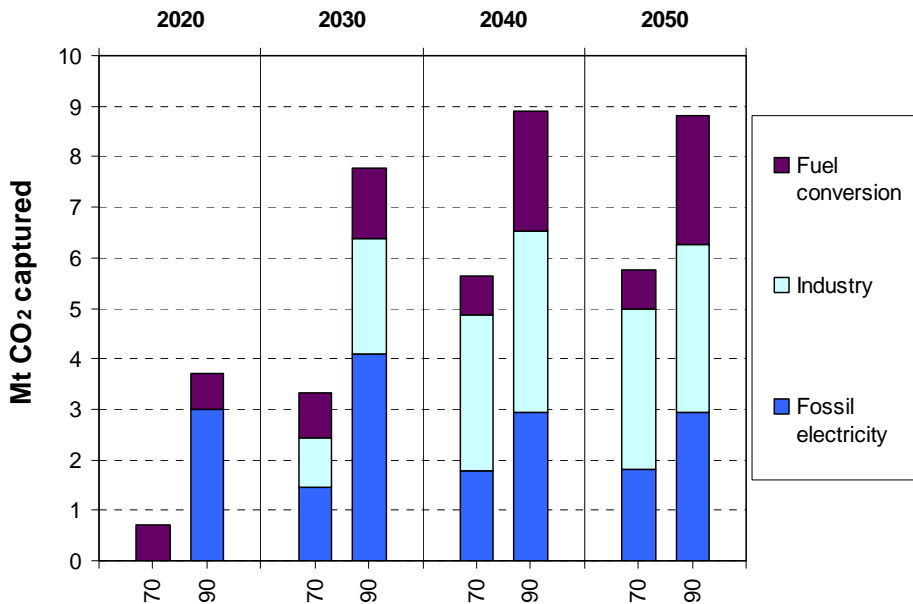


Kuva 5.4. Erotetun hiilidioksidin määrät päästöoikeuden eri hintatasoilla, kun bio-CCS on sallittu. Bio-CCS sisältää CCS:n integroituna energiantuotantoon, metsäteollisuuden prosesseihin ja liikennepolttoaineen tuotantoon (FT-diesel). CHP on mukana sekä ”fossil electricity” että ”bio-CCS”-sektoreilla.

Kuvasta täytyy myös huomata, että verrattuna edellä esitettyihin case-tarkasteluihin tulokset eivät ole välttämättä yhtenevät, vaikka esim. CCS-tekniikka- ja kustannusoletusten osalta lähtöoletuksia on pyritty yhtenäistämään mahdollisimman paljon. Tuloksiin vaikuttavat merkittävästi paitsi oletukset päästöoikeu-

5. CCS:n rooli Suomen energiajärjestelmässä vuoteen 2050 asti

den hintatasoista myös oletukset sähkön ja polttoaineiden hinnoista. Herkkyys-tarkastelut osoittivat, että laskentatulokset ovat erityisen herkäät oletuksille, jotka vaikuttavat CCS-laitoksen käyttökustannuksiin.

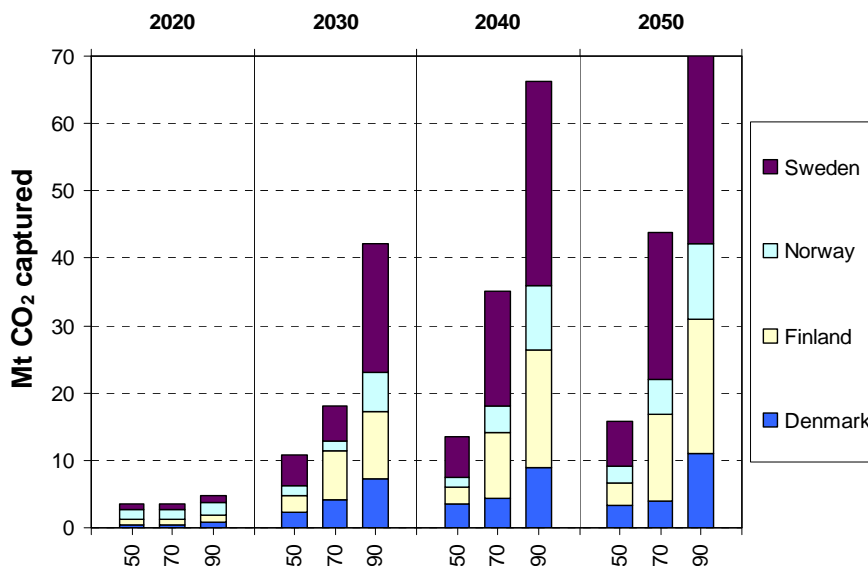


Kuva 5.5. Erotetun hiilidioksidin määrä päästöoikeuden eri hintatasoilla, kun bio-CCS ei ole sallittu.

Kuvassa 5.6 esitetään lisäksi CCS:n merkitys eri Pohjoismaissa. Skenaariolas-kelmien mukaan eniten CCS:ään investoitaisiin hieman ehkä yllättäen Ruotsissa ja Suomessa eli Pohjoismaissa, joissa ei ole omia hiilidioksidin varastointipaik-koja. Sen sijaan Ruotsissa ja Suomessa on runsaasti metsäteollisuutta sekä erin-omaiset mahdollisuudet käyttää biomassaa energiantuotannossa sekä liikenteen polttoaineiden tuotannossa. CCS:n suuri osuus selittyykin Ruotsissa samoin kuin Suomessa bio-CCS:n kannattavuudesta. Herkkyystarkastelussa, jossa bio-CCS ei ollut sallittu, erotetun hiilidioksidin määrät Pohjoismaissa yhteensä jäivät noin 35 Mt:n CO₂-tasolle päästöoikeuden hinnalla 90 €/t CO₂.

Skenaariotarkasteluissa tarkasteltiin myös oletetun ydinvoimakapasiteetin vai-kutusta CCS-investointeihin. Herkkyystarkastelussa ydinvoimatuotanto oletettiin noin 10 TWh pienemmäksi kuin perustapauksessa, eli tarkastelussa ydinvoimatuo-tanto oli tasolla 40 TWh vuonna 2030–2050. Hieman yllättäen, oletettu ydinvoi-makapasiteetti ei juuri vaikuttanut erotetun hiilidioksidin määrään. Herkkyystar-kastelussa fossiilisen CCS:n osuus energiantuotannossa hieman kasvoi, kun taas

teollisuuden CCS hieman pieneni. Syynä teollisuuden CCS:n osuuden pienenemiseen on korkeampi sähkön hinta tapauksessa, jossa ydinvoimaan ei investoida maksimaalisesti. Korkeampi sähkön hinta nostaa CCS:stä aiheutuvia käyttökustannuksia.



Kuva 5.6. Erotetun hiilidioksidin määrät päästöoikeuden eri hintatasoilla eri Pohjoismaissa, kun bio-CCS on sallittu.

5.3 Yhteenveto

Skenaariolaskelmien johtopäätöksenä voidaan todeta, että 10–30 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä voitaisiin vähentää CCS-tekniikan avulla vuonna 2050. Tämä edellyttää päästöoikeuden hintatason nousua noin 70–90 €/tonn CO₂ vuoteen 2050 mennessä. Oletukset liittyen tulevaisuuden ydinvoimakapasiteettiin eivät muuttaneet juurikaan CCS-potentiaalia, koska alhaisempi sähkön hintataso ydinvoimakapasiteetin kasvaessa, paransi CCS:n kannattavuutta teollisuuden prosesseissa. Skenaariotarkastelut osoittavat, että tavoiteltaessa suuria päästöleikkauksia, CCS:llä voisi olla merkittäväkin rooli Suomen energiajärjestelmässä. Mahdollisuudet hyödyntää bio-CCS:ää khk-päästöjen vähentämisessä lisäisivät CCS:n potentiaalia merkittävästi erityisesti Suomessa.

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

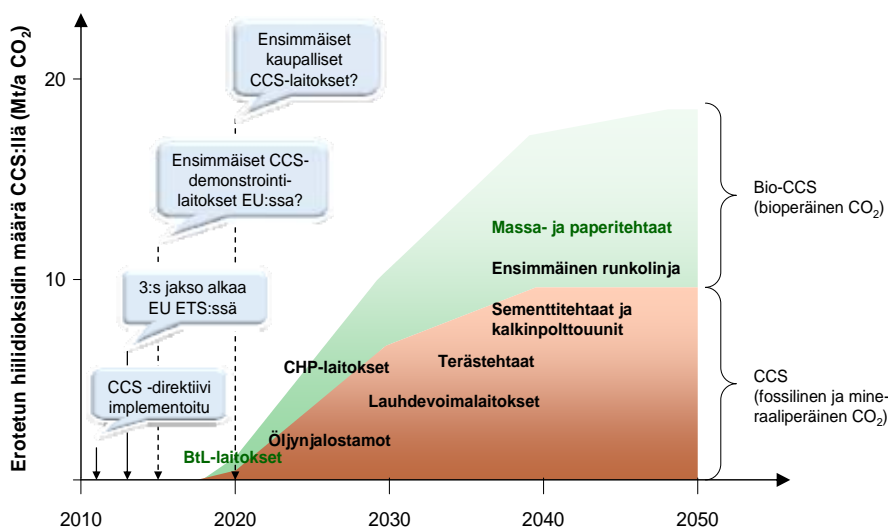
Kööpenhaminan sitoumuksen (UNFCCC 2009) ja Eurooppa-neuvoston tavoitteiden mukaisesti pitkällä aikavälillä pyritään pysäyttämään maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden. Tämä edellyttää peräti 80 %:n kasvihuonekaasujen päästövähennystä vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä ja kansainvälisesti sitovia päästövähennysvelvoitteita tavoitteiden saavuttamiseksi. Seurauksena on todennäköistä, että päästöoikeuksien hinta tulee nousemaan huomattavasti nykytasosta. Tarkastelumme (katso esim. kappale 4) ovat osoittaneet, että näissä olosuhteissa CCS:llä voisi olla merkittävä rooli myös Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä: 6–9 Mt CO₂ (tai 8–13 %²) olisi edullista vähentää CCS:llä, mikäli päästöoikeuksien hinta nousee 70–90 euroon per tonni vuoteen 2040 mennessä. Mikäli mahdollisuus bio-CCS:ään otetaan huomioon ja kannuste siihen sisällytettäisiin päästökauppaan, voitaisiin CCS:llä vähentää KHK-päästöjä peräti 14–20 Mt CO₂ (tai 20–28 %¹). Tässä luvussa on pyritty hahmottamaan, miten tämä päästövähennys voitaisiin käytännössä toteuttaa Suomessa CCS:llä. Kappaleessa tuodaan myös esille toteuttamisen hyötyjä ja haittoja sekä kaupallistumisen esteitä.

6.1 Roadmap CCS:n toteuttamiseen Suomessa

CCS-käyttöönottoa Suomessa on hahmotettu Kuvassa 6.1. Lähiaikoina ainoat tiedossa olevat varmat virstanpylväät CCS:lle ovat EU:n CCS-direktiivin toteuttaminen kansalliseen lainsäädäntöön (vuoden 2011 loppuun mennessä) ja kolmas kausi EU:n päästökaupassa, jolloin CCS on sisällytetty päästökaupan piiriin hyväksyttynä päästövähennysteknologiana (EC 2009a). Direktiivissä varataan myös 300 miljoonaa päästöoikeutta tukemaan kaupallisen CCS- tai uusiutuvan energian demonstrointihankkeen rakentamista ja käyttöönottoa. Tällä investointi-

² Verrattuna vuoden 1990 kasvihuonekaasujen päästöihin Suomessa: 70,4 Mt CO₂ekv.

ohjelmalla, jota kutsutaan myös NER300-aloitteeksi, rahoitetaan enintään 12 CCS-demonstroinihanketta. Yksi rahoituksen saamisen ehtoista on CCS-laitoksen käyttöönotto vuoden 2015 aikana, joten on todennäköistä, että ensimmäiset CCS-laitokset 250–300 MW kokoluokassa otetaan käyttöön silloin. Fortumin Meri-Pori-hankkeen kaaduttua on epätodennäköistä, että yhtäkään näistä CCS-demonstraatiolaitoksista tulisi Suomeen. Sen sijaan on hyvin mahdollista, että suomalainen biopolttonesteen tuotantolaitos löytyisi demonstraatorahoituksen saajista. Kuten aikaisemmin on mainittu (esim. alakohta 3.5), biopolttonestelaitosten tuottamaa hiilidioksidia voitaisiin suhteellisen edullisesti ottaa talteen, mutta tämä edellyttäisi, että bio-CCS:ään kannustettaisiin esim. päästökaupalla.



Kuva 6.1. Roadmap CCS:n käyttöönotolle Suomessa: n. 10–20 Mt CO₂ voitaisiin vähentää CCS:llä vuonna 2050.

Bio-CCS on viime vuosina tullut voimakkaasti esiin kansainvälisessä keskustelussa, joten on mahdollista, että bio-CCS:lle löytyisi kansallisia tai kansainvälisiä kannustimia jo vuonna 2020. Vuonna 2020 pitäisi myös maailman ensimmäisten kaupallisten CCS-laitosten (500–1 000 MW:n kokoluokan voimalaitokset) olla käytössä.

Suomessa ensimmäiset kaupalliset sovelluskohteet nähdään todennäköisesti polttoainetalouksessa, koska käytännön kokemus hiilidioksidin talteenottamisesta ja kuljetuksesta laivoilla löytyy jo tästä teollisuudenhaarasta (esim. käynnissä oleva Porvoon jalostamon hiilidioksidituotantolaitos). Suomen sähkötuotanto ja

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

CHP-tuotanto nousee lähitulevaisuudessa ja on siksi odotettavissa, että poistuva tuotanto korvataan uusilla, mahdollisesti CCS:llä varustetuilla CHP-voimalaitoksilla. Mahdollisina alkuvaiheen sovelluskohteina (vuosina 2020–2030) pidetään olemassa olevia suuren kokoluokan kivihiihivoimalaitoksia, joilla on vielä pitkä käyttöikä jäljellä eikä mahdollisuuksia merkittävästi muuttaa polttoainevalikoimaansa. Epäedullisen energiatehokkuuden takia on kuitenkin epätodennäköistä, että CCS:ää sovellettaisiin olemassa olevaan lauhdevoimalaitokseen. Uudet voimalaitokset tulevat todennäköisesti olemaan joustavampia polttoaineen suhteen niin, että niillä pystytään entistä paremmin polttamaan sekä turvetta, kivihiihtä että biomassaa.

Terästuotannossa panostetaan lähivuosina energiatehokkuuteen, ja happimasuunin odotetaan olevan kaupallista teknologiaa ja sovellettavissa teräksen tuotantoon vasta vuonna 2030. Todennäköisesti CCS:ää sovellettaisiin teräksen tuotantoon 2030-luvulla. CCS:n soveltamista sementti- ja kalkkituotannossa ei nähdä myöskään tapahtuvan ennen vuotta 2040, koska päästövähennyspotentiaali on suhteellisesti pieni ja teknologia ei ole niin pitkälle kehitetty kuin voimalaitoksissa. Massa- ja paperituotannon bioperäiset hiilidioksidipäästöt ovat Suomessa (ja Ruotsissa) huomattavia. Suurimpien massa- ja paperi-integraattien päästöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin Suomen suurimmat fossiilisen hiilidioksidin päästöt (katso Liite A). Hiilidioksidin talteenottaminen massa- ja paperituotantointegraatin savukaasuista vaikuttaa kuitenkin teknisesti haastavammalta kuin voimalaitoksista keskimäärin (katso alakohta 3.5), mutta tätä vaihtoehtoa ei ole vielä tutkittu perusteellisesti. Sen lisäksi, ottaen huomioon, että bio-CCS:lle ei vielä löydy taloudellisia kannustamia, on epätodennäköistä, että CCS voisi olla käytössä massa- ja paperituotantointegraatissa ennen vuonna 2030.

Demonstraatiovaiheessa, sekä ainakin kaupallistumisensa jälkeisellä vuosikymmenellä, Suomessa talteenotettu hiilidioksidi kuljetettaisiin tällä hetkellä näköpiirissä oleville loppusijoitusalueille meriteitse säiliöaluksin. Pitkillä välimatkoilla yksittäisen talteenottolaitoksen CO₂-virta ei riitä kustannustehokkaaseen putkikuljetukseen. Lisäksi putkilinjan rakentamisen vaatima lupamenettely sekä maankäyttöoikeuksien hankinta ovat eri suuruusluokkaa laivakuljetuksen kanssa, joka ei itsessään vaadi lupamenettelyä. Putkilinjaa ei myöskään voida toteuttaa suuren investointikustannuksensa sekä heikon muunneltavuutensa takia, ennen vakiintunutta CCS-toimintaa talteenottoalueella. Varastointialueen täytyy myös olla varmistetusti ja takuiden kera toiminnassa putkilinjan suunnitellun käyttöajan vaaditulla injektointikapasiteetilla. CO₂:n putkikuljetus Suomen ulkopuolisille loppusijoitusalueille tulee kyseeseen vasta usean suuren,

lähekkäin toisiaan sijaitsevan, talteenottolaitoksen rakentamisen yhteydessä, jolloin laitokset voisivat jakaa yhteisen runkolinjan. Talteenottomäärien kehittyminen huomioiden, runkolinja tuskin tulisi kustannustehokkaaksi ennen 2030-luvun alkua. Runkolinja voisi olla mahdollinen noin vuonna 2030, olettaen että bioperäisten hiilidioksidipäästöjen talteenotto sisällytetään hallitsevan CO₂-päästökaupan tai päästövähennyssopimuksen mekanismeihin. Paras mahdollisuus hiilidioksidin putkilinjan rakentamiselle näyttää löytyvän Pohjanlahden pohjoisrannikolta. Suomessa ja Ruotsissa sillä alueella sijaitsevien suurten terästehtaiden ja voimalaitosten yhteenlasketut hiilidioksidipäästöt ylittävät 11 Mt/a. Tälle teollisuusklusterille hiilidioksidin kuljettaminen putkilinjalla varastoitavaksi Norjaan Barentsinmeren suolavesikerrostumiin näyttää olevan logistisesti edullisin ratkaisu, mutta se olisi näillä näkymin toteutettavissa aikaisintaan vuonna 2040.

6.2 Laajamittaisen toteuttamisen hyödyt ja haitat

CCS:n laajamittaisen toteuttamisen hyötyjä ja haittoja voidaan tarkastella monesta näkökulmasta. Tässä kohdassa niitä arvioidaan sekä ympäristön kannalta ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta että Suomen kannalta talouden ja työllisyyden näkökulmasta.

CCS:n hyödyt liittyvät ennen kaikkea ilmastonmuutoksen hillintään. CCS mahdollistaa, tai vähintään helpottaa, radikaalien päästövähennysten saavuttamista kohtuullisen nopealla aikataululla. Myös laskennallisesti negatiiviset CO₂-päästöt ovat CCS:n avulla mahdollisia. Joillain teollisuuden toimialoilla CCS voi olla käytännössä ainoa mahdollisuus vähentää merkittävästi CO₂-päästöjä. Mikäli CO₂-päästöoikeuden hinnat nousevat tulevaisuudessa korkeiksi, CCS tulee olemaan myös taloudellisesti kannattava CO₂-päästöjen vähentämiskeino.

CCS mahdollistaa nykyisen, voimakkaasti fossiilisiin polttoaineisiin nojautuvan energijärjestelmän muuttamisen ja fossiilisista polttoaineista luopumisen hitaammin, kuin ilmastonmuutoksen hillintä ilman CCS:ää vaatisi. Tämän voi nähdä positiivisena esimerkiksi hallitumman ja taloudellisemman muutoksen kannalta tai toisaalta negatiivisena esimerkiksi siksi, että kestäväan energiainfrastruktuurin kehitys hidastuu ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan jatkaa pidempään. Monissa kehittyvissä maissa merkittävä energian kysynnän herääminen ja siitä aiheutuvan energiantuotannon raju kasvu perustuu edullisiin fossiilisiin polttoaineisiin, mikä aiheuttaa tarpeen niiden käytöstä aiheutuvien ilmasto-

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

haittojen pienentämiseen. Näinollen CCS voi mahdollistaa talouden kehittymisen näillä alueilla ilmastonmuutoksen hillinnän vaatimuksista huolimatta.

Investoinnit suuren kokoluokan laitoksiin ja CCS:ään tuovat pitkäjänteisyyttä ja ennustettavuutta energijärjestelmään ja päätöksentekoon sekä mahdollisesti helpottaisivat yhdyntyvän energijärjestelmän hallintaa. Toisaalta CCS tuo järjestelmään uusia ulottuvuuksia esimerkiksi kuljetusten ja varastoinnin osalta, mikä hankaloittaa mm. lainsäädäntöä ja vähentää osaltaan joustavuutta. Laajamittaisen hyödyntämisen vaatimien jättimäisten laitos- ja järjestelmätason investointien takia järjestelmään sitoudutaan useiksi vuosikymmeniksi. Laajamittainen CCS:n käyttöönotto aiheuttaa myös energiantuotannon suuntautumista yhä voimakkaammin suurempiin yksiköihin ja harvalukuisten suurten toimijoiden käsiin.

Suomen kannalta CCS mahdollistaa radikaalien päästövähennysten lisäksi myös turpeen polton jatkamisen. Kotimaisten polttoaineiden käytöllä on merkittävät työllisyys- ja talousvaikutukset varsinkin aluepoliittisesta näkökulmasta. Myös energiatehokkaan ja CO₂:n lisäksi myös monien muiden ilmansaasteiden osalta usein suotuisan maakaasun käytön jatkaminen pysyy mahdollisena CCS:n avulla, vaikka CO₂-päästöjä haluttaisiinkin vähentää rajusti.

CCS:n laajamittaisen soveltamisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin on vielä epäselvää, sillä toisaalta madaltuneen hyötysuhteen aiheuttama tuotantotappio on korvattava lisätuotannolla ja toisaalta prosessi vaatii tehokkaampaa savukaasun puhdistusta. Lisäksi teknologian myötä myös kokonaan uutta kapasiteettia tullaan rakentamaan. Prosessista suoraan aiheutuvat päästöt ovat vielä osittain tuntemattomia ja prosessit kehitysvaiheessa. Jo nyt esimerkiksi amiinipohjaisten liuottimien post-combustion-tyyppisistä ratkaisuista aiheutuviin päästöihin kiinnitetään paljon huomioita. Vaikutus muihin päästöihin riippuu myös vertailukohdasta, sillä myös useimmissa vaihtoehtoisissa skenaarioissa rakennetaan uutta kapasiteettia, joka vaikuttaa erilaisiin päästöihin eri tavoin.

Uutena teknologiana CCS avaa liiketoimintamahdollisuuksia myös suomalaisille toimijoille. Esimerkiksi happipolttoteknologiaa kehitetään ja valmistetaan Suomessa, ja terästeollisuus voi toimittaa kuljetusputkistoja maailmalle. Myös telakkateollisuus voisi mahdollisesti kehittää kuljetuskalustoa nestemäiselle hiilidioksidille. CCS:n vaatimat säiliöt, pumput, puhaltimet, ohjausjärjestelmät, mittausjärjestelmät, todentamisyjärjestelmät ja muut laitteistot voivat avata uusia liiketoimintamahdollisuuksia myös useille pienemmille teollisuuden laitetoimittajille. Myös suomalaiselle tutkimus-, konsultointi- ja suunnittelupalveluille voi syntyä merkittävää uutta kysyntää.

Yhtenä teknologiavaihtoehtona CCS voi lisätä energiapaletin monipuolisuutta ja vaihtoehtoja, mikä parantaa myös huoltovarmuutta. Toisaalta Suomen kannalta riippuvuus fossiilisista polttoaineista voi lisääntyä moneen muuhun vaihtoehtoiseen päästjäenvähennysskenaarioon verrattuna huonontaen huoltovarmuutta ja omavaraisuutta. Lisäksi CCS:n mukana tulee riippuvuus ulkomaisista varastointipaikoista, elleivät esimerkiksi erilaiset karbonointimenetelmät kehity.

Suomi voi hyötyä erityisesti bio-CCS:n laajamittaisesta soveltamisesta, mikä mahdollistaisi negatiivisten päästöoikeuksien myynnin. Tämä saattaa myös aiheuttaa raaka-aineiden hinnan nousua puuta raaka-aineena käyttävässä teollisuudessa. Negatiiviset oikeudet eivät kuitenkaan vielä toistaiseksi ole hyväksyttäviä päästökaupassa. Negatiivisten päästöjen sisällyttäminen päästökauppaan vaikuttaa erittäin tärkeältä laajamittaisen CCS:n hyödyntämisen kannalta Suomessa. CCS:n haittapuolina voidaan pitää korkeita päästävähennyskustannuksia erityisesti silloin, kun hyötysuhteen putoamisen aiheuttama tuotannon menettäminen otetaan huomioon ja menetetty tuotanto korvataan fossiililla polttoaineilla jollain muulla laitoksella ilman CCS:ää. Lisäksi CCS:stä aiheutuva ylimääräinen energiankulutus (hyötysuhteen putoaminen) on vastoin energiatehokkuustavoitteita. CCS:n energiatehokkuuden tai kustannusten arvottaminen ei kuitenkaan ole yksiselitteistä, vaan ne molemmat riippuvat vertailukohdasta. Jos päästöjä halutaan vähentää rajusti, myös CCS:n vertailukohtana olisi ehkä syytä käyttää huomion hyötysuhteen laitoksia, joissa energiantuotanto on nykyistä kalliimpaa (esim. biopolttoaineet). Haastavien päästävähennystavoitteiden myötä energian ja useiden tuotteiden hinnat todennäköisesti nousevat huonontaen mm. suomalaisen teollisuuden kilpailukykyä. CO₂-päästökustannusten ylitettyä CCS:n kannattavuusrajan CCS on kuitenkin todennäköisesti edullisin jäljellä oleva päästävähennyskeino, eikä hintojen nousua siten tulisi laskea pelkästään CCS:n haitaksi.

Usein CCS:n merkittävimäksi haitaksi näyttäisikin muodostuvan se, että fossiilisten polttoaineiden poltto ja rajallisten varastointiresurssien täyttäminen voidaan nähdä kestäättömäksi toiminnaksi. CCS onkin yleisesti esitetty eräänlaiseksi välivaiheen ratkaisuksi ilmastonmuutoksen hillinnässä. Välivaiheella tarkoitetaan noin 100 vuoden siirtymäjaksota, jonka jälkeen fossiilisten polttoaineiden varat maapallolla ovat huomattavasti pienentyneet tai ehtyneet ja muut energiantuotantoteknologiat kehittyneet kilpailukykyisemmiksi.

Myös varastointiin liittyvät epävarmuudet sekä varastointiin liittyvä pitkä sitoutuminen monitorointiin ja vastuisiin ovat merkittäviä haittapuolia. Varastointiin poliittisesti ja geologisesti soveltuvat alueet ovat epätasaisesti jakautuneet maapallolla. Tämä lisää eriarvoisuutta ja aiheuttaa mahdollisesti ongelmia teknologian

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

soveltamisessa maissa, joilla omaa varastointikapasiteettia ei ole, sekä varastoinnin riskien kertymistä tietyille alueille ja siellä asuville ihmisille. Varsinkin on-shore-varastointialueiden asukkaat ovat vastustaneet kovasti ensimmäisiä varastointihankkeita (esim. Barendrechtissa). On mahdollista, että sekä varastointiin että myös talteenottoon ja kemikaalien valmistukseen, liittyy erilaisia ympäristö-, terveys- ja turvallisuusriskejä. Ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta myös hiilidioksidin pysyvyys varastossa on tärkeä tekijä. Investoijan näkökulmasta uuteen teknologiaan ja järjestelmään liittyy myös muita, lopulta taloudellisia näkyviä riskejä.

Erityisesti ympäristöjärjestöt ovat nostaneet esille myös huolen rajallisista tutkimus- ja kehitysresursseista, joista jo nykyisin merkittävä osa ohjautuu CCS:lle ja siten pois mm. uusiutuvan energian ja energian säästön kehittämisestä. Vastaavasti CCS kilpailee uusiutuvien energianlähteiden kanssa myös rajallisista investointiresursseista. Hyötyjä ja haittoja pohdittaessa onkin syytä korostaa, minkä kannalta niitä punnitaan. Ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta uusiutuvalla energialla vältetty CO₂-tonni ei ole CCS:llä vältettyä tonnia arvokkaampaa, mutta esimerkiksi kestävyysnäkökulmasta niitä voidaan vertailla.

6.3 CCS-teknologioiden kaupallistuminen

CCS-teknologioiden kaupallistuminen riippuu ensisijaisesti taloudellisten edellytysten olemassaolosta, mutta niihin vaikuttavat monet asiat. CCS-teknologioiden energiatehokkuutta on parannettava, regulaatioilla ja lainsäädännöllä on ohjattava nykyistä voimakkaammin kasvihuonepäästöjen vähentämistä. Ylipäätään hiilidioksidineutraalin energian hinnan on oltava sellainen, että CCS-tekniikkaan voidaan investoida ja sitä voidaan käyttää kaupallisina periaattein. Esimerkiksi pelkällä CCS-teknologian kehittämisellä nykyistä energiataloudellisempaan suuntaan ei voida saavuttaa tilannetta, jossa CCS-teknologia kaupallistuisi, vaan myös muiden edellytysten on täytyttävä. Ilman merkittäviä CO₂-päästöihin liittyviä maksuja ei CCS-teknologiasta voi käytännössä tulla kaupallista toimintaa.

Taloudellisten edellytysten luomisen lähtökohtana on käytännössä kansainvälisen yhteisymmärryksen löytäminen voimakkaalle kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiselle. Toistaiseksi vain EU on luonut järjestelmän, jonka tavoitteena on taloudellisten vaikutusten avulla ohjata alhaisempiin CO₂-päästöihin. Tosin toistaiseksi päästökaupan teho on ollut jokseenkin vaatimaton verrattuna CCS-teknologian käyttöönoton kustannuksiin. On kuitenkin odotettavissa, että päästökauppajärjestelmä sekä laajenee että päästöoikeuksien hinta nousee merkittävästi.

Samanaikaisesti CCS-teknologioita kehitetään nykyistä energiätehokkaammiksi, ja kokonaan uusia CCS-teknologioita testataan jo laboratorio-olosuhteissa. Yhdessä kehittyvän teknologian kanssa kiristyvät päästörajoitukset luovat edellytyksiä CCS-teknologioiden kaupallistumiselle.

Kaupallistumisen nopeuttamiseksi on myös luotu menettelytavat, joilla tekniikan kehittymistä kypsäksi, teollisesti sovellettavaksi tekniikaksi, nopeutetaan. Merkittävillä julkisilla demonstraatiolaitosten taloudellisilla tuilla teknologioita voidaan kehittää kaupalliselle tasolle jo ennen kaupallisten edellytysten täyttymistä. Yksittäiset laitosinvestoinnit ovat niin suuria, ettei teollisuuden voi olettaa testaavan niitä täydessä kokoluokassa omalla kustannuksellaan ja riskillään. EU:n ns. NER300-rahoitusinstrumentti on yksi tapa nopeuttaa täyden kokoluokan demonstraatioita, ja vastaavia pyrkimyksiä on myös muualla maailmassa.

Demonstraatiovaiheen tärkeimpinä tavoitteina voidaan pitää CCS-teknologioiden todellisten kustannusten selvittämistä, teknologioiden heikkouksien identifiointia, CCS:n laajamittaiseen soveltamiseen liittyvien riskien ja pullonkaulojen havaitsemista sekä näiden avulla nykyistä tehokkaampien, turvallisempien ja edullisempien CCS-ratkaisujen kehittämistä. Samalla demonstraatiohankkeiden toteutusten yhteydessä luodaan teollisia valmiuksia (mukaanlukien alihankintaketjut) CCS-teknologian kaupallistumiselle.

CCS-teknologioiden kaupallistumisen esteistä tekniikan kehittäminen lienee kuitenkin helpompaa kuin sitovien kansainvälisten kasvihuonekaasupäästöjen rajoitussopimusten aikaansaaminen. Ilman näitä sopimuksia kaupallistumista ei käytännössä voi tapahtua. Päästöoikeuden hinta on viime vuosina ollut 15–30 € tonnia kohden, ja vastaavasti arvioidut CCS:n kustannukset demonstraatiovaiheessa 60–90 €/tonni. Päästöoikeuden hinnan voidaan arvioida nousevan seuraavalla kaudella, ja vastaavasti CCS-demonstraatioiden myötä voidaan arvioida vältetyn CO₂-päästötonnin kustannusten laskevan. Näin edellytykset CCS-teknologioiden kaupallistumiselle voisivat täytyä vuoden 2020 jälkeen. Nykyistä selvästi tiukemmat, kansainväliset ja sitovat CO₂-päästörajoitukset, nopeuttaisivat merkittävästi hiilidioksidin talteenoton kaupallistumista.

Poliittisen yhteisymmärryksen ohella kenties suurimpana teknisenä haasteena voidaan pitää CO₂:n varastointia sekä erityisesti sen luotettavuutta ja turvallisuutta. Tämä on kysymys, johon ei vastauksia voitane saada ilman suuren kokoluokan demonstraatioita. Varastointi on myös asia, jonka laajamittaisessa käyttöönotossa myös julkisella mielipiteellä on merkittävä vaikutus. Julkisen hyväksyttävyyden kannalta helpoimpana voidaan pitää ulkomerellä toteutettavaa varastointia. Mantereella toteutettavan varastoinnin hyväksyttävyyden haasteista

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

on jo saatu esimerkkejä Keski-Euroopasta, jossa hankkeita on jouduttu hylkäämään voimakkaan julkisen vastustuksen vuoksi. On kuitenkin vaikea arvioida, millainen vaikutus nousevalla energian hinnalla tulee olemaan julkiseen mielipiteeseen. Nopeasti aikaansaavat tiukat kansainväliset ilmastopimukset edellyttäisivät nopeaa CO₂-päästöjen vähentämistä, ja silloin paineet energian hintaa kohtaan kasvaisivat voimakkaasti. Tällöin energian hinnannousua voitaisiin hidastaa CCS-teknologioiden käyttöönotolla.

Yhteenvedona CCS-teknologioiden kaupallistumisen edellytyksistä voidaan todeta tärkeimmän edellytyksen olevan sitova, kansainvälinen ilmastopimous. Teknologioiden kehittämisellä ja demonstroinnilla voidaan nopeuttaa kaupallistumista, mutta taloudelliset edellytykset syntyvät kansainvälisen yhteisymmärryksen ja ilmastopimuksen myötä.

6.4 Suositukset

On selvää, että arviot energiajärjestelmien kehityksistä ja CCS:n roolista sekä Suomen, EU:n että globaalista näkökulmasta sisältävät suuria epävarmuuksia. Tulevaisuuden kansallinen ja kansainvälinen energia- ja ilmastopolitiikka tulee merkittävästi ohjaamaan investointeja, ja energiamarkkinoiden integroituminen energian hintoja. Lisäksi yhdyskuntarakenteen muutokset, talouskasvu sekä energian tuonti- ja vientimahdollisuudet (vrt. esim. uusien sähkönsiirtoyhteyksien rakentaminen Suomen rajojen ulkopuolelle) tulevat ohjaamaan energian tuotantoa ja kysyntää Suomessa. Skenaariotarkastelut osoittavat, että tavoiteltaessa suuria päästöleikkauksia, CCS:llä voisi olla merkittäväkin rooli Suomen energiajärjestelmässä. Mahdollisuudet hyödyntää bio-CCS:ää kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä lisäisivät CCS:n potentiaalia merkittävästi erityisesti Suomessa. Toisaalta sekä CCS-teknologioiden että muiden vähäpäästöisten energiateknologioiden kehitys ja kilpailukyky pitkällä aikavälillä ovat edelleen pitkälti arvailujen varassa. Olisikin tärkeää, että CCS:n kilpailukykyä kehittyvässä energiajärjestelmässä arvioitaisiin riittävän usein sekä Suomen että globaalista näkökulmasta huomioiden suomalaisen teknologian ja palveluiden vientimahdollisuudet.

Suomella ei ole omalla alueellaan pysyvään hiilidioksidin geologiseen loppusijoitukseen soveltuvia sedimentti- tai sedimenttikivimuodostumia. Tämän vuoksi Suomen teollisuuden yhteistyö kotimaisten EU- ja muiden lähialueiden maiden ja toimijoiden kanssa on välttämätöntä, jotta voitaisiin taata pääsy sellaisiin muodostumiin, jotka sijaitsevat logistisesti optimaalisesti päästölähteisiin nähden, esim. Pohjois-Euroopassa, Norjassa ja Venäjällä ja niiden merialueilla.

Huolimatta viimeaikaisista euroopanlaajuisista ja Luoteis-Venäjän varastointi-kapasiteettiselvityksistä, kapasiteetin geologis-taloudellinen arviointi vaatii edelleen tarkentuvaa tutkimusta ja kehittämistä kaikissa loppusijoitusta suunnittelevissa maissa. Loppusijoituksen vastuukysymykset, koskien injektoinninaikaista sekä -jälkeistä taloudellista ja juridista vastuuta, tulee ratkaista kansainvälisillä sopimuksilla ennen kaupallisen CCS-toiminnan alkamista.

Hiilidioksidin sitominen karbonaattimineraaleiksi on Suomen runsaita mineraalivaroja ajatellen mielenkiintoinen varastointivaihtoehto, mutta siihen vaadittava teknologia on vielä hyvin varhaisessa kehitysvaiheessa. Tämä on kuitenkin ainoa kotimainen vaihtoehto hiilidioksidin lopulliselle varastoinnille ja siksi eri prosessivaihtoehtoja on syytä jatkossakin tutkia.

Suomen kallioperän luonne ja rakenne saattaa loppusijoituksen sijasta mahdollistaa hiilidioksidin väliaikaisen teollisen kokoluokan varastoinnin hiilidioksidia talteen ottavan laitoksen yhteydessä. Vastaavia ratkaisuja on olemassa muille teollisuuden ja energiantuotannon varastoimille nesteytetyille kaasuille magma- ja sedimenttikivialueilla muualla maailmassa, joten CO₂:n geologisia välivarastointiedellytyksiä Suomen oloissa tulisi tutkia tarkemmin sekä yleisesti että myös tulevien CCS-laitosten ympäristössä. Samalla tulisi selvittää välivarastointiteknologioiden mahdollisesti tuoma hyöty kalliolämmönsiirtosovellusten kehittämisessä.

Geologinen varastointi on erityisen herkkä yleisen kansalaismielipiteen liikkeille. Julkista hyväksyntää loppusijoituspaikkojen ja ympäristömenettelyä vaativien kuljetusprosessien perustamiselle ja toteuttamiselle ei voida suunnitella ja toteuttaa muiden CCS-järjestelmien tavoin. Nykyiset hiilidioksidin talteenottoon, kuljetukseen ja injektointiin liittyvät toimet maailmalla ovat tosin toteutuneet alueilla, jossa toiminnasta on hyötyä paikalliselle elinkeinolle.

Suomessa on muutamia erityispiirteitä, joita voi hyödyntää myös CCS:n näkökulmasta. Biopolttoaineet ja niihin liittyvä osaaminen yhdessä CCS:ään liittyvän osaamisen kanssa mahdollistavat johtavan aseman bio-CCS:n kehittämisessä. Tähän mahdollisuuteen on kuitenkin tartuttava nopeasti, sillä bio-CCS:lle on maalailtu lupaavaa tulevaisuutta jo useissa skenaariotarkasteluissa ympäri maailman. Vientimahdollisuuksien lisäksi bio-CCS voi laskea merkittävästi päästövähennyskustannuksia Suomessa verrattuna vain fossiiliseen CCS:ään. Bio-CCS vaatii lainsäädännöllisiä muutoksia, joiden toteuttamista tulisi edistää viipymättä. Lainsäädännölliset muutokset mahdollistaisivat myös bio-CCS:n biodieselin tuotannosta, joka voi olla yksi edullisimmista CCS-sovelluskohteista, mutta tällä hetkellä kannattamaton toteuttaa investoijan näkökulmasta.

6. CCS:n toteuttaminen Suomessa

Optimaalisten liuottimien tutkiminen, kehittäminen ja soveltaminen voi parantaa huomattavasti CCS:n kannattavuutta eri sovelluskohteissa. Suomessa olisi mahdollista kehittää myös CHP-järjestelmään paremmin sopivia liuottimia tai muita CCS-ratkaisuja. CHP-mahdollisuus on merkittävä etu CCS:n kokonaisyötysuhdetta ajatellen, joten myös CHP-CCS:n asemaa tulisi edistää. Myös tällä alueella suomalaisten on mahdollista ottaa edelläkävijän rooli. Bio-CCS tai CHP-CCS-sovellukset voivat myös erottua edukseen esimerkiksi, kun kansainvälistä demonstraatorahoitusta jaetaan. Hiilidioksidin kuljetukseen soveltuvien säiliöalusten suunnittelu, instrumentointi ja rakentaminen voisivat myös tarjota Suomen laiva- ja prosessiteollisuudelle uutta liiketoimintaa.

Päästöoikeuden hinnan pitää olla tarpeeksi ennustettava riittävän pitkällä aikavälillä, jotta CCS-investointeja kannattaa tehdä. Tämä vaatii sitovia ja tarpeeksi pitkäjänteisiä KHK-päästövähennysvelvoitteita. Velvoitteiden tulisi olla globaalisti kattavia, muuten on mahdollista, että teollisuuden on kannattavampaa siirtää tuotantoa muualle kuin investoida tuotantoon täällä. Lajinsa ensimmäiset sovelluskohteet eivät tule markkinoille ilman tukitoimia, joten päästökaupan lisäksi myös muita tukimuotoja on harkittava.

Lähdeluettelo

- Aatos, S., Kujanpää, L. & Teir, S. 2010. CO₂ capture and geological storage in Finnish conditions. Geological Survey of Finland Special Paper. (Painossa.)
- Cherepovitsyn, A. & Ilinsky, A. 2006. CO₂ Storage Potential in the North-West Federal District of Russian Federation. Proceedings from the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8), 19–22 June 2006, Trondheim, Norway.
- EC 2006. Komission tiedonanto. Energiatehokkuuden toimintasuunnitelma: Mahdollisuuksien toteuttaminen. Euroopan yhteisöjen komissio. KOM(2006)545 lopullinen, Bryssel 19.10.2006. <http://eur-lex.europa.eu>.
- EC 2007. Euroopan komission päätös N:o 2007/589/EY, tehty 18. päivänä heinäkuuta 2007, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/87/EY mukaisten ohjeiden vahvistamisesta kasvihuonekaasupäästöjen tarkkailua ja raportointia varten. <http://eur-lex.europa.eu>.
- EC 2009a. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/29/EY, annettu 23. päivänä huhtikuuta 2009. Direktiivin 2003/87/EY muuttamisesta kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kauppaa koskevan yhteisön järjestelmän parantamiseksi ja laajentamiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti, L140/63, 5.6.2009. <http://eur-lex.europa.eu>.
- EC 2009b. Euroopan parlamentin ja neuvoston päätös N:o 406/2009/EY, tehty 23. päivänä huhtikuuta 2009, jäsenvaltioiden pyrkimyksistä vähentää kasvihuonekaasupäästöjään yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämissitoumusten täyttämiseksi vuoteen 2020 mennessä. Euroopan unionin virallinen lehti, L140/136, 5.6.2009. <http://eur-lex.europa.eu>.
- EC 2009c. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY, annettu 23. päivänä huhtikuuta 2009, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti, L140/16, 5.6.2009. <http://eur-lex.europa.eu>.
- EGEC 2009. EGEC's Position on 'Carbon Capture and Storage'. Position Paper. 15/December/2009. EGEC – European Geothermal Energy Council. <http://www.egec.org/news/EGEC%20position%20paper%20on%20CCS.pdf>.
- Ekström, C., Andersson, A., Kling, Å., Bernstone, C., Carlsson, A., Liljemark, S., Wall, C., Ersted, T., Lindroth, M., Tengborg, P. & Elström, M. 2004. CO₂-lagring i Sverige. Elforsk Rapport 04:27. 129 s.

- EMV 2010. Päästöoikeustaseet 2005–2009. Energiamarkkinavirasto. <http://www.energia.markkinavirasto.fi>.
- IEA 2008. CO₂ Capture and Storage, A key Carbon abatement option. International energy Agency.
- IEA 2009. World Energy Outlook 2009. International Energy Agency. OECD/IEA, Paris. 691 s. ISBN 978-92-64-06130-9.
- IEA ETP 2008. IEA Energy Technology Perspectives 2008 – Scenarios and Strategies to 2050. International Energy Agency, IEA Publications, Paris. 643 s. ISBN 978-92-64-04142-4.
- IEA GHG 2005. Building the cost curves for CO₂ storage: European sector. International Energy Agency, Report Number 2005/2.
- IPCC 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. de Coninck, H. C., Loos, M. & Meyer, L. A. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge. 422 s.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., Meyer L. A. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Koistinen, T., Stephens, M. B., Bogatchev, V. , Nordgulen, Ø., Wennerström, M. & Korhonen, J. (comp.) 2001. Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. Special maps, 48. ISBN 951-690-812-8.
- KTM 2007. Kauppa- ja teollisuusministeriön asetus hiilidioksidipäästöjen tarkkailusta ja päästöistä laadittavasta selvityksestä. Annettu Helsingissä 31. päivänä toukokuuta 2007.
- Lindberg, A. 2010. Hiilidioksidin välivarastointi kallioperään. CCS Suomi -projektin arkistoraporttikäsikirjoitus.
- McKinsey & Company 2008. Carbon Capture and Storage: Assessing the Economics. Available from: http://www.mckinsey.com/client/service/ccsi/pdf/CCS_Assessing_the_Economics.pdf. [Accessed 9 October 2008].
- Rubin, E. S., Chen, C. & Rao, A. B. 2007. Cost and Performance of Fossil Fuel Power Plants with CO₂ Capture and Storage. Energy Policy 35(2007): 4444–4454.

- Sigmond, E. M. O. 2002. Geological map, Land and Sea Areas of Northern Europe. Scale 1:4 million. Geological Survey of Norway.
- Solismaa, L. 2009. Suomen merkittävimpien sedimenttikivimuodostumien CCS-soveltuvuus. Arkistoraportti K2.142/2009/56, Geologian tutkimuskeskus. 23 s.
- Solismaa, L. 2010. CCS:n soveltaminen Suomen olosuhteissa. Hiilidioksidin ympäristö- ja terveysvaikutukset, sekä riskien hallinta ja arviointi. CCS Suomi -projektin arkistoraporttikäsikirjoitus.
- Streimikiene, D. & Mikalauskiene, A. 2010. Analysis of possible geological storage of CO₂ and nuclear waste in Lithuania. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, Issue 6, s. 1600–1607.
- Teir, S., Aatos, S., Kontinen, A., Zevenhoven, R. & Isomäki, O.-P. 2006. Silikaattimineeraalien karbonoiminen hiilidioksidin loppusijoitusmenetelmänä Suomen oloissa. Summary: Silicate mineral carbonation as a possible sequestration method of carbon dioxide in Finland. *Materia* 63(1), s. 40–46.
- Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Arasto, A., Tourunen, A., Kärki, J., Nieminen, M. & Aatos, S. 2009. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Espoo: VTT Tiedotteita 2503. 61 s. ISBN 978-951-38-7324-0, 978-951-38-7325-7. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf>.
- Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. 2011. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) – Teknologia katsaus. VTT Working Papers 161. (Tulossa.)
- TEM 2010. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti. Työ- ja elinkeinoministeriö 30.6.2010.
- Tilastokeskus 2010a. Kasvihuonekaasut 2008. Suomen virallinen tilasto, Ympäristö ja luonnonvarat 2010. Helsinki, 23.04.2010.
- Tilastokeskus 2010b. Kasvihuonekaasut 2009, ennakkotiedot. Suomen virallinen tilasto, Ympäristö ja luonnonvarat 2010. Helsinki, 10.12.2010.
- UNFCCC 2009. Copenhagen Accord. Draft decision -/CP.15. FCCC/CP/2009/L.7. 18 December 2009.
- Vangkilde-Pedersen, T., Kirk, K., Smith, N., Maurand, N., Wójcicki, A., Neele, F., Hendriks, C., Le Nindre, Y.-M. & Anthonsen, K. L. 2009. GeoCapacity Final Report. EU GeoCapacity deliverable D42. 63 s.

YM 2010. Kioton pöytäkirja. Kioton pöytäkirjan esittely ympäristöministeriön www-sivuilla.
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=1885&lan=fi>. (Viitattu 1.7.2010.)

VM 2010. Hallituksen esitys Eduskunnalle energiaverotusta koskevan lainsäädännön muuttamisesta. Valtiovarainministeriön vero-osaston luonnos 1.7.2010.

VN 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008.

VNK 2009. Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: kohti vähäpäästöistä Suomea. Valtioneuvoston kanslia, VNS 8/2009 vp.

Liite A: Suomen suurimmat laitoskohtaiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2008

Laitos	Yhteensä	Fossiiliset ja mineraaliperäiset päästöt ³	Biomassan polttoperäiset päästöt
Rautaruukki Oyj, Raahen terästehdas	4 473 802	4 473 802	
Neste Oil Oyj, Porvoon jalostamo	2 981 447	2 981 447	
Stora Enso Oyj, Imatran tehtaot	2 959 987	187 029	2 772 958
UPM-Kymmene Oyj, Kaukaan tehtaot	1 798 537	134 021	1 664 516
UPM-Kymmene Oyj, Pietarsaaren tehtaot	1 655 034	30 638	1 624 396
Stora Enso Oyj, Oulun tehdas, Oulu	1 547 873	375 369	1 172 504
Stora Enso Oyj, Veitsiluodon tehtaot	1 464 560	357 049	1 107 511
Helsingin Energia, Vuosaaren B-voimalaitos	1 403 097	1 403 097	
ENOCELL Oy:n sellutehdas	1 391 413	40 435	1 350 978
Oy Metsä-Botnia Ab, Rauman tehdas	1 358 530	36 530	1 322 000
Fortum Power and Heat Oy, Meri-Porin voimalaitos	1 354 694	1 354 694	
Fortum Power and Heat Oy, Naantalain voimalaitos	1 321 290	1 321 290	
Oy Metsä-Botnia Ab, Kemin tehdas	1 282 597	64 597	1 218 000
UPM-Kymmene Oyj, Kymi	1 213 381	58 411	1 154 970
Oy Alholmens Kraft Ab	1 197 293	767 793	429 500
Oy Metsä-Botnia Ab, Joutsenon tehdas	1 159 597	71 597	1 088 000
Vaskiluodon Voima Oy, Vaskiluoto 2 voimalaitos	1 076 179	1 045 679	30 500
Oulun Energia, Toppilan voimalaitokset, Oulu	1 019 054	840 554	178 500
Ovako Wire Oy Ab, Koverharin terästehdas	854 208	854 208	
Oy Metsä-Botnia Ab, Äänekosken tehdas	820 164	18 164	802 000
Stora Enso Oyj, Varkauden tehtaot	816 874	117 016	699 858
Oy Metsä-Botnia Ab, Kaskisten tehdas	802 560	61 560	741 000
Fortum Power and Heat, Suomenojan voimalaitos	799 272	799 272	
Helsingin Energia, Hanasaaren B-voimalaitos	774 612	774 612	
Vantaan Energia Oy, Martinlaakso	747 211	747 211	
Jyväskylän Energiantuotanto Oy, Rauhalahden voimalaitos	739 215	454 415	284 800
UPM-Kymmene Oyj, Tervasaaren tehtaot	685 385	244 253	441 132
Vaskiluodon Voima Oy, Seinäjoen turvevoimalaitos	665 146	665 146	

³ Lähde: EMV(2010)

Liite A: Suomen suurimmat laitoskohtaiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2008

Laitos	Yhteensä	Fossiiliset ja mineraaliperäiset päästöt ⁴	Biomassan polttoperäiset päästöt
UPM-Kymmene Oyj, Jämsänkosken paperitehdas ja voimalaitos	615 633	135 787	479 846
Outokumpu Stainless Oy, Tornion tehtaata	612 271	612 271	
Helsingin Energia, Salmisaaren B-voimalaitos	578 014	578 014	
Finnsementti Oy, Paraisten sementtitehdas	574 413	574 413	
Kuopion Energia, Haapaniemen voimalaitos	555 541	555 541	
PVO-Lämpövoima Oy, Kristiinan voimalaitos, Blokki 2 (KRS2)	541 476	541 476	
Kymin Voima Oy, Kuusankosken voimalaitos	539 314	69 604	469 710
Lahti Energia Oy, Kymijärven voimalaitos	522 627	522 627	
Stora Enso Oyj, Kotkan tehtaata	517 362	261 627	255 735
Kanteleen Voima, Haapaveden voimalaitos	506 282	503 582	2 700
Tampereen Sähkölaitos, Naistenlahden voimalaitos	496 221	496 221	
Stora Enso Publication Papers Oyj Ltd, Anjalankosken tehtaata	474 239	400 463	73 776
PVO-Lämpövoima Oy, Tahkoluodon voimalaitos	472 412	472 412	
UPM-KYMMENE Oyj, Kaipolan tehtaata	463 543	94 539	369 004
Finnsementti Oy, Lappeenrannan sementtitehdas	444 153	444 153	
Borealis Polymers Oy, Olefiiniyksikkö	442 414	442 414	
Neste Oil Oyj, Naantalin erikoistuotejalostamo	417 042	417 042	
Helsingin Energia, Vuosaaren A-voimalaitos	399 334	399 334	
Tampereen Sähkölaitos, Lielahten voimalaitos	396 872	396 872	
Sunila Oy:n sellutehdas	359 579	39 579	320 000
Kainuun Voima Oy, Kajaanin höyryvoimalaitos	350 125	255 425	94 700
Stora Enso Oyj, Heinolan Flutingtehdas	346 792	163 716	183 076
Fortum Power and Heat Oy, Kirkniemen voimalaitos, c/o M-real Oyj, M-real Kirkniemi	335 533	335 533	
Laanilan Voima Oy, Oulun voimalaitos	330 445	283 545	46 900
Äänevoima Oy, Äänekosken voimalaitos	313 844	32 644	281 200
Rovaniemen Energia Oy, Suosiolan voimalaitos	287 731	258 631	29 100
Porin Energia Oy, Aittaluodon voimalaitos	260 438	260 438	
Porin Prosessivoima Oy, Porin tehdas	239 367	239 367	
Stora Enso Oyj, Kemijärven tehtaata	232 938	16 068	216 870
Fortum Power and Heat Oy, Kokkolan voimalaitos	211 009	165 509	45 500
Etelä-Savon Energia Oy, Pursialan Lämmitysvoimalaitos	191 527	191 527	

⁴ Lähde: EMV(2010)

Liite A: Suomen suurimmat laitoskohtaiset hiilidioksidipäästöt vuonna 2008

Laitos	Yhteensä	Fossiiliset ja mineraaliperäiset päästöt ⁵	Biomassan polttoperäiset päästöt
Tornion Voima Oy, Tornion voimalaitos	189 978	189 978	
Nokian Lämpövoima Oy, Nokian voimalaitos	184 553	184 553	
M-Real Oyj, Kyrökosken voimalaitos	182 911	182 911	
Lappeenrannan Energia Oy, Mertaniemen voimalaitos	173 292	173 292	
Kuitu Finland Oy, Säterin voimalaitos	170 029	170 029	
Fortum Power and Heat Oy, Kontiosuon voimalaitos	169 686	169 686	
Nordkalk Oyj Abp, Tytyrin kalkkitehdas	162 942	162 942	
Nordkalk Oyj Abp, Raahen kalkkitehdas	161 231	161 231	
Vattenfall Lämpö Oy, Vanajan voimalaitos	149 726	149 726	
Mäntän Energia Oy, Mäntän voimalaitos	143 182	143 182	
Mussalon Kaukolämpö Oy, Mussalo 1 -voimalaitos	139 540	139 540	
Kotkan Energia Oy, Hovinsaaren voimalaitos	129 344	129 344	
Myllykoski Paper Oy, Myllykosken paperitehdas ja voimalaitos	126 296	126 296	
Savon Sellu Oy, Savon Sellu	121 484	121 484	
Porin Prosessivoima Oy, Kaanaan voimalaitos	107 880	107 880	
SMA Mineral Oy, Röyttän kalkkitehdas	105 371	105 371	
M-Real Oyj, Simpele	104 814	104 814	

⁵ Lähde: EMV(2010)

Tekijä(t) Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen & Soile Aatos		
Nimeke Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa		
Tiivistelmä CCS-teknologia (Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi) on tehokas keino vähentää hiilidioksidipäästöjä tulevaisuudessa. VTT koordinoimassa CCS Suomi -projektissa (2008–2011) VTT ja GTK ovat tutkineet hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS) soveltamista Suomen olosuhteissa. Kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen potentiaalia on tarkasteltu sekä kansallisella energiajärjestelmätasolla että muutamiin yksittäisten esimerkkilaitosten tasolla. Suomen hiilidioksidipäästöjä on kartoitettu ja geologisia edellytyksiä hiilidioksidin varastointiin on tarkasteltu. Projektin tulosten mukaan 10–30 % Suomen hiilidioksidipäästöistä voidaan vähentää CCS-teknologian avulla vuonna 2050, mikäli päästöoikeuden hintataso nousee noin 70–90 €/t CO ₂ vuoteen 2050 mennessä. Päästövähennyksiä olisi mahdollista saada aikaan soveltamalla CCS:ää muutamaani suuriin laitoksiin. Suomen oma maankamara ei mahdollista talteen otetun hiilidioksidin pysyvää varastointia, joten valtiorajoja ylittävä kuljetus on vaatimus sovellettaessa CCS:ää Suomessa. Tulokset osoittavat, että mikäli tavoitellaan merkittäviä globaaleja (80–90 %) kasvihuonekaasupäästövähennyksiä, on CCS:n soveltamiselle mahdollisuuksia myös Suomessa. CCS-teknologioiden kaupallistumisen tärkein edellytys on sitova ja kunnianhimoinen kansainvälinen ilmastopöytäkirja. Teknologian kehittämisellä ja demonstroinnilla voidaan nopeuttaa kaupallistumista, mutta taloudelliset edellytykset syntyvät kansainvälisen yhteisymmärryksen ja ilmastopöytäkirjan myötä.		
ISBN 978-951-38-7697-5 (nid.) 978-951-38-7698-2 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 23116
Julkaisuaika Maaliskuu 2011	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 76 s. + liitt. 3 s.
Projektin nimi CCS Suomi – CCS:n soveltaminen Suomen olosuhteissa		Toimeksiantaja(t) Tekesin ClimBus-ohjelma
Avainsanat CCS, carbon dioxide, capture, storage, transport, climate change, mitigation, Finland		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374

<p>Author(s) Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen & Soile Aatos</p>		
<p>Title Application of carbon capture and storage (CCS) in Finnish conditions</p>		
<p>Abstract Carbon capture and storage (CCS) technology is an effective method for reducing carbon dioxide emissions in the future. In the VTT-coordinated project called CCS Finland (2008–2011) VTT and GTK have studied the application of CCS in Finnish conditions. Costs and the potential for reducing CO₂ emissions have been studied both on a national energy system level and an application level by a few example facilities. Finnish carbon dioxide point sources have been mapped and the geological prerequisites for storage of CO₂ have been assessed.</p> <p>According to the results from the project, Finland's carbon dioxide emissions could be reduced by 10–30% by 2050 using CCS technology, if the price for emission allowance rights rise to 70–90 €/t CO₂ by 2050. The emission reductions could be achieved by applying CCS to a few large facilities. The geological conditions in Finland do not enable permanent storage of captured carbon dioxide, making cross-border transportation a requirement for applying CCS in Finland.</p> <p>The results indicate that if significant (80–90%) global greenhouse gas emission reductions are pursued, there are possibilities for CCS applications also in Finland. The most important prerequisite for commercialisation of CCS technologies is a binding global climate agreement. Commercialisation can be accelerated by developing and demonstrating the technology, but the economical prerequisites arise from an international mutual understanding and a climate agreement.</p>		
<p>ISBN 978-951-38-7697-5 (soft back ed.) 978-951-38-7698-2 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		
<p>Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)</p>		<p>Project number 23116</p>
<p>Date March 2011</p>	<p>Language Finnish, Engl. abstr.</p>	<p>Pages 76 p. + app. 3 p.</p>
<p>Name of project CCS Suomi – Application of CCS in Finland</p>		<p>Commissioned by Tekes, ClimBus programme</p>
<p>Keywords CCS, carbon dioxide, capture, storage, transport, climate change, mitigation, Finland</p>		<p>Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374</p>

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2559 Anna Leinonen & Sirkku Kivisaari. Nanotechnology perceptions. Literature review on media coverage, public opinion and NGO perspectives. 2010. 55 p. + app. 1 p.
- 2560 Hanna Pihkola, Minna Nors, Marjukka Kujanpää, Tuomas Helin, Merja Kariniemi, Tiina Pajula, Helena Dahlbo & Sirkka Koskela. Carbon footprint and environmental impacts of print products from cradle to grave. Results from the LEADER project (Part 1). 2010. 208 p. + app. 35 p.
- 2561 Hanna Pihkola, Maija Federley, Minna Nors, Helena Dahlbo, Sirkka Koskela & Timo Jouttijärvi. Communicating environmental impacts of print products. Results from the LEADER project (Part 2). 2010. 64 p. + app. 3 p.
- 2562 Tuomo Rinne, Kati Tillander & Peter Grönberg. Data collection and analysis of evacuation situations. 2010. 46 p. + app. 92 p.
- 2563 Marja-Leena Haavisto, Kaarin Ruuhilehto & Pia Oedewald. Rautateiden liikenteen-ohjaus ratatöiden aikana ja ratatöiden hallinta. 2010. 79 s. + liitt. 7 s.
- 2564 Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen & Antti Asikainen. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. 2010. 143 s.
- 2565 Åsa Nystedt, Mari Sepponen, Seppo Teerimo, Johanna Nummelin, Mikko Virtanen & Pekka Lahti. EcoGrad. Ekotehokkaan kaupunkialueen toteuttaminen Pietarissa. 2010. 77 s. + liitt. 12 s.
- 2567 Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström. Pohja-kuonan jalostus uusiomateriaaliksi. 2010. 98 s. + liitt. 8 s.
- 2568 Katariina Palomäki. Innovatiivisen verkostoyhteistyön edellytykset turvallisuusallalla. 2011. 113 s. + liitt. 6 s.
- 2569 Asko Talja. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. 2011. 35 s. + liitt. 9 s.
- 2570 Tuomo Rinne, Peter Grönberg, Ville Heikura & Timo Loponen. Huoneistopalon sammuus vaihtoehtoisilla sammuusmenetelmillä. 2011. 80 p.
- 2571 SAFIR2010. The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2007-2010. Final Report. Puska, Eija Karita & Suolanen, Vesa (eds.) 2011. 578 p.
- 2572 Kestävän rakentamisen prosessit. Häkkinen, Tarja (toim.) 2011. 100 s. + liitt. 3 s.
- 2573 Sirje Vares, Tarja Häkkinen & Jari Shemeikka. Kestävän rakentamisen tavoitteet ja niiden toteutuminen. Espoo Suurpellon päiväkodin arvio. 2011. 48 s. + liitt. 34 s.
- 2574 Marko Jurvansuu. Roadmap to a Ubiquitous World. Where the Difference Between Real and Virtual Is Blurred. 2011. 759 p.
- 2576 Sebastian Teir, Antti Arasto, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Janne Kärki, Lauri Kujanpää, Antti Lehtilä, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa. 76 s. + liitt. 3 s.