



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

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)

**Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen,
Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen,
Janne Kärki, Matti Nieminen**

VTT

Soile Aatos

Geologian tutkimuskeskus (GTK)



ISBN 978-951-38-7324-0 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7325-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

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

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Kansikuva: Sebastian Teir

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2009

Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). [Carbon capture and storage (CCS).] Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2503. 61 s.

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

Tiivistelmä

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (*carbon capture and storage*, CCS) pidetään kansainvälisesti yhtenä merkittävimmistä tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinoista. Menetelmä perustuu hiilidioksidin talteen ottamiseen voimalaitoksissa tai teollisuuslaitoksissa, minkä jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, puristetaan kokoon ja kuljetetaan pitkäaikaiseen säilytykseen putkiston tai säiliöalusten avulla. Suuret maanalaiset geologiset muodostumat, kuten ehtyneet öljy- ja kaasukentät sekä suolavesikerrostumat, ovat lupaavimpia hiilidioksidin varastointipaikkoja, mutta jokaisen muodostuman soveltuvuus pitkäaikaiseen varastointiin on tutkittava erikseen.

CCS-teknologia perustuu osittain kemianteollisuudessa sekä öljy- ja kaasuteollisuudessa käytössä olevaan teknologiaan. Hiilidioksidia otetaan talteen ja varastoidaan jo muutamassa demonstraatioprojektissa öljy- ja kaasutuotannon yhteydessä, mutta teknologiaa ei ole vielä sovellettu kaupallisen kokoluokan voimalaitoksiin. Menetelmän erityisinä haasteina ovat suuret talteen otettavat hiilidioksidimäärät, hiilidioksidin pitkäaikaiseen varastointiin liittyvät epävarmuudet ja vastuukysymykset sekä teknologian kalleus. Tekniikan ja talouden lisäksi tarvitaankin kansainvälisten säännösten kehittämistä CCS:n laajamittaista soveltamista varten.

EU:n ilmasto- ja energiapaketin myötä kiinnostus hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin on herännyt myös Suomessa, vaikka Suomen maankamara ei olekaan geologisesti suotuisa varastointiin. CCS nähdäänkin Suomessa erityisesti teknologiaviennin mahdollisuutena. CCS:n todellinen hyöty ilmastonmuutoksen hillinnässä riippuu siitä, miten laajasti CCS-tekniikat tullaan ottamaan käyttöön maailmanlaajuisesti. Tämän tiedotteen tarkoitus on antaa yleiskäsitys CCS:stä globaalisti sekä Suomen näkökulmasta katsottuna.

Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen & Soile Aatos. Carbon capture and storage (CCS). [Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).] Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2503. 61 p.

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

Abstract

Carbon capture and storage (CCS) is internationally considered as one of the most significant future measures for reducing carbon dioxide emissions. The method is based on capture of carbon dioxide from power plants or industrial facilities, after which carbon dioxide is purified, compressed and transported by pipelines or tanker ships for long-term storage. Large underground geological formations, such as depleted oil and gas fields as well as saline aquifers, are the most promising places for storing carbon dioxide, but the suitability of each formation has to be individually determined.

Carbon capture and storage technology is partially based on existing technology used by the chemical industry as well as by the oil and gas industry. Carbon dioxide is captured and stored already in a number of demonstration projects in conjunction with oil and gas production, but the technology has not yet been implemented in commercial-scale power plants. Some of the specific challenges of the method are the large amounts of carbon dioxide that needs to be captured, uncertainties and liability issues with long-term storage of carbon dioxide, and the high level of costs for the technology. In addition to technology and economy also the development of international regulations is required for large-scale deployment of CCS.

Due to EU's climate action and renewable energy the interest in carbon capture and storage has awakened also in Finland, although Finnish geology is not favorable for storage of carbon dioxide. The development of CCS is especially seen in Finland as a possibility for export of technology. The real benefit of CCS in mitigating the climate change will depend on how widely CCS-technology is deployed world-wide. The purpose of this report is to give a general idea of CCS, both from a global and a Finnish perspective.

Alkusanat

Tämä raportti on toteutettu ”CCS Suomi – CCS:n soveltaminen Suomen olosuhteissa” -projektin puitteissa. Kyseessä on kolmevuotinen (2008–2010) tutkimusprojekti Tekesin ClimBus-ohjelmassa. Tutkimuksen suorittavat VTT ja Geologian tutkimuskeskus (GTK). Projektia rahoittavat Tekesin lisäksi Fortum Oyj, Foster Wheeler Energia Oy, Metso Power Oy, Pohjolan Voima Oy, Rautaruukki Oyj ja Vapo Oy. Projektikoordinaattorina toimii Matti Nieminen ja projektipäällikkönä Sebastian Teir. Projektin johtoryhmän puheenjohtajana toimii Joonas Rauramo ja sihteerinä Antti Arasto. Johtoryhmään kuuluvat Erkki Pisilä, Jorma Isotalo, Mikko Anttila, Arto Hotta, Pekka Sirén, Martti Korhikoski, Pia Salokoski. Johtoryhmän varajäseninä ovat toimineet Mikko Iso-Tryckäri, Jorma Kautto, Mika Timonen, Raimo Nevalainen, Kalle Nuortimo, Pentti Arhippainen, Matti Manner.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
Symboliluettelo	9
1. Johdanto	11
2. Hiilidioksidin talteenotto	14
2.1 Hiilidioksidin talteenotto energiateollisuudessa	14
2.1.1 Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista	16
2.1.2 Hiilidioksidin talteenotto polttoaineena käytettävästä kaasusta	17
2.1.3 Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla	18
2.1.4 Hiilidioksidin talteenotto biomassan polton yhteydessä	20
2.1.5 Talteenottoprosessien kehitysmahdollisuudet	20
2.2 Hiilidioksidin talteenotto prosessiteollisuudessa	21
2.3 Hiilidioksidin talteenotto polttoainejalostuksessa	22
3. Hiilidioksidin kuljetus	23
3.1 Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset	23
3.2 Talteen otetun hiilidioksidin esikäsittely	25
3.3 Laivakuljetus	26
3.4 Putkikuljetus	27
4. Hiilidioksidin varastointi	28
4.1 Geologisten varastoinnin mekanismit	29
4.2 Geologisen varastoinnin kapasiteetti	30
4.3 Muita varastointimenetelmiä	33
5. Kustannukset, suorituskyky ja kypsyyssaste	34
6. CCS ilmasto- ja energiapolitiikassa	38
6.1 Kansainväliset sopimukset	38
6.2 EU:n ilmasto- ja energiapaketti	39
6.3 Suomen ilmasto- ja energiastrategia	40

7.	Edellytyksiä CCS:n soveltamiselle.....	43
7.1	Riskienhallinta.....	43
7.2	Varastointipaikan valinta ja varaston pysyvyyden varmistaminen.....	44
7.3	CCS-projektien rahoitus.....	45
7.4	Lait ja säädökset.....	46
7.4.1	Päästökauppadirektiivin uudistus.....	46
7.4.2	Geologisen varastoinnin direktiivi.....	47
7.4.3	Lainsäädännön kehitys muualla.....	48
7.5	CCS:n julkinen hyväksyttävyyys.....	49
8.	Demonstraatioprojektit.....	50
8.1	Sleipner.....	50
8.2	Weyburn-Midale.....	52
8.3	In Salah.....	53
8.4	Snøhvit.....	53
8.5	K-12B.....	54
8.6	Ketzin.....	54
8.7	Schwarze Pumpe.....	54
8.8	Aktiviteetit Suomessa.....	55
9.	Yhteenveto.....	57
	Lähdeluettelo.....	58

Symboliluettelo

BKT	Bruttokansantuote
CCS	<i>Carbon capture and storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CDM	<i>Clean development mechanism</i> eli Kioton pöytäkirjan puhtaan kehityksen mekanismi
CFB	<i>Circulating fluidized bed</i> eli kiertoleijupeti
CLC	<i>Chemical looping combustion</i> eli hapen kantajiin perustuva poltto
EU ETS	<i>European Union emission trading scheme</i> eli EU:n päästökauppajärjestelmä
JI	<i>Joint implementation</i> eli Kioton pöytäkirjan yhteistoteutusmekanismi
CSLF	<i>Carbon sequestration leadership forum</i>
DOE	<i>Department of Energy</i> eli Yhdysvaltojen energiaministeriö
EOR	<i>Enhanced oil recovery</i> eli tehostettu öljyntuotanto
Gt	Miljardi tonnia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGCC	<i>Integrated gasification combined cycle</i> eli kaasutuskombivoimalaitos
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> eli hallitusten välinen ilmastopaneeli
Mt	Miljoona tonnia
MEA	Monoetanoliamiini
MWe	Miljoona wattia sähkötehona
MWth	Miljoona wattia lämpötehona
NAP	<i>National allocation plan</i> eli EU:n päästökaupan kansallinen jakosuunnitelma
NOx	Typpioksidiyhdiste

OSPAR	Koillis-Atlantin merellisen ympäristön suojelua koskeva yleissopimus
RGGI	<i>Regional greenhouse gas initiative</i>
SO _x	Rikkioksidiyhdiste
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
UNCLOS	Yhdistyneiden kansakuntien merioikeusyleissopimus
UNFCCC	<i>United Nations framework convention on climate change</i> eli Yhdistyneiden kansakuntien ilmastonmuutoskonventti
USD	Yhdysvaltain dollari
WWF	Maailman luonnonsäätiö

1. Johdanto

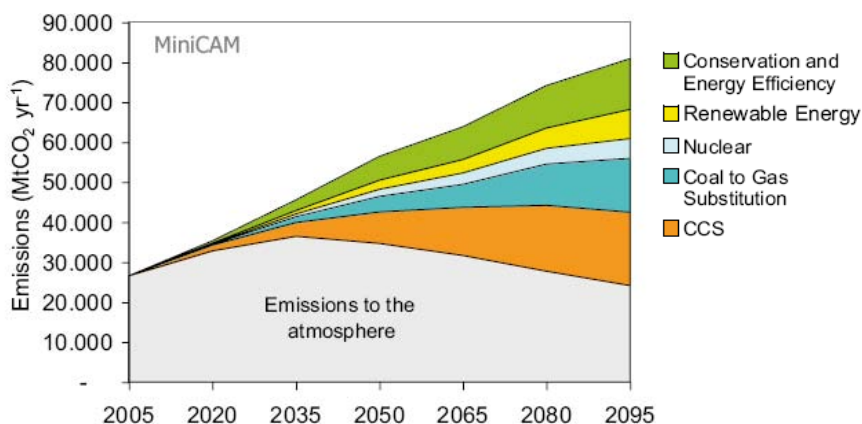
Ilmastonmuutoksen hillintää pidetään yleisesti yhtenä aikakautemme suurimmista haasteista. Tutkimusten mukaan ilmastonmuutos lisää muun muassa rankkasateita, tulvia, kuivuutta, nälänhätää ja pakolaisuutta, mutta tarkkoja vaikutuksia ei kukaan osaa arvioida. Vaikutukset tulevat olemaan kuitenkin sitä pienempiä, mitä enemmän ja nopeammin onnistumme vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. Yleisesti ollaan valmiita ottamaan riski, jossa rajoitetaan ilmakehän keskilämpötilan nousu 2 °C:seen esiteolliseen aikaan verrattuna. Näinkin pieni muutos aiheuttanee merkittäviä vaikutuksia elinympäristöömme, mutta edes tähän tavoitteeseen pääseminen näyttää nykykeinoin erittäin haasteelliselta: kasvihuonekaasupäästöjen olisi vähennyttävä 50–80 %:lla vuoden 2000 tasosta vuoteen 2050 mennessä (IPCC 2007).

Toisaalta muutokset ilmakehässä ovat hyvin hitaita prosesseja, ja päästöjen leikkauksen jälkeenkin ilmakehä lämpenee vielä pitkään. Näin ollen toimenpiteisiin tulisi ryhtyä välittömästi riskien minimoimiseksi. Arvostetun ns. Sternin raportin (Stern 2007) mukaan nykyinen ilmastonmuutoksen aiheuttamat kustannukset tulisivat olemaan 5–20 % globaalista BKT:stä vuosittain, kun taas ilmastonmuutoksen hillinnän kustannukset jäisivät 1–2 %:iin globaalista BKT:stä, mikäli toimenpiteisiin tartuttaisiin maailmanlaajuisesti ja riittävän nopeasti. On selvää, että sekä toimimattomuuden että ilmastopolitiikan kustannusten arviointiin liittyy hyvin merkittäviä epävarmuuksia, koska esimerkiksi eri teknologioiden kehittyminen vaikuttaa päästövähennysten optimaaliseen ajoitukseen.

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (*carbon capture and storage, CCS*) pidetään yhtenä merkittävimmistä tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinoista, ja siksi se on laajan tutkimuksen kohteena maailmanlaajuisesti. Tekniikka perustuu hiilidioksidin talteen ottamiseen suurissa pistelähteissä, kuten teollisuuslaitoksissa ja voimalaitoksissa, minkä jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, puristetaan kokoon ja kuljetetaan pitkäaikaiseen säilytykseen. Tekniikka

1. Johdanto

perustuu osittain kemianteollisuudessa sekä öljy- ja kaasuteollisuudessa käytössä olevaan teknologiaan mutta vaatii vielä kehitystyötä ennen kuin sitä voitaisiin soveltaa täyden kokoluokan voimalaitoksissa. Oman haasteensa tuottaa talteen otettavan hiilidioksidin suuri määrä, joka vaatii energianintensiivisiä talteenotto-prosesseja ja siten huonontaa esimerkiksi voimalaitosten hyötysuhteita huomattavasti. Myöskään hiilidioksidin pitkäaikainen varastointi ei ole yksinkertaista. Tekniikan lisäksi vaaditaan kansainvälisiä säännöstyöjä CCS:n soveltamista varten.



Kuva 1. Skenaario globaalien hiilidioksidipäästöjen kasvusta ja niiden vähentämisestä eri menetelmillä (IPCC 2005).

Maailma on riippuvainen vielä pitkään fossiilisten polttoaineiden käytöstä, ja sen takia on hyvin haasteellista vähentää kasvihuonekaasupäästöjä riittävästi ilman CCS:n käyttöönottoa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö lisääntyy jatkuvasti, etenkin Aasian kehittyvissä talouksissa, eikä muutosta kehitykseen ole näkyvissä lähivuosikymmeninä. VTT on arvioinut, että nykykehityksellä maailman fossiilisten polttoaineiden käyttö tulisi lisääntymään noin 50 %:lla vuoden 2005 tasosta vuoteen 2050 mennessä (Koljonen et al. 2008 ja 2009). IPCC (2005), samoin kuin VTT, on vastaavasti arvioinut hiilidioksidipäästöjen jatkavan kasvuaan tämän vuosisadan aikana, mikäli siihen ei puututa poliittisella ohjauksella, sekä laskenut eri päästövähennysmenetelmien potentiaalia vähentää hiilidioksidipäästöjä (Kuva 1). Tulokset ovat näyttäneet, että ei ole olemassa yksittäistä menetelmää, jolla päästöt saataisiin kuriin, vaan kaikki mahdolliset menetelmät, kuten energian säästäminen ja energiatehokkuuden lisääminen, vähähiilisiin polttoaineisiin siirtyminen, ydinvoiman ja uusiutuvan energian lisääminen sekä CCS, on

otettava käyttöön. Lisäksi olisi lisättävä metsitystä sekä vähennettävä maatalouden, teollisuuden ja jätehuollon kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä. Näistä menetelmistä CCS:llä vaikuttaa olevan suurin potentiaali energiasektorin hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä tämän vuosisadan aikana.

Suomessa CCS on ollut mukana ilmastonmuutoksen hillintää koskevissa keskusteluissa 90-luvulta lähtien, mutta kiinnostus siihen on ollut vähäistä kalliiden kustannusten ja Suomen varastoinnin kannalta epäsuotuisan geologian takia. Lisäksi erityisesti Suomessa on mahdollista korvata merkittävä osa fossiilisista polttoaineista bioenergialla, joka lasketaan ns. hiilineutraaliksi tavaksi tuottaa energiaa. Ilmastonmuutoksen kansainvälisen tunnustamisen myötä ja EU:n kunnianhimoisten päästövähennystavoitteiden takia kiinnostus CCS:ää kohtaan on lisääntynyt. Suomelle CCS toisi myös uusia mahdollisuuksia teknologiavientiin. Tämän tiedotteen tarkoituksena on antaa käsitys siitä, mikä on CCS:n nykytila ja miten sitä voitaisiin soveltaa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä.

2. Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenoton tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman puhdas hiilidioksidivirta, joka sopii kuljetettavaksi ja varastoitavaksi. Vaikka savukaasua voitaisiin teoriassa varastoida sellaisenaan geologisiin muodostumiin, se ei ole suurten kaasumäärien takia käytännöllistä. Tyypillisesti savukaasussa on hiilidioksidia ainoastaan 3–15 %. Tällä hetkellä hiilidioksidia erotetaan isoissa teollisuussovellutuksissa, jollaisia ovat esimerkiksi maakaasun esikäsittely ja ammoniakkin valmistus, ja lisäksi hiilidioksidin valmistukseen tähtäävissä prosesseissa.

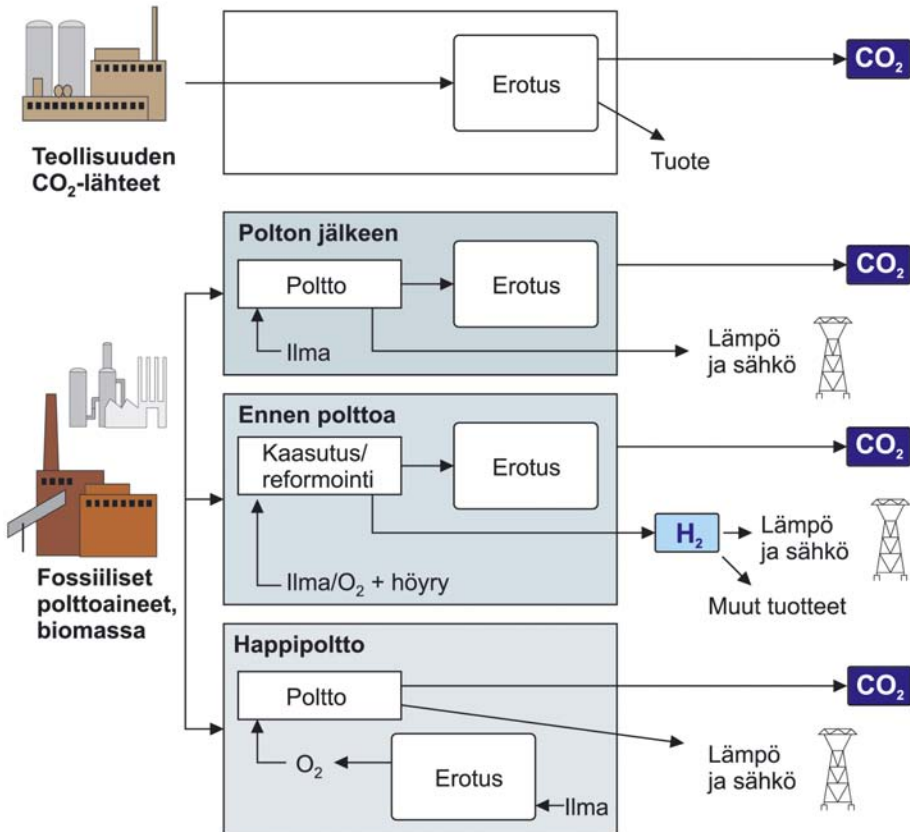
Hiilidioksidia käytetään muun muassa paperimassan käsittelyssä, kasvihuoneissa, pH:n säätöä varten teollisuusprosesseissa, virvoitusjuomateollisuudessa sekä kylmäaineena ja hitsauksen sekä elintarvikepakkausten suojakaasuna. Suomessa hiilidioksidin hyötykäyttöpotentiaali on kuitenkin alle yksi prosentti koko maan vuotuisista hiilidioksidipäästöistä, ja suurimmassa osassa hiilidioksidin käyttösovellutuksista hiilidioksidi päätyy takaisin ilmakehään. Tähän asti hiilidioksidin talteenottoa voimalaitoksissa on sovellettu ainoastaan yksittäisissä demonstraatiolaitoksissa ja suhteellisen pienessä mittakaavassa menetelmän testaamiseksi. Eri talteenottomenetelmiä kuitenkin kehitetään. Päämääränä on ottaa talteen pääosa voimalaitoksen tuottamasta hiilidioksidista. Suurin tekninen haaste on vähentää talteenotto-prosessien energian käyttöä, joka muodostaa suurimman osan CCS-ketjun kustannuksista.

2.1 Hiilidioksidin talteenotto energiateollisuudessa

Maa-ilmallaajuiset hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2005 26,3 Gt¹ (IEA 2007), mikä on 13 % enemmän kuin vuonna 2000. Sähkön- ja lämmöntuotannon osuus

¹ 1 Gt = 1000 Mt = 1 000 000 kt = 1 000 000 000 t

hiilidioksidipäästöistä oli 9,6 Gt. CCS-sovellutusten kehittäminen on keskittynyt pääasiassa fossiilisia polttoaineita käyttäville voimalaitoksille, koska nämä tuottavat suurimman osan energiasektorin hiilidioksidipäästöistä.



Kuva 2. Periaatekuva hiilidioksidin erotuksesta teollisuudessa sekä energiantuotannossa polton jälkeen, ennen polttoa ja happipoltossa (IPCC 2005).

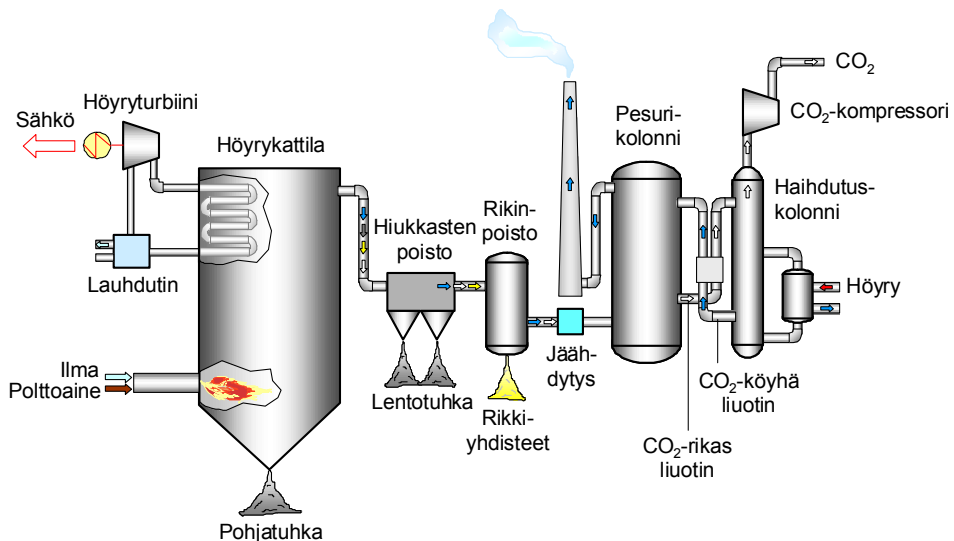
Nykytekniikalla hiilidioksidia voidaan erottaa kolmella eri tavalla riippuen prosessista tai voimalaitossovellutuksesta (Kuva 2): talteenotto savukaasuista, talteenotto ennen polttoa tai talteenotto happipolton avulla. Nämä vaihtoehdot perustuvat pitkälti kemianteollisuudessa jo käytössä oleviin tekniikoihin. Näiden lisäksi on kehitteillä uusia, erityisesti CCS-tarkoituksiin suunniteltuja menetelmiä, kuten hapen kantajiin perustuvaa polttoa (katso luku 2.1.5). Kaikki vaihtoehdot vaativat kuitenkin paljon energiaa, joten talteenottomenetelmä on valittava

2. Hiilidioksidin talteenotto

tapauskohtaisesti. On arvioitu, että hiilidioksidin erotuksen takia polttoainekulutus lisääntyisi 10–40 % ja sähkötuotannon kustannukset nousisivat 20–90 %, riippuen talteenotto-prosessista sekä polttoaineen hinnasta (IPCC 2005).

2.1.1 Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista

Talteenotossa savukaasuista (*post-combustion capture*) hiilidioksidi erotetaan konventionaalisen kivihiilen, maakaasun tai biomassan polton savukaasuista, joissa CO₂-pitoisuus on luokkaa 3–15 vol-%. Yleisimmin erottamiseen on suunniteltu käytettäväksi kemiallisia liuottimia, kuten monoetanoliamiineja (MEA), joka absorboivat ja myöhemmin prosessissa vapauttavat CO₂:a tuottaen puhtaan CO₂-virran edelleen paineistettavaksi ja varastoitavaksi (Kuva 3). Ennen erotusta savukaasusta on poistettava hiukkaset ja happamat komponentit, tyypillisesti NO_x ja SO_x, jotka muuten hajottaisivat liuottimen. Liuotin absorboi CO₂:n savukaasusta pesurikolonissa, josta neste johdetaan haihdutuskoloniin. Haihdutuskolonissa liuottimen CO₂ erotetaan kaasumaiseksi joko lämmittämällä tai painetta muuttamalla tai molemmilla. Liuottimen regeneroinnin jälkeen se johdetaan takaisin CO₂:n erotuspesuriin.



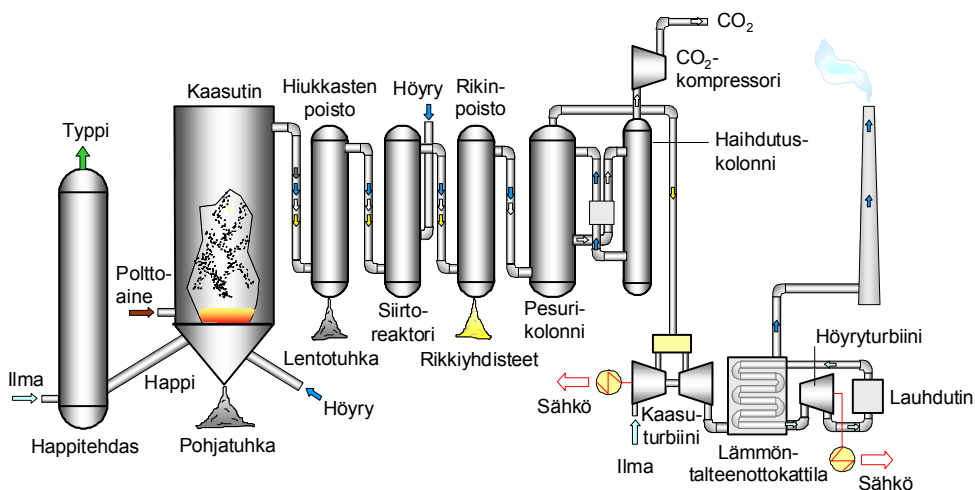
Kuva 3. Liuottimeen perustuva hiilidioksidin talteenotto savukaasuista.

Suurin etu hiilidioksidin erottamisessa suoraan savukaasuista on sen soveltuvuus suurimpaan osaan olemassa olevia fossiilisia polttoaineita käyttäviä voimaloita.

Hiilidioksidin matala osapaine kaasussa asettaa kuitenkin suuret vaatimukset absorboivalle liuottimelle. Nykyisin käytössä olevien liuottimien regenerointi vaatii paljon lämpöä, mikä huonontaa merkittävästi voimalaitoksen hyötysuhdetta. Tekniikka, jota käytetään hiilidioksidin poistamiseksi liuottimella suoraan savukaasuista, on kaupallinen (ollut käytössä teollisuuden hiilidioksidituotannossa ja maakaasun valmistuksessa jo yli 60 vuotta). Se kuitenkin vaatii merkittävää kokoluokan kasvattamista soveltuakseen käytettäväksi sähkön tuotannon mittakaavassa (500 MWe), jossa savukaasumäärät ovat nykyisiin sovelluksiin verrattuna moninkertaiset.

2.1.2 Hiilidioksidin talteenotto polttoaineena käytettävästä kaasusta

Hiilidioksidi voidaan ottaa talteen polttoaineesta myös ennen polttamista (*pre-combustion capture*) (Kuva 4). Konseptia voidaan käyttää maakaasuvoimalaitoksissa tai kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kaasutuksen yhteydessä. Polttoaineen kaasutuksella muutetaan kiinteä polttoaine polttokaasuseokseksi, jonka pääkomponentit ovat vety, hiilimonoksidi ja hiilidioksidi. Polttokaasusta täytyy normaalisti erottaa laitteille ja/tai ympäristölle haitalliset komponentit, kuten rikkiyhdisteet, ammoniakki ja vetysyanidi. Puhdistettu tuotekaasu voidaan hyödyntää esimerkiksi IGCC-voimalaitoksissa (*integrated gasification combined cycle*).



Kuva 4. Hiilidioksidin talteenotto polttokaasusta IGCC-voimalaitoksessa.

2. Hiilidioksidin täytteenotto

Hiilidioksidin poistoa varten tuotekaasu käsitellään vesikaasun siirtoreaktion avulla, jolloin tuotekaasu reagoi höyryn tai happi-höyrysekoituksen kanssa muodostaen lähinnä vedystä ja hiilidioksidista koostuvaa kaasua. Hiilidioksidin suhteellisen korkean osapaineen takia hiilidioksidia voidaan erottaa kaasuvirrasta liuoksilla, jotka perustuvat joko fysikaaliseen² absorptioon tai seosabsorptioon (sekä fysikaaliseen että kemialliseen absorptioon). Molemmat erotustavat ovat kaupallisia tekniikoita. Erotettu CO₂ kuivataan ja kompressoidaan kuljetusta ja varastointia varten. Vetyrikas polttokaasu johdetaan kaasuturbiinille polttoa varten. Osa vedystä voitaisiin myös hyödyntää esimerkiksi polttokennosovelluksissa tai kemianteollisuudessa.

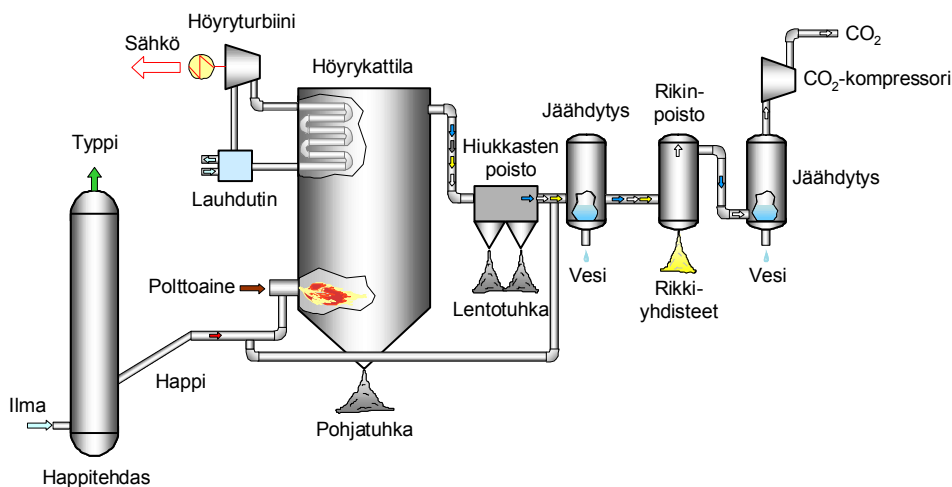
Vaikka polttoaineen käsittelyvaiheet ovat monimutkaisempia ja kalliimpia kuin suorassa CO₂:n erotuksessa savukaasusta, on itse CO₂:n erotus edullisempaa, kun erotettavan CO₂:n pitoisuus on suurempi (15–60 vol-%) ja kaasu paineinen. Tällä hetkellä CO₂:n erotusta polttokaasusta hyödynnetään vedyn laajamittaisessa teollisessa valmistuksessa. Esimerkiksi Neste Oilin Kilpilahden jalostamolla CO₂-erotuslaitos on integroitu vedyn valmistukseen maakaasusta. Voimantuotannossa on käytössä hyvin vähän kaasutuslaitoksia, joten tekniikkaa voitaisiin soveltaa lähinnä uusiin laitoksiin. Kaupallistumisen esteenä ovat samat ongelmat kuin kaasutustekniikassakin (IGCC), kuten alhainen käytettävyys, suuret tekniset vaatimukset ja korkeat kustannukset.

2.1.3 Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla

Happipolttoon perustuvassa hiilidioksidin erotuksessa polttoaine poltetaan lähes puhtaan hapen ja kierrätetyn savukaasun seoksessa, jolloin savukaasuissa ei ole polttoilman mukana tullutta typpeä. Tällöin savukaasun CO₂-pitoisuus on suuri (luokkaa 80–95 vol-%, kuiva) ja sen erottaminen on helpompaa ja vähemmän energiaa kuluttavaa. Happipolttovoimala muodostuu happitehtaasta, itse voimalaitoksesta ja CO₂:n käsittely-yksiköstä (Kuva 5), jossa vesihöyry, happi ja muut epäpuhtaudet poistetaan pääasiassa kompressoinnin ja jäähdytyksen avulla.

² Fysikaalisessa absorptiossa CO₂ sitoutuu liuottimeen korkeassa paineessa ja vapautuu, kun paine laskee. Fysikaalisessa absorptiossa tapahtuva sidos on heikompi kuin kemiallisessa absorptiossa.

Happitehdas ja hiilidioksidin käsittely-yksikkö lisäävät voimalaitoksen oma-käyttötehoa, mikä huonontaa sähköntuotannon hyötysuhdetta noin 7–12 prosenttiyksikköä verrattuna konventionaaliseen voimalaitokseen. Happipolttovoimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseksi kehitetään vähemmän energiaa kuluttavia hapentuotantoprosesseja (esim. membraanit) sekä tarkastellaan mahdollisuuksia prosessi-integrointiin ja -optimointiin happitehtaan, voimalaitoksen ja hiilidioksidin käsittely-yksiköiden välillä. Happipolttotekniikka on tällä hetkellä demonstrointivaiheessa (kymmenien megawattien kokoluokassa, esim. 30 MW_{th}:n happipolttovoimalaitos Schwarze Pumpeissa, Saksassa), ja selvitysten perusteella se lienee kilpailukykyinen suhteessa muihin CCS-tekniikoihin. Tekniikkaa voidaan soveltaa sekä uusiin että tietyin varauksin olemassa oleviin voimalaitoksiin. Uusi voimalaitos voidaan myös suunnitella niin, että sitä voidaan käyttää sekä happipolttolaitoksena hiilidioksidin talteenotolla että perinteisenä ilmapolttoisen voimalaitoksena.



Kuva 5. Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla.

Happipoltto soveltuu myös kiertoleijupolttotekniikkaan, jota on kehitetty erityisesti Suomessa. Kiertoleijukattilan tulipesään muodostuu kiertävän kiintoaineen takia tasainen lämpötilaprofiili, jonka ansiosta voidaan käyttää myös suurempia happipitoisuuksia. Suuremmilla happipitoisuuksilla kattila voidaan mitoittaa fyysisesti pienemmäksi ja säästää siten materiaalikustannuksissa. Suomella on erityisen vahva asema leijupoltossa, koska sen kehitys on kahden suuren kattilavalmistajien ansiosta keskittynyt Suomeen. VTT:llä on koeympäristöt leijupol-

2. Hiilidioksidin täytteenotto

ton tutkimiseen ja kehittämiseen happipoltossa. Todennäköisesti maailman ensimmäinen onnistunut happipolton demonstrointi kiertoleijuolosuhteissa (~100 kWth) tehtiin VTT:llä Jyväskylässä 2005.

2.1.4 Hiilidioksidin talteenotto biomassan polton yhteydessä

Periaatteessa olisi mahdollista soveltaa hiilidioksidin talteenottoa myös biomassaa polttaville voimalaitoksille. Koska biomassaa sitoo hiilidioksidia yhteyttämisessä, saataisiin biomassa-CCS-yhdistelmästä aikaan negatiiviset CO₂-päästöt elinkaarta ajatellen, eli ilmakehästä poistettaisiin hiilidioksidia. Samat hiilidioksidin talteenottotekniikat, joita käytetään fossiilisten polttoaineiden yhteydessä, voisivat olla sovellettavissa myös biomassan polttoon.

Käytännössä suurin osa nykyisistä biomassavoimalaitoksista on kuitenkin sen verran pieniä, että CCS:n soveltaminen niihin olisi vielä kalliimpaa kuin fossiilista polttoainetta käyttäville laitoksille. Sen sijaan seospoltossa, jossa polttoaineena käytetään sekä biomassaa että fossiilista polttoainetta, talteenotto olisi helpompi toteuttaa. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole mitään taloudellisia kannustimia sille, miksi biomassaa polttavien voimalaitosten kannattaisi soveltaa hiilidioksidin talteenottoa. Esimerkiksi nykyinen päästökauppajärjestelmä ei vielä ota huomioon ns. negatiivisia päästöjä.

2.1.5 Talteenottoprosessien kehitysmahdollisuudet

Useat innovaatiot ovat osoittaneet merkittävää potentiaalia talteenoton kustannusten pienentämiseen nykyisiin tekniikoihin verrattuna. Nämä uudet tekniikat ovat vielä kehitysasteella, osa hyvinkin kaukana kaupallistamisesta.

Hiilidioksidin erotustekniikan kehitystyö on keskittynyt etsimään keinoja energia- ja kustannustehokkaaseen CO₂:n erottamiseen savukaasuista. Kehittyvät erotustekniikat perustuvat kiintoainesorbentteihin, membraaneihin tai muihin (ei-kaupallisiin) nestemäisiin liuottimiin, kuten ammoniakkiin ja karbonaattien vesiliuoksiin. Muita lupaavia mutta suhteellisen varhaisen kehitysvaiheen erotusmenetelmiä ovat tekniikat, jotka perustuvat metalliorgaanisiin materiaaleihin, entsyymaattisiin membraaneihin ja biologisiin prosesseihin.

Polttokaasuista (ennen polttoa) erottamisen tekniikoiden kehitys on painottunut tekniikoihin, jotka luontaisesti tuottavat suuren pitoisuuden tai paineisen CO₂-virran, joista CO₂:n erottamiseen on olemassa valmiita tekniikoita. Erityisesti IGCC-tekniikkaa ja siihen CO₂:n erottamisen yhdistämistä koskevaa tutki-

musta on paljon. Myös polymeeripohjaisia membraaneja ja sorbentteja kehitetään vaihtoehtoisena menetelmänä CO₂:n erottamiseksi polttoainekaasusta.

Hapenvalmistuksen kustannusten pienentäminen yksikkökokoja kasvattamalla ja prosessia tehostamalla on jatkunut pitkään. Hapenvalmistuksen kehityksellä on erittäin suuri merkitys erityisesti happipoltossa, koska nykytekniikalla (kryogeeninen) se vaikuttaa huomattavasti laitoksen investointikustannuksiin (n. 30 %) ja hyötysuhteeseen (vähenemä n. 4–7 %-yksikköä).

Hapen kantajiin perustuva poltto (CLC, *chemical looping combustion*) on CCS:ään soveltuva konsepti, joka saattaa tulla huomattavasti edullisemmaksi verrattuna nykyisiin CO₂:n talteenottomenetelmiin. Yksinkertaistettuna CLC-prosessi on verrattavissa happipolttoon, jossa kryogeeninen happitehdas korvataan hapenkantajapartikkeleita sisältävällä hapetusreaktorilla. CLC:n ideana on jakaa polttoaineen polttaminen kahteen toisistaan erilliseen hapetus- ja pelkistysreaktioon erillisissä reaktoreissa hapenkuljetusmateriaalin avulla. Jakamalla palaminen kahteen toisistaan kaasulukoilla erotettuihin reaktoreihin saadaan aikaiseksi tytetön savukaasuvirta, joka on lähes puhdas CO₂:n ja H₂O:n seos. Siitä hiilidioksidi olisi helppo erottaa. CLC-prosessin hapetus- ja pelkistysreaktorit voisivat olla rakenteeltaan leijupetireaktoreita. Leijupetiteknologiaan perustuvan CLC:n kehittämisessä voitaisiin hyödyntää Suomen vahvaa osaamista.

2.2 Hiilidioksidin talteenotto prosessiteollisuudessa

Vuonna 2005 teollisuus vastasi melkein kolmasosasta maailman primäärienergian käytöstä. Suorat ja epäsuorat hiilidioksidipäästöt olivat 9,9 Gt eli 37 % maailman hiilidioksidipäästöistä (IEA 2008a). Suorista päästöistä (6,7 Gt) terästeollisuus vastasi 30 %:sta, mineraaliteollisuus (lähinnä sementtiteollisuus) 26 %:sta ja kemia- sekä petrokemiateollisuus 16 % päästöistä. Teollisuuden prosessikaasuissa on usein suuri hiilidioksidipitoisuus, minkä takia hiilidioksidi olisi helpompi erottaa niistä kuin energialaitosten savukaasuista. Koska suuria yksiköitä on kuitenkin vähän suhteessa voimalaitosten määrään, käytännöllinen soveltamispotentiaali on pienempi.

Terästeollisuudessa on useita mahdollisia tekniikoita hiilidioksidin talteenottamiseksi. Savukaasuista pesurilla tapahtuvan talteenoton lisäksi yksi tällainen on happimasuuni. Sementtiteollisuudessa voitaisiin erottaa kalkinpoltoissa syntyvä hiilidioksidi vastaavilla menetelmillä kuin voimalaitoksissa, mutta tämä nostaisi sementin hintaa 40–90 % (IEA 2008b). Ammoniakin tuotannossa erotetaan jo hiilidioksidia. Osa tästä käytetään urean valmistukseen, mutta hyödyntämättä

2. Hiilidioksidin täytteenotto

jää vuosittain noin 180 Mt CO₂ maailmanlaajuisesti. Myös paperi- ja massateollisuudessa olisi mahdollista soveltaa CCS:ää, mutta polttoaineiden suuren biomassaosuuden takia tätä vaihtoehtoa on tutkittu hyvin vähän. Hiilidioksidia erotetaan myös muun muassa vedyn ja joidenkin kemikaalien (esim. kalsiumkloridin) valmistuksen yhteydessä sekä juomateollisuudessa.

2.3 Hiilidioksidin talteenotto polttoainejalostuksessa

Öljyn, kaasun ja kivihiilen tuotannosta syntyy vuosittain noin 400 Mt hiilidioksidipäästöjä. Sen lisäksi öljyn ja kaasun jalostuksesta syntyy vuosittain noin 700 Mt hiilidioksidipäästöjä. Huonolaatuisten raakaöljyjen lisääntyneestä tuotannosta johtuen nämä päästöt lisääntyvät lähivuosina (IEA 2008a).

Monet polttoainejalostusprosessit soveltuisivat hyvin hiilidioksidin talteenottoon. Tähän asti CCS:ää on sovellettu ainoastaan maakaasutuotannon yhteydessä, jossa hiilidioksidia poistetaan maakaasun puhdistamiseksi (katso luku 8). Myös Fischer-Tropsch-dieselin valmistuksen yhteydessä voitaisiin soveltaa CCS:ää, koska jalostusprosessissa syntyy suuria hiilidioksidipitoisuuksia sisältäviä sivuvirtoja, joista CO₂ olisi huomattavasti halvempaa ja helpompaa ottaa talteen kuin voimalaitosten savukaasuista. Myös tavanomaisissa öljynjalostamoissa syntyy sivutuotteina hiilidioksidivirtoja, joita jo monessa jalostamoissa otetaan talteen, puhdistetaan ja myydään teollista käyttöä varten.

Hiilidioksidin talteenottoa voitaisiin soveltaa myös muiden biopolttoaineiden jalostamisprosesseihin, sillä hiilidioksidia syntyy niissä sivutuotteena. Mikäli EU:n tavoite lisätä biopolttoaineiden käyttöä toteutuu, Euroopan tulevat biopolttojalostamot synnyttäisivät jo vuonna 2020 muutamia kymmeniä miljoonia tonneja CO₂:a.

3. Hiilidioksidin kuljetus

Hiilidioksidin kuljetusta tarvitaan, ellei varastointiin sopivaa geologista muodostumaa sijaitse talteenottolaitoksen läheisyydessä. Kuljetus kaasuputkia pitkin on kaupallista teknologiaa ja tavallisin menetelmä hiilidioksidin kuljettamisessa. Yhdysvalloissa kuljetetaan vuosittain 40 Mt CO₂:a hiipuvien öljykenttien öljyntuotannon tehostamiseen (*enhanced oil recovery*, EOR). Hiilidioksidia voidaan myös kuljettaa nesteinä laivoilla, junilla tai kuorma-autoilla lämpöeristetyissä tankeissa, missä lämpötila on huonelämpötilaa alhaisempi ja paine huomattavasti matalampi kuin putkikuljetuksessa. Täyden mittakaavan CCS-hankkeelle varteenotettavimmat logistiset vaihtoehdot ovat kuitenkin putkikuljetus ja/tai laivakuljetus. Polttoprosessista talteen otetussa CO₂:ssa on aina muista yhdisteistä koostuvia epäpuhtauksia, jotka on poistettava tai joiden määrää on vähennettävä ennen kuljetusta.

3.1 Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset

Talteen otetun hiilidioksidin laatuvaatimukset riippuvat sekä kuljetusmuodosta että varastointitavasta, joten tarkat raja-arvot tulee selvittää tapauskohtaisesti. Suuntaa antavia suosituksia laatuvaatimuksiksi voidaan kuitenkin antaa. Taulukko 1 on listattu suositukset CO₂:n laadulle kuljetus- ja varastointitavan mukaan. Lukemat perustuvat kirjallisuudessa esitettyihin suosituksiin sekä EOR-toiminnassa esiintyviin vaatimuksiin.

Hiilidioksidiin seostunut vesi aiheuttaa korroosiota, jään ja hydraattien muodostumista sekä vähimmäissekoittumispaineen kasvua EOR-hyötykäytössä. Rikin ja typen oksidit sekä H₂S nostavat myös hiilidioksidin sekoittumispainetta suolavesikerrostumassa tai öljyesiintymässä, ovat terveydelle haitallisia sekä aiheuttavat happamuuden muutosta öljyesiintymässä, mikä voi vaikuttaa EOR-

3. Hiilidioksidin kuljetus

hyötykäytön kustannustehokkuuteen porauskaluston lisääntyvien korroosiokes-
tovaatimusten myötä.

Taulukko 1. Suosituksia CO₂:n puhtaudelle kuljetus- ja varastoititavan perusteella (de Visser et al. 2008, Aspelund & Jordal, 2007, de Visser & Hendriks, 2009).

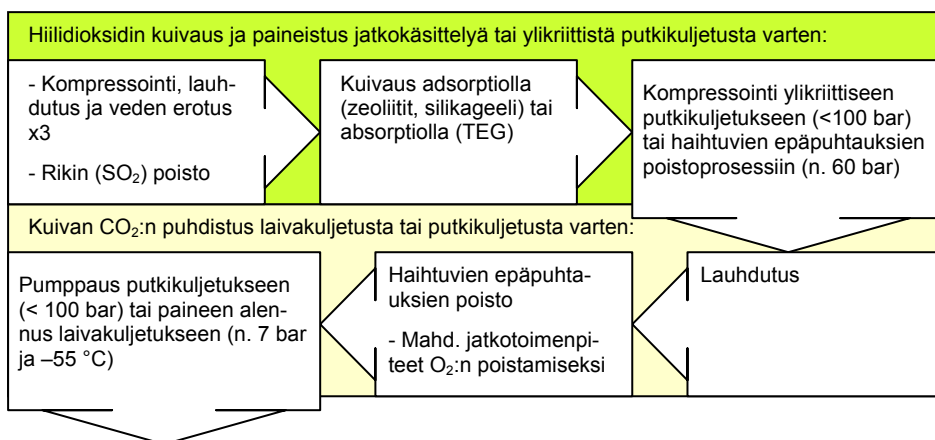
		Laatusuositus	Putkikuljetus	Laivakuljetus	Varastointi	EOB
Vesi	H ₂ O	< 20–500 ppm	500 ppm	50 ppm	–	< 20 ppm
Haihtu- vat yhdis- teet	N ₂	< 300 ppm (EOB) – 4 % (kaikki haihtuvat)	< 4 % (kaikki haihtuvat)	< 0,2–0,5 % (kaikki haihtu- vat)	< 4 % (kaikki haihtuvat)	< 300–4800 ppm
	O ₂	< 100 ppm (EOB) – 4 % (kaikki haihtuvat)				< 100–1000 ppm
	Ar	< 0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				–
	H ₂	< 0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				–
	CH ₄	< 0,2–4 % (kaikki haihtuvat)				< 2 %
Haitalli- set yhdis- teet	H ₂ S	< 200–9000 ppm	200 ppm	200 ppm	–	< 1500– 9000 ppm
	CO	< 10–2000 ppm	2000 ppm	2000 ppm	–	< 10–1000 ppm
Rikin ja typen oksidit	NO _x	< 50–100 ppm	100 ppm	100 ppm	–	< 50 ppm
	SO ₂	< 10–100 ppm	100 ppm	100 ppm	–	< 10 ppm
Hiilidi- oksidi	CO ₂	> 95,5–99,5 %	> 95,5 %	> 99,5 %	> 95,5 %	> 95,5 %

Vety (H₂), typpi (N₂) ja argon (Ar), happi (O₂), hiilimonoksidi (CO) ja metaani (CH₄) on poistettava CO₂:sta laivakuljetusta varten, jotta hydraatteja ei muodostuisi alhaisessa lämpötilassa. Putkikuljetuksessa kyseiset epäpuhtaudet eivät tuottane toiminnallisia vaikeuksia tai ympäristöongelmia, mutta niiden poistaminen voi olla mielekästä käsiteltävän kaasuvirran määrän ja kompressointityön vähentämiseksi. Kyseiset yhdisteet hiilidioksidiin seostuneina lisäävät kuljetuksessa ja varastoinnissa tarvittavan kompressointityön määrää usealla tavalla. Ensinnäkin epäpuhtaudet nostavat hiilidioksidin nestemäisen ja ylikriittisen tilan painetta. Toiseksi epäpuhtaudet lisäävät kompressointityötä, jota vaaditaan kaasun paineen nostamiseksi. Kolmanneksi epäpuhtaudet vaativat suurempaa painetta varastoinnissa heikentyneen sekoittumispaineen myötä. Varsinkin vety lisää kompressointityöntarvetta putkikuljetuksessa (de Visser et al. 2008).

3.2 Talteen otetun hiilidioksidin esikäsittely

Teknisten ongelmien ja turvallisuusriskien välttämiseksi talteen otettu CO₂ puhdistetaan ennen kuljetusta. Hiilidioksidi muunnetaan esikäsittelyn aikana kuljetustavan vaatimaan lämpötilaan ja paineeseen. Kaasumaisella ja superkriittisellä alueella paineistus tehdään välijäähdytetysti vaiheittain kompressoreilla. Nestemäinen CO₂ puolestaan pumpataan putkikuljetuksen edellyttämään paineeseen. CO₂:n esikäsittely on pääpiirteittäin esitettyä Kuva 6.

Vesiliukoiset rikkiyhdisteet, lähinnä SO₂, poistetaan käsiteltävästä kaasusta vesipesulla paineennoston alussa (Pipitone & Bolland 2009). Kaasuun sekoittunut vapaa vesi poistetaan myös paineennoston aikana välijäähdyttimien jälkeisissä erottimissa. Tämä on välttämätöntä korroosion hallitsemiseksi sekä hydraattien ja jään muodostumisen estämiseksi alhaisissa lämpötiloissa. Laivakuljetuksen tai EOR-hyötykäytön kuivuusvaatimukset saavutetaan adsorptio- tai absorptiokuivauksella ennen viimeistä kompressorivaihetta (n. 20–30 bar:n paineessa). Jos kaasu täyttää putkikuljetuksen ja varastoinnin asettamat laatuvaatimukset, voidaan viimeisellä kompressorilla nostaa hiilidioksidin paine suoraan ylikriittiselle alueelle, jolloin CO₂ on valmis putkilinjaan syötettäväksi.



Kuva 6. CO₂:n esikäsittely kuljetusta ja varastointia varten.

Jos kuivattuun CO₂-kaasuun on seostunut haitallisia määriä haihtuvia komponentteja, kuten typpeä, argonia, happea sekä palamatonta vetyä, hiilimonoksidia tai metaania, paineistetaan kaasu noin 60 bar:n paineeseen tislauksella tai *flash*-

3. Hiilidioksidin kuljetus

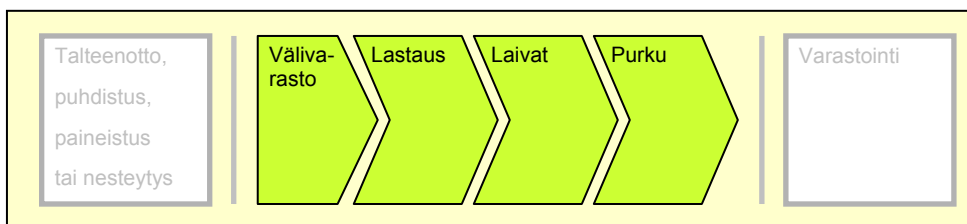
erotusta varten. Ennen kyseistä puhdistusprosessia CO₂ lauhdutetaan kastepisteeseen.

Nestemäisen, noin 60 bar:n paineessa olevan, puhdistetun hiilidioksidin saattaminen laivakuljetuksen paineeseen ja lämpötilaan onnistuu vaiheittaisella paineen alentamisella ja samalla muodostuneiden kaasujen uudelleenkompressoinnilla. Jos puhdistettu kaasu halutaan siirtää putkien avulla, nostetaan paine esimerkiksi korkeahyötysuhteisilla kalvopumpuilla yli 100 bar:iin, jolloin CO₂ säilyy alhaisemman lämpötilan ansiosta nestemäisenä.

3.3 Laivakuljetus

Hiilidioksidia ei ole toistaiseksi kuljetettu meriteitse säiliöaluksin CCS:n vaatimassa mittakaavassa (yli 10 000 t/alus). Kemian- ja elintarviketeollisuuden tarpeisiin tuotettua CO₂:a on puolestaan kuljetettu kantavuudeltaan alle 2 000 tonnin aluksin jo pitkään. Laivakuljetus on kustannustehokkainta toteuttaa puolipaineistetusti, jolloin CO₂ on säiliöissä nesteinä lähellä kolmoispistettä noin 7 bar:n paineessa ja -55 °C:n lämpötilassa. Tällöin CO₂ on nesteinä tiheimmilleen ja paine jää säiliöiden kannalta kohtuulliseksi.

Laivakuljetus on joustava ja nopein tapa toteuttaa hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin välinen logistiikka. Logistiikkaketju muodostuu säiliöalusten lisäksi lähtö- ja tulosatamasta, satamissa sijaitsevista välivarastoista sekä purku- ja lastauslaitteistosta (Kuva 7). Säiliöalus voidaan myös purkaa suoraan merellä sijaitsevaan varastointipaikkaan, jolloin tarvetta välivarastoinnille ei ole (Aspelund et al., 2006). Säiliöalusten otollisin määrä ja kapasiteetti riippuvat kuljetusetäisyydestä ja kuljetettavasta ainemäärästä. Käytännössä kaupallisten CO₂-kuljetuskelpoisten säiliöalusten kapasiteetit ovat kuitenkin melko rajallisia (n. 10 000–20 000 t).



Kuva 7. Hiilidioksidin laivakuljetuksen päävaiheet.

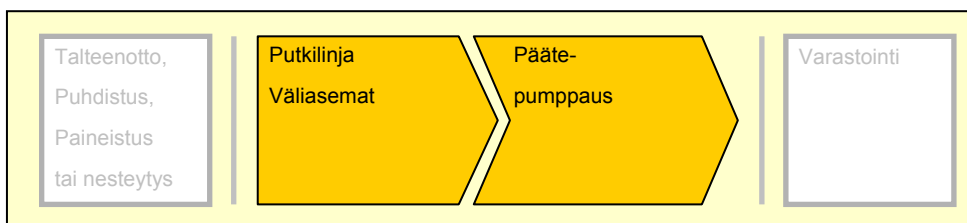
3.4 Putkikuljetus

Yhdysvaltain öljyteollisuudella on vuodelta 1972 asti polveutuvat perinteet hiilidioksidin laajamittaisesta putkikuljetuksesta ja hyödyntämisestä tehostetussa öljyntuotannossa. Nykyisin putkiverkoston yhteenlaskettu pituus ylittää noin 6 000 kilometriin. CO₂ kuljetetaan putkissa ympäristön lämpötilassa ja yli 100 bar:n paineessa.

Prosessina CO₂:n putkikuljetus on melko suoraviivainen (Kuva 8). Esikäsitellyssä kuljetuspaineeseen saatettu CO₂ ohjataan hiiliteräksiseen DN250-DN600:n koon putkeen, jossa painetta pidetään yllä sopivin välein sijoitettujen pumppu- asemien avulla. Putken määränpäässä hiilidioksidin paine nostetaan vaadittuun injektointipaineeseen.

Putkilinjan rakentaminen vaatii pitkähkön ympäristölupamenettelyn sekä maankäyttöoikeuksien hankinnan. Kyseisiin vaiheisiin liittyvien epävarmuuksien sekä investoinnin suuruuden takia putkilinjan rakentaminen on taloudellisesti haastavaa. Putkilinjan kustannustehokkuuden parantuessa lähinnä kapasiteettia ja käyttöastetta nostamalla tulisi varsinkin runkolinjat toteuttaa monen toimijan yhteishankkeina.

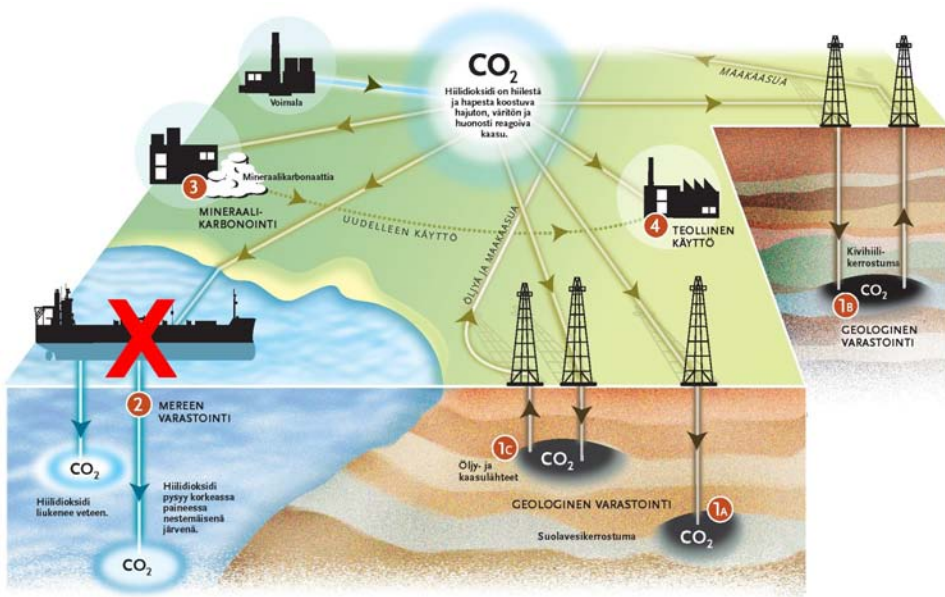
Putkilinjat ovat kuitenkin erittäin tehokas tapa kuljettaa CO₂:a. Käyttökustannukset muodostuvat paineennostoasemien energiankulutuksesta sekä huolto- ja tarkastustoimenpiteistä. Putkilinjojen kunto tarkastetaan linjan sisällä kulkevalla automatisoidulla laitteella. Reitin linja puolestaan tarkastetaan säännöllisesti ilmasta ja maasta käsin mahdollisten riskien, kuten maatoiden, havaitsemiseksi.



Kuva 8. Hiilidioksidin putkikuljetuksen päävaiheet.

4. Hiilidioksidin varastointi

Talteenoton jälkeen hiilidioksidi on varastoitava pysyvästi eristettynä ilmakehästä. Miljoonien tonnien vuosittaisten varastointitarpeiden takia löytyy vain muutamia mahdollisia varastointivaihtoehtoja (Kuva 9). Ainoa täysinmittaisesti demonstroitu menetelmä on varastointi geologisiin muodostumiin, kuten ehtyneisiin öljy- ja kaasukenttiin ja suolavesikerrostumiin.



Lähde: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Teksti: Marko Hamilo / HS, grafiikka: Maija Orava / HS

Kuva 9. Mahdollisia vaihtoehtoja hiilidioksidin varastointiin. Uudet lait kieltävät hiilidioksidin varastoinnin suoraan mereen.

Suolavesikerrostumat ovat maanalaisia suolaisen veden täyttämiä huokoisia kivikerroksia, jotka voivat soveltua hiilidioksidin varastointiin. Teollisen maakaasun tuotannon yhteydessä erotettua hiilidioksidia sijoitetaan merenpohjan alla sijaitseviin suolavesikerrostumiin jo nykyisin (katso luku 8).

Yhdysvalloissa ja Kanadassa useissa kohteissa hiilidioksidia käytetään hiipuvan öljykentän tuotannon lisäämiseen (EOR), jolloin hiilidioksidi pidättyy kenttään. Yhtä demonstraatiokohdetta lukuun ottamatta hiilidioksidi on kuitenkin peräisin luonnollisista hiilidioksidiesiintymistä eikä esimerkiksi voimalaitosten savukaasuista. Talteen otettua hiilidioksidia voitaisiin vastaavasti käyttää öljyntai kaasutuotannon tehostamiseen, mutta öljy- ja kaasukentät eivät ole kapasiteetiltaan riittäviä aikaansaamaan CCS:n avulla merkittäviä päästövähennyksiä.

Kivihiihkerrostumat, joiden huokoisuus on sopiva ja jotka ovat kannattamattomia louhittaviksi, voivat toimia myös hiilidioksidin varastoina, mutta tätä menetelmää ei ole vielä demonstroitu mittavasti. Myös valtameriin voidaan teoriasa varastoida hiilidioksidia silikaattimineraalien avulla. Ekologisen vaikutuksen epävarmuuden ja uuden lainsäädännön takia varastointi suoraan valtameriin ei ole kuitenkaan toteuttamiskelpoinen vaihtoehto (katso luku 7.4). Hiilidioksidin sitominen silikaattimineraalien avulla kiinteiksi karbonaateiksi on teknisesti mahdollista, mutta prosessien suurten energiavaatimusten takia mineraalien karbonointia ei voida vielä toteuttaa. Myös teollisuudessa on käyttöä hiilidioksidille, mutta tällä hetkellä sen käyttämät määrät ovat CCS:ään verrattuna hyvin pieniä. Lisäksi hiilidioksidi yleensä palaa lyhyen ajan sisällä takaisin ilmakehään, joten hiilidioksidin runsaampi käyttö teollisuudessa ei auttaisi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä.

4.1 Geologisten varastoinnin mekanismit

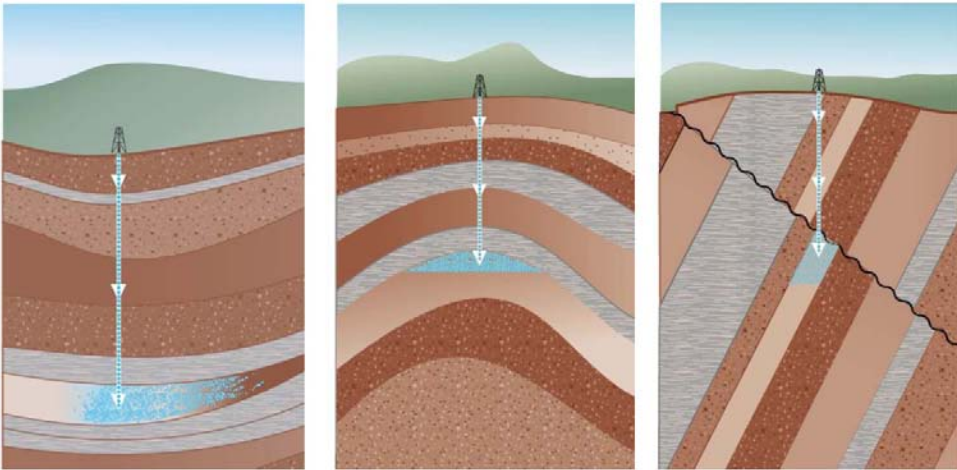
Yhteistä hiilidioksidin geologistille varastointimenetelmille on, että hiilidioksidia injektoidaan paineistettuna ylikriittiseen paineeseen (> 74 bar). Tällä painealueella CO_2 käyttäytyy höyryn tavoin tunkeutuen kiven jokaiseen rakoön, mutta sen tiheys on nestemäisen suuri. Hiilidioksidia injektoidaan muodostuman huokostiloihin tyypillisesti yli 800 metrin syvyydessä, jotta yllä olevan kivikerrostumien muodostama paine vastaisi injektoidun hiilidioksidin painetta. Muodostuman huokoisuus ja läpäisevyys määrittää varastointikapasiteetin lisäksi injektointinopeuden. Injektointinopeutta voidaan lisätä lisäämällä injektointikaivoja.

Kun hiilidioksidia on injektoitu, useat eri fysikaaliset ja geokemialliset mekanismit estävät sen nousemisen takaisin pintaan. Tärkein niistä on läpäisemätön

4. Hiilidioksidin varastointi

kivi- tai savikerros varastokerrostuman päällä (tiivistyskerros), koska hiilidioksidi on muodostumassa olevaa vettä kevyempää ja pyrkii siksi ylöspäin. Muodostuman rakenne määrittää myös sen soveltuvuuden varastoksi. Suljetut muodostumat (Kuva 10) ovat varmempia varastoja kuin avoimet muodostumat mutta myös huomattavasti näitä harvinaisempia. Esimerkiksi Sleipner-projektissa käytetään avointa muodostumaa varastointia varten (katso luku 8.1).

Hiilidioksidi syrjäyttää muodostumassa olevan veden. Kun injektointi loppuu, vesi alkaa siirtyä takaisin, jolloin hiilidioksidi jää veden paineesta johtuen loukkuun. Suuri osa injektoidusta hiilidioksidista tulee ajan myötä (satojen vuosien aikana) liukenemaan muodostumassa olevaan veteen, jolloin muodostuu ympäröivää vettä tiheämpi neste, jonka odotetaan uppoavan varastomuodostuman pohjalle. Liuennut hiilidioksidi saattaa kivimuodostumasta riippuen reagoida kemiallisesti ympäröivien kivien kanssa ja muodostaa pysyviä mineraaleja. Mineralisoituminen saattaa kuitenkin kestää tuhansia vuosia.

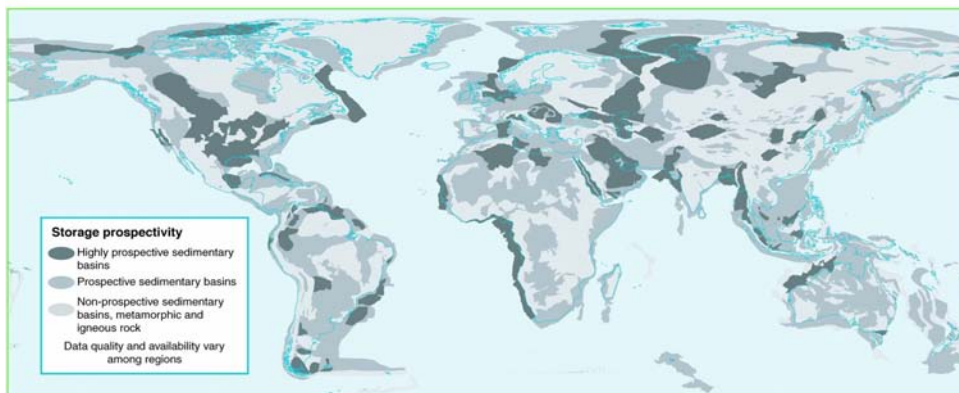


Kuva 10. Esimerkki sivulta avoimesta muodostumasta (vasen kuva) ja suljetuista muodostumista (keskimmäinen ja oikea kuva). Kuvan lähde: <http://www.co2crc.com.au>.

4.2 Geologisen varastoinnin kapasiteetti

Kansainvälisissä tutkimushankkeissa on alettu kartoittaa maailman geologisten muodostumien kykyä varastoida hiilidioksidia. Varastointia varten sopivia geo-

logisia muodostumia löytyy pääasiallisesti suurista, yhtenäisistä hiekkakivialueiden sedimentaatioaltaista (Kuva 11). Maailman geologisten muodostumien varastointipotentiaaliin liittyy vielä suuria epävarmuuksia, koska esimerkiksi suolavesikerrostumia ei ole aikaisemmin kunnolla tutkittu ja kartoitettu.

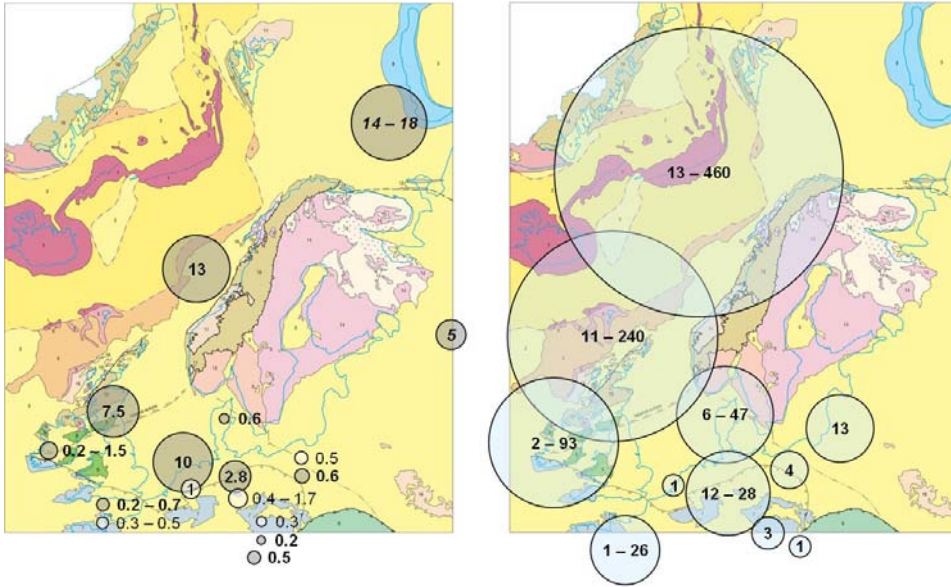


Kuva 11. Mahdollisia alueita, joilta saattaisi löytyä hiilidioksidin varastointiin sopivia suolavesimuodostumia, öljy- tai kaasukenttiä, tai kivihiilikerrostumia (IPCC, 2005).

Varastointikapasiteetilaskelmat vaihtelevat suuresti eri raporteissa laskentatavoista riippuen. IPCC:n (2005) erikoisraportissa arvioitiin teoreettisen varastointipotentiaalin olevan ainakin 2 000–10 000 Gt CO₂:a, josta Euroopan potentiaalin arvioitiin olevan 90–600 Gt CO₂:a. Kuva 12 on karkeasti hahmoteltu aluekohtaiset varastointipotentiaalit Pohjois-Euroopassa. Tuoreimpien tutkimustietojen mukaan realistisempi arvio Euroopan varastointikapasiteetistä on 120–360 Gt CO₂:a (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Pohjois-Amerikan teoreettisen varastointipotentiaalin arvioidaan olevan 1 100–3 600 Gt CO₂:a (DOE 2008).

Sekä *Carbon Sequestration Leadership Forum* (CSLF, 2007) että Yhdysvaltojen *Department of Energy* (DOE, 2008) ovat viime aikoina kehittäneet ja julkaisseet rinnakkain menetelmiä mahdollisten hiilidioksidivarastojen kapasiteettien arvioimiseen. Kapasiteetilaskelmissa on kuitenkin vielä suuria epävarmuuksia, varsinkin suolavesikerrostumien osalta. Ei ole mahdollista vahvistaa tietyn muodostuman kelpoisuutta varastoksi ennen kuin tarkkoja mittauksia ja testejä on tehty. Esitetyt luvut kertovatkin todellisen kapasiteetin suuruusluokasta lähinnä viitteellisesti.

4. Hiilidioksidin varastointi



Kuva 12. Pohjois-Euroopan öljy- ja kaasuesiintymien (vasen kuva, vahva fontti), louhimiskelvottomien hiilikerrostumien (vasen kuva, tavallinen fontti) sekä suolavesikerrostumien (oikea kuva) hiilidioksidin varastointipotentiaaliarvioita. Yksikkö: Gt CO₂ (Lähde: IEA, 2008a ja CSA Group, 2008. Lähde Luoteis-Venäjän öljy- ja kaasuesiintymien varastointipotentiaaliarvioista: Cherepovitsyn, 2006).

Suomen geologisten muodostumien varastointikapasiteetti on käytännössä olematon kallioperägeologisista syistä (Koljonen et al. 2004). Pohjanlahden kallioperä muodostuu osittain sedimenttikivikerrostumista, mutta sedimenttikivien huokoisuus on pieni. Lisäksi Itämeri on matala, joten todennäköisesti sen alaiset sedimenttikivikerrostumat eivät sovellu hiilidioksidin varastointiin. Maantieteellisesti lähimmät muodostumat, jotka voisivat soveltua tähän tarkoitukseen, sijaitsevat Barentsinmerellä, jossa Statoil on jo aloittanut hiilidioksidin varastoinnin (katso luku 8). Myös Skånen ja Tanskan rannikon välisellä alueella sekä Gotlannin kaakkoispuolella on suotuisia geologisia muodostumia, mutta alueita on tutkittava tarkemmin, jotta niiden soveltuvuus hiilidioksidin varastoiksi vahvistuu. Puolassa ja Liettuassa sekä muualla Luoteis-Euroopassa on geologisia edellytyksiä hiilidioksidin varastointiin. Näissä maissa on jo kokemusta geologisten muodostumien käytöstä maakaasun välivarastoina.

4.3 Muita varastointimenetelmiä

Myös maanalaisiin hiiliesiintymiin on mahdollista injektoida hiilidioksidia. Hiilidioksidi sitoutuu hiiliesiintymään ja vapauttaa metaania, joka voidaan ottaa talteen. Menetelmää on testattu muutamassa pilottilaitoksessa ympäri maailmaa, mutta loppusijoitusta on vaikeuttanut hiiliesiintymän turpoaminen hiilidioksidin vaikutuksesta, ja siksi tekniikka on vielä kehitteillä.

Myös muita geologisia muodostumia voitaisiin teoriassa käyttää hiilidioksidivarastoina. Näihin kuuluvat esimerkiksi geologisten suolaesiintymien suoladootit, joita käytetään nykyään maakaasun, öljyn ja muiden petrokemiallisten tuotteiden väliavarastoina. On kuitenkin epävarmaa, miten hiilidioksidi vaikuttaisi suoladoottien eheyteen, joten niitä ei pidetä suurimittaisen hiilidioksidin varastoinnin realistisena vaihtoehtona. Hylättyjä kaivoksia ei puolestaan pidetä sopivina hiilidioksidin varastointiin niiden pienen varastointikapasiteetin vuoksi.

Hiilidioksidia voidaan myös sitoa silikaattimineraaleihin, joita muun muassa Suomessa on runsaasti. Kun hiilidioksidi reagoi näiden mineraalien kanssa, muodostuu karbonaattimineraaleja, jotka ovat pysyviä ja ympäristölle vaarattomia mineraaleja. Reaktiionopeus on kuitenkin hidas, ja menetelmät, joita tähän asti on kehitetty, vaativat liikaa energiaa. Tarvittaisiin myös noin 3–5 t tuotteistettua silikaattimineraalia hiilidioksiditonnia kohti. Alustavasti on arvioitu, että Itä-Suomen ultraemäksisten muodostumien serpentiinivarat voisivat teoriassa riittää varastoimaan 2–3 Gt CO₂:a (Aatos et al. 2006, Teir et al. 2006). Myös teollisuuden sivutuotteita ja jätteitä, kuten raudanvalmistuksen kuonaa, voidaan käyttää hiilidioksidin sitomiseen. Australiassa on muutama vuosi sitten pystytetty pilottilaitos, jossa sidotaan 70 000 t CO₂:a vuodessa bauksiittijäännöskiveen (Alcoa 2005). Sivutuotteiden CO₂-talteenottokapasiteetti on kuitenkin melko pieni verrattuna tehtaiden omiin hiilidioksidipäästöihin.

On myös pohdittu, että hiilidioksidia voitaisiin varastoida meriin pumpppamalla ja liuottamalla sitä yli kilometrin syvyyteen tai laskemalla sitä yli kolmen kilometrin syvyyteen, jolloin hiilidioksidi on vettä tiheämpää ja sen oletetaan muodostavan lähes pysyviä ”hiilidioksidijärviä”. Tämän menetelmän ekologiseen kestävyys liittyä kuitenkin suuria epävarmuuksia. Merillä on tärkeä osa hiilidioksidin luonnollisessa kiertokulussa, ja talteen otetun hiilidioksidin injektointi mereen voisi horjuttaa tätä tasapainoa. Hiilidioksidi todennäköisesti happamoittaisi meriä. Lisäksi on todettu, että hiilidioksidi voi olla haitallista merieliöille. Uudet lait estävät kuitenkin hiilidioksidin varastoinnin suoraan mereen EU:n talousalueella ja Koillis-Atlantin alueella (katso luku 7.4).

5. Kustannukset, suorituskyky ja kypsyyssaste

IPCC (2005) esitti taulukon CCS-tekniikan kypsyyssasteesta, joka pätee edelleen (Taulukko 2). Hiilidioksidin erotuksen teknologia on kypsää markkinateknologiaa kemianteollisuuden prosessien sekä puhtaan hiilidioksidin käytön osalta. Hiilidioksidin talteenotto täyden mittakaavan voimalaitosprosessista puolestaan on kehitteillä mutta ei vielä kypsää teknologiaa. Hiilidioksidin kuljetustekniologia ja hiilidioksidin käyttö EOR:ssä ovat kaupallisessa käytössä olevia teknologioita.

Viime vuosina on käynnistetty useita projekteja, joissa demonstroidaan hiilidioksidin varastointia suolavesikerrostumiin. Varastointi maanalaisiin hiiliesiintymiin on osoittautunut vaikeammaksi (katso luku 4.3). Varastointi valtameriin on käytännössä hylätty vaihtoehto Euroopassa uutta lainsäädäntöä myöten (katso luku 7.4), mutta sitä tutkitaan vielä muun muassa Japanissa. Teollisuuden sivutuotteiden ja jätemateriaalien karbonointia sovelletaan pienessä mittakaavassa muutamissa pilottihankkeissa, mutta silikaattimineraalien karbonoinnin kehityksessä ei ole vielä päästy niin pitkälle. Tutkimus- ja kehityshankkeet kohdistuvat erityisesti voimalaitosympäristöön soveltuvien talteenottomenetelmien kehittämiseen sekä hiilidioksidin varastoinnin kehittämiseen etenkin turvallisuus- ja ympäristövaikutukset huomioiden. Hiilidioksidin erotuksen teknisiä kehityskohteita ovat muun muassa tehokkaiden ja erityisesti energiatehokkaiden liuottimien kehittäminen ja talteenottokustannuksien pienentäminen.

CCS-tekniikan suurimmat kustannukset liittyvät talteenottoprosessiin. Kaikki tämänhetkiset voimalaitoksia varten kehitetyt hiilidioksidin talteenottomenetelmät vaativat merkittäviä investointeja laitteistoihin ja energiaa. Myös hiilidioksidin paineistaminen kuljetusta varten vaatii energiaa, ja siten voimalaitoksesta saatava nettoteho pienenee edelleen. Yleensä laskelmissa pyritään 80–90 % talteenottoon voimalaitoksissa. Teknisesti olisi mahdollista päästä suurem-

5. Kustannukset, suorituskyky ja kypsyyssaste

piin päästövähennyksiin, mutta tämä vaatisi huomattavasti enemmän energiaa. Voimalaitos, jossa sovelletaan CCS:ää, vaatii enemmän polttoainetta tuotta- maansa sähkötehoa kohden kuin vastaava voimalaitos ilman CCS:ää. Energiaa kuluu hiilidioksidin talteenottoon ja paineistamiseen, jolloin sähkötuotannon hyötysuhde on pienempi ja vastaavasti sähkötuotannon kustannukset kasvavat. Suuremman polttoainemäärän takia polttoprosessissa syntyy myös enemmän hiilidioksidia sähkötehoa kohden. Siksi talteenottoon liittyviä kustannuksia ver- rataan yleensä siihen, paljonko hiilidioksidipäästöjä vältetään, eikä talteen otetun hiilidioksidin määrään (Kuva 13).

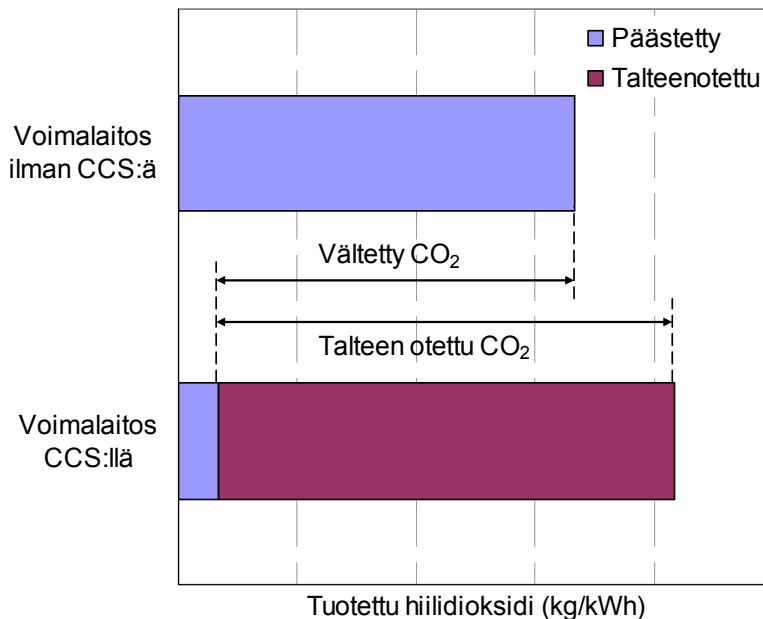
Taulukko 2. CCS teknologioiden kehityksen nykytilanne (IPCC, 2005).

CCS komponentti	CCS teknologia	Tutkimusvaihe	Demonstraatio- vaihe	Kannattava erityisolissa	Kaupallinen teknologia
Talteenotto	Erotus polton jälkeen			X	
	Erotus ennen polttoa			X	
	Happipoltto		X		
	Erotus teollisesta prosessista				X
Kuljeuts	Putkikuljetus				X
	Laivakuljetus			X	
Geologinen varastointi	Tehostettu öljyntuotanto (EOR)				X
	Öljy- tai kaasukentät			X	
	Suolavesiesiintymät			X	
	Tehostettu metaanituotanto kivihiilikerrostumista (ECBM)		X		
Varastointi mereen	Suora injektointi (liukeneminen veteen)	X			
	Suora injektointi (järvi merenpohjalle)	X			
Mineraalien karbonointi	Silikaattimineraalit	X			
	Jättemateriaalit		X		
Hiilidioksidin hyötykäyttö					X

Jotta 80–90 % hiilidioksidipäästöistä voitaisiin välttää nykypäivän parhaan CCS- teknologian avulla, tarvittaisiin noin 10–40 % enemmän polttoainetta verrattuna perinteiseen voimalaitokseen (riippuen voimalaitostyyppistä). Tästä johtuen sähkötuotantokustannukset CCS-voimalaitoksella olisivat 35–85 % suuremmat kuin vastaavalla voimalaitoksella ilman CCS:ää. Samasta syystä hiilidioksidin tal- teenotto olisi liian kallista pienen hyötysuhteen voimalaitoksissa. Hiilidioksidille asetut laatuvaatimukset ja tiettyjen talteenotto-prosessien vaatima savukaasujen esipuhdistaminen asettaisi myös korkeammat vaatimukset savukaasujen puhdis-

5. Kustannukset, suorituskyky ja kypsyyssaste

tuslaitteille kuin tavanomaisessa voimalaitoksessa. Voimalaitosten investointikustannukset nousisivat noin 40–80 % CCS:n myötä, riippuen voimalaitostyyppistä ja talteenottoteknologiasta. Hyötysuhdemenetyksen minimoimiseksi tarvitaan optimointia ja talteenotto-prosessin integroimista voimalaitoksen höyrypiiriin.



Kuva 13. Talteen otetun hiilidioksidin ja vältetyn hiilidioksidipäästöjen ero (IPCC 2005).

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia ei ole vielä sovellettu täyden mittakaavan voimalaitoksessa, ja siksi kustannusarviointeihin liittyy suurta epävarmuutta. Tulevaisuusskenaariot kustannusten kehityksestä riippuvat sen lisäksi suuresti teknologiakehityksen tuottamasta kustannusvähennyksestä ja polttoaineiden hintakehityksestä. McKinseyn (2008) tuoreen raportin mukaan ensimmäisten (aikaisintaan 2015) CCS-demonstraatiovoimalaitosten (nettoteholtaan n. 300 MW) kokonaiskustannukset hiilidioksidipäästöjen talteenotolle ja varastoinnille olisivat luokkaa 60–90 € / vältetty CO₂-tonni. Ensimmäisille täysmittaisille CCS-voimalaitoksille (nettoteholtaan n. 900 MW), joita rakennettaisiin vuoden 2020 jälkeen, vastaavat kustannukset olisivat 35–50 € / CO₂-tonni, josta 25–

32 € / CO₂-tonni tulisi talteenotosta ja paineistamisesta³, 4–6 € / CO₂-tonni kuljetuksesta ja 4–12 € / CO₂-tonni varastoinnista⁴. On kuitenkin huomioitava, että kuljetuskustannukset on laskettu 500 kilometrin putkikuljetukselle ilman välisemia paineen nostoa varten. Suomen olosuhteissa kuljetusmatka varastointipaikalle olisi huomattavasti pitempi, minkä takia kuljetuskustannukset voisivat nousta kymmeneen euroihin hiilidioksiditonna kohti. Raportissa arvioidaan, että kun markkinat ovat kypsyneet (vuoden 2030 jälkeen), kustannukset voisivat laskea 10 %. Silloin kustannukset vastaisivat päästöoikeuksien odotettua hintaa vuonna 2030.

CCS:n soveltamisen teollisuudessa ja CCS:n jälkiasennuksen (*retrofit*) olemassa oleviin voimalaitoksiin odotetaan yleisesti ottaen olevan vielä kalliimpaa. McKinseyn (2008) raportin mukaan CCS:n kustannukset voivat olla jopa 30 % suuremmat olemassa olevissa, noin kymmenen vuoden ikäisissä voimalaitoksissa kuin uusissa. Todelliset kustannukset tulevat olemaan erilaiset eri projekteissa, riippuen laitoksen suuruusluokasta, sijainnista ja teknologiasta. Kirjallisuudessa ilmoitetut CCS:n kustannukset on yleensä laskettu 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 pienenisivät. Tulevaisuuden innovaatiot, kuten kehitetyt metalliseokset, vetykaasuturbiinit ja kehittyneemmät hiilidioksidin talteenottomenetelmät, voisivat nostaa CCS-voimalaitoksien hyötysuhteen vastaamaan nykypäivän voimalaitoksia ilman CCS:ää.

³ Kun talteen otetaan 90 % syntyneestä hiilidioksidista.

⁴ Laskettu 40 vuoden injektioonille ja lisäksi 40 vuoden valvonnalle injektioonin lopettamisen jälkeen.

6. CCS ilmasto- ja energiapolitiikassa

Ilmastonmuutoksen haitalliset vaikutukset tulevat todennäköisesti olemaan rajuimpia kehitysmaissa, joissa kuivuus ja maaperän eroosio ovat jo nykyään ongelma. Lisäksi pienet saarivaltiot ovat uhattuina merenpinnan nousun vuoksi. Toisaalta teollisuusmaiden päästöt ovat olleet tähän asti suurimpia syyllisiä ongelmaan. Vaikka teollisuusmaiden päästökasvun ennakoidaan hidastuvan, on toisaalta kehitysmaiden energiantarve kasvamassa talous- ja väestönkasvun myötä. Tällä hetkellä kymmenen valtiota (Yhdysvallat ja Kiina kärjessä) vastaa kahdesta kolmasosasta maailman kasvihuonekaasupäästöistä. Tämä asetelma on vaikeuttanut maailmanlaajuisen sitovan ilmastopimuksen syntymistä.

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on saanut poliittista tunnustusta kansainvälisissä keskusteluissa yhtenä tärkeimmistä hiilidioksidipäästöjen vähentämismenetelmistä. CCS nähdään väliaikaisena ratkaisuna, joka olisi merkittävässä käytössä noin vuosisadan ajan. Tänä aikana odotetaan uusien ympäristöä säästävien energiantuotantomuotojen kehittyvän kaupallisesti sovellettaviksi. VTT:n tekemissä globaaleissa skenaariotarkasteluissa, joissa tavoitellaan EU:n esittämää lämpötilan kahden asteen maksiminousua, noin kolmannes päästövähennyksistä toteutettaisiin tällä vuosisadalla CCS:n avulla (Koljonen et al. 2008, 2009). CCS:n soveltaminen edellyttää kuitenkin kansainvälisiä pelisääntöjä ja CCS:n sisällyttämistä kansainvälisiin ilmastopimukseen virallisena päästövähennysmenetelmänä.

6.1 Kansainväliset sopimukset

Ensimmäinen kansainvälinen ilmastopimus solmittiin Rio de Janeirossa vuonna 1992 järjestetyssä YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssissa (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC). Ilmastopimusta täsmentävä Kioton pöytäkirja hyväksyttiin vuonna 1997, ja se tuli voimaan vuonna 2005.

Kioton pöytäkirja velvoittaa kehittyneitä maita vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään yhteensä 5,2 % vuoden 1990 tasosta vuosina 2008–2012. Pöytäkirja ei aseta kehitysmailla sitovia päästövähennysvelvoitteita. Sopimus antaa päästövähennyksiin sitoutuneille teollisuusmailla mahdollisuuden täyttää osan velvoitteistaan ostamalla päästövähennysyksiköitä muissa maissa toteutettavista kasvihuonekaasuja vähentävistä hankkeista. Puhtaan kehityksen mekanismi (*clean development mechanism*, CDM) koskee kehitysmaissa toteutettavia päästövähennyshankkeita ja yhteistoteutusmekanismi (*joint implementation*, JI) vastaavia teollisuusmaissa toteutettavia hankkeita. CCS:n sisällyttämisestä CDM-järjestelmään on yritetty sopia, mutta neuvotteluissa ei toistaiseksi ole onnistuttu. Eräs ongelma CCS:n kaltaisessa uudessa teknologiassa CDM-hankkeena on se, että se voi vaikuttaa rikkaiden maiden keinolta käyttää kehittyviä maita koalueina. Sidosryhmät ovat huolissaan myös siitä, että CCS vie huomion pois energiatehokkuudesta ja uusiutuvista energianlähteistä.

Kioton pöytäkirjan velvoitekausi päättyy vuonna 2012, eikä osa kehittyneistä maista, kuten Yhdysvallat, ole vielä allekirjoittanut sopimusta. Siksi tavoitteena on saada aikaan uusi, maailmanlaajuinen ilmastopöytäkirja Kööpenhaminan ilmastokokouksessa joulukuussa 2009. Maailmanlaajuinen sopimus on tärkeä, sillä ilman sitä merkittävän suuriin vaikutuksiin vaadittavat päästövähennykset voisivat muun muassa vääristää huomattavasti tiettyjen energiaintensiivisten alojen globaalia kilpailua ja aiheuttaa jopa ns. hiilivuotoa ja globaalien päästöjen lisääntymistä.

6.2 EU:n ilmasto- ja energiapaketti

Euroopan unioni on sitoutunut Kioton pöytäkirjan tavoitteisiin yhtenä osapuolelana, ja sen tavoitteena on yhteensä 8 %:n päästövähennys. Euroopan parlamentti hyväksyi joulukuussa 2008 laajan energia- ja ilmastopaketin, jonka tavoite on myötävaikuttaa siihen, että globaali keskilämpötilan nousu rajoittuisi 2 °C:een. Strategia sisältää seuraavat tavoitteet vuodelle 2020:

- kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 %:lla (tai 30 %:lla, mikäli kansainvälinen, sitova ilmastopöytäkirja syntyy)
- energiakulutuksen vähentäminen 20 %:lla energiatehokkuutta nostamalla

6. CCS ilmasto- ja energiapolitiikassa

- uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen 20 %:iin kokonaisenergiankulutuksesta sekä liikenteen biopolttonesteiden tai uusiutuvan sähkön käytön lisääminen 10 %:iin liikenteen energiankulutuksesta.

Paketti sisältää jäsenmaittain määritellyt oikeudelliset, sitovat velvoitteet kasvihuonekaasupäästövähennyksistä ja uusiutuvan energian käytöstä. Samassa yhteydessä uudistettiin EU:n päästökauppadirektiivi (katso luku 7.4). Uudessa direktiivissä päästökaupparektorille asetetaan yksi EU-tason päästökatto ja päästökaupan ulkopuolisille päästöille kansalliset päästörajat. Uusiutuvan energian käytön edistämiseen tähtäävässä direktiivissä määritetään uusiutuvaa energiaa koskevat kansalliset prosentiosuudet.

CCS:n turvallisen käytön edistäminen mainitaan paketissa yhtenä toimenpiteenä. Tätä varten direktiiviä, joka koskee hiilidioksidin geologista varastointia, työstetään parhaillaan (katso luku 7.4). Paketin myötä EU on varannut 300 miljoonaa päästöoikeutta rahoittamaan osittain useita CCS:n tai uusiutuvan energian laajoja demonstraatioprojekteja.

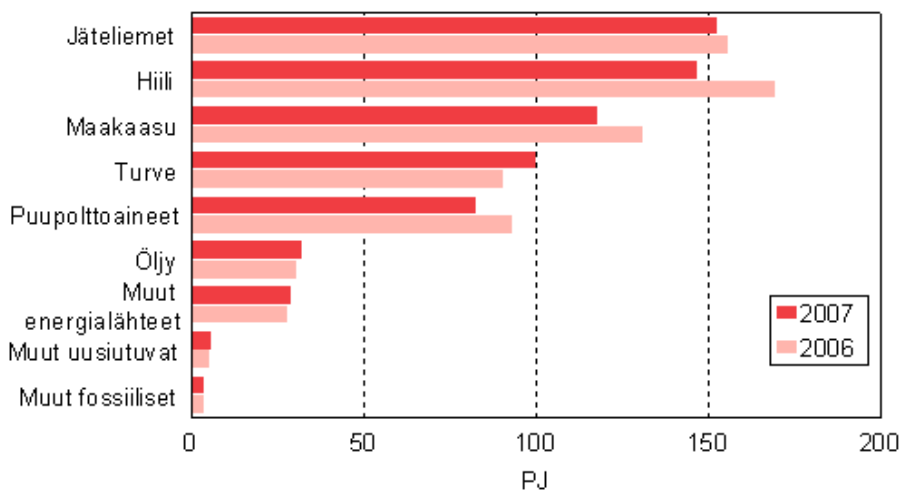
Myös Euroopan ulkopuolella on solmittu sopimuksia kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseksi. Esimerkiksi Yhdysvalloissa monella osavalttiolla on oma ilmastopolitiikkansa. *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI) kattaa Yhdysvaltain itäiset osavaltiot sekä joitain Kanadan osavaltioita, ja osavaltiot käyvät keskenään myös päästökauppaa. EU:n tavoitteet ovat kuitenkin toistaiseksi kunnianhimoisimpia.

6.3 Suomen ilmasto- ja energiastrategia

Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2007 olivat noin 78,5 Mt CO₂-ekv, josta hiilidioksidipäästöt olivat 66,3 Mt (Tilastokeskus 2008). Energiasektori kattoi valtaosan (81 %) Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Energiasektorin päästöt muodostuvat pääosin sähkön ja lämmön tuotannosta, jonka primäärienergian käyttö jakautuu Kuva 14 mukaisesti.

Suomen energia- ja ilmastostrategia perustuu EU:n energia- ja ilmastostrategian sitovien tavoitteiden toteuttamiseen. Strategian lähtökohtana on oletus, että sähkönkulutus Suomessa jatkaa kasvuaan ns. perusuraskenaariossa ja tavoiteskenaariossakin kasvu saadaan taittumaan vasta vuoden 2020 tienoilla. Edellä kuvattujen EU:n energia- ja ilmastopakettien tavoitteiden taakkaa on jaettu Suomelle siten, että päästökaupan ulkopuolisen sektorin kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää 16 % vuoden 2005 tasosta ja uusiutuvan energian osuutta energi-

an loppukulutuksesta lisätä 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Näiden lisäksi Suomea koskevat luonnollisesti EU:n yhteiset tavoitteet muun muassa päästö-kauppasektorin kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemisestä. Strategian mukaan nykyiset toimet eivät riitä tavoitteisiin pääsemiseen, vaan tarvitaan myös uusia ohjauskeinoja ja -toimia. Esimerkiksi energiatehokkuutta ja energiansäästöä on strategian mukaan lisättävä voimakkaasti. Sähkönkulutuksen vuonna 2020 tulisi olla 5 TWh vähemmän kuin perusuraskenaariossa (TEM 2009). Suomessakin tavoitteisiin pääsemistä tullaan ohjaamaan monilla eri tavoilla, muun muassa taloudellisilla kannusteilla tai veroilla, mutta myös viestinnällä ja koulutuksella.



Kuva 14. Primäärienergian käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa Suomessa (Tilastokeskus 2009).

Energia- ja ilmastostrategiassa sähkönhankinnan lähtökohtana on riittävän ja kohtuuhintaisen sähkön saaminen hyvällä toimitusvarmuudella siten, että sähkönhankinta samalla tukee muita ilmasto- ja energiapolitiittisia tavoitteita. Strategiassa sähkön hankinnan tulee perustua monipuoliseen ja useisiin energialähteisiin nojaavan, sähkön ja lämmön yhteistuotannon ansiosta hajautettuun järjestelmään. Sähkön hankinta tulee ensisijaisesti perustaa omaan tuotantokapasiteettiin, ja oman tuotantokapasiteetin tulee voida kattaa huipun aikainen kulutus ja mahdolliset tuontihäiriöt. Oman kapasiteetin rakentamisessa etusijalle nostetaan laitokset, jotka tuottavat kasvihuonekaasuja vähän tai eivät lainkaan (TEM 2009).

6. CCS ilmasto- ja energiapolitiikassa

Tämän tiedon perusteella voidaan olettaa, että Suomeen tullaan rakentamaan paljon uutta kapasiteettia lähivuosikymmeninä, ja samalla vanhaa kapasiteettia, kuten kivihiihilauhdetta, poistuu käytöstä. Tämä avaa myös mahdollisuuden soveltaa uusinta tekniikkaa kuten CCS:ää uusiin energialaitoksiin. Myös kysynnän joustoa pyritään parantamaan ja kulutushuippuja tasoittamaan. Energia- ja ilmastostrategian selonteossa todetaan, ettei CCS olisi taloudellinen vaihtoehto kaikelle lauhdevoimakapasiteetille, koska Suomessa lauhdevoimalaitokset täydentävät sähkönhankintaa pohjoismaisen vesivoiman ja tuonnin vaihteluiden mukaan (VN 2008). Toisaalla selonteossa kuitenkin todetaan, että voidakseen siirtyä lähes päästöttömään energiatalouteen vuonna 2050 Suomi ei voisi tulevina vuosikymmeninä rakentaa enää yhtään uutta fossiilisia polttoaineita pääpolttoaineena käyttävää voimalaitosta tai lämpökeskusta ilman hiilidioksidin talteenottoa.

7. Edellytyksiä CCS:n soveltamiselle

CCS:n periaatteellisesta kansainvälisestä hyväksynnästä on pitkä tie käytännön toteutukseen. CCS:n käyttöönotto edellyttää uusia lakeja ja säädöksiä kuljetukseen, varastointiin, päästöjen monitorointiin ja vastuukysymyksiin. Tällä hetkellä ei ole myöskään taloudellisesti kannattavaa ottaa CCS:ää nykyteknologialla käyttöön ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. CCS:n demonstrointi voimalaitoskokoluokassa tulee tarvitsemaan taloudellista tukea. Pitkällä aikavälillä päästöoikeuksien hinnan voidaan olettaa nousevan riittävästi ja CCS:n kustannusten laskevan, jolloin CCS:stä tulisi taloudellisesti kannattavaa.

Hiilidioksidin talteenotto, kuljetus ja varastointi käsittävät monta eri osaluuetta, ja sen takia monet lait ja säädökset vaikuttavat CCS:n soveltamiseen. Hiilidioksidin varastoinnin valvontaa ja verifiointia varten tarvitaan teknologian lisäksi myös selvät kansainväliset säännöt pitkäaikaisista vastuista. Tämä lisäksi yhteisöt tarvitsevat riittävästi selkeää tietoa CCS:stä, jotta siitä tulisi hyväksyttävä menetelmä ilmastomuutoksen hillinnässä. Tässä luvussa luodaan läpileikkaus näistä asioista.

7.1 Riskienhallinta

Keskeinen kysymys CCS:n riskienhallinnassa on mahdollinen hiilidioksidivuoto geologisessa varastossa ja sen seuraukset. Suurimmat hiilidioksidivuodon riskit ovat pohjaveden saastuminen, maaperän happamoituminen sekä ilman ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu.

On epävarmaa, kuinka pysyvä hiilidioksidivaraston on oltava, jotta CCS:llä olisi toivottu vaikutus ilmastomuutoksen hillintään. Vallitseva näkemys on, että lähes kaiken varastoidun hiilidioksidin olisi pysyvä varastossa ilmakehästä eristettynä tuhansia vuosia (esim. Lindeberg 2003). Muut tutkimukset taas väittävät, että CCS:llä olisi myönteistä vaikutusta ilmastomuutoksen hillintään jopa

7. Edellytyksiä CCS:n soveltamiselle

muutaman prosentin⁵ vuotuisella vuodolla (van der Zwaan ja Gerlagh 2009). Hiilidioksidivuodolla voi kuitenkin olla muita ympäristövaikutuksia.

Jos hiilidioksidi vuotaisi varastoista pohjaveteen, vesi happamoituisi, minkä vuoksi veteen liukenesi helpommin raskasmetalleja ja hivenaineita. Vesi voisi näin ollen pilaantua. Mikäli hiilidioksidin injektointipaine ylittää varastomuodostuman kestäjän maksimipaineen, voi syntyä halkeamia, joiden kautta muodostuman sisältämä suolavesi saattaisi joutua kosketuksiin pohjaveden kanssa.

Hiilidioksidi ei ole tulenarkaa, palavaa tai myrkyllistä, minkä ansiosta riskit ovat pienempiä kuin esimerkiksi maakaasun käsittelyssä. Ilman korkeat hiilidioksidipitoisuudet (> 0,5 %) voivat olla terveydelle haitallista, ja yli 10 % hiilidioksidipitoisuudet johtavat ihmisillä tajuttomuuteen. Erittäin suurina pitoisuuksina hiilidioksidi syrjäyttää hapen ja voi aiheuttaa hapenpuutteesta aiheutuvan tukehtumisen suljetussa tilassa. Hiilidioksidi sekoittuu kuitenkin helposti ilmaan, minkä vuoksi mahdollinen hiilidioksidivuoto olisi haitallista vain vuodon läheisyydessä ja maanpinnanteissa.

Vuotoriskien minimoimiseksi on ensisijaisesti panostettava mahdollisten varastointimuodostumien evaluointiin. Muita mahdollisia ympäristöriskejä aiheutuu lisääntyneestä veden, kemikaalien, energian ja raaka-aineiden kulutuksesta. Näitä riskejä voidaan pienentää panostamalla talteenottoteknologian valintaan ja sovittamiseen. Tekniset monitorointimenetelmät geologisten hiilidioksidivarastojen valvonnassa sekä vuotojen ennustamisessa ovat kehittyneet viime vuosina varmemmiksi, mutta kvantitatiivisten riskianalyyysien teko on vielä vaikeaa. EU pyrkii tulevilla direktiivillä takaamaan turvallisen hiilidioksidin geologisen varastoinnin (katso luku 7.4).

7.2 Varastointipaikan valinta ja varaston pysyvyyden varmistaminen

Tällä hetkellä ei ole standardoituja menetelmiä varastointipaikan karakterisoimiseksi, mutta niitä kehitetään monessa kansainvälisessä projektissa. Karakterisointi vaatii paljon geologista tietoa, josta suurin osa pitää kerätä paikkakohtaisesti. Tietoa kerätään kaivoista, esiintymäpuhkeamista ja porausnäytteistä tiivis-

⁵ Tutkimusryhmän aikaisempien laskelmien mukaan 0,1 %:n vuotuinen vuoto voitaisiin sallia, kun taas 1 % olisi liian paljon (van der Zwaan ja Smekens, 2009).

tekerroksen ja varastointikerroksen karakterisoinniseksi. Seismisiä tutkimuksia tarvitaan maanalaisen geologisen rakenteen sekä sen rakoilun ja siirrosten selvittämiseksi. Muodostuman painemittauksilla kartoitetaan pohjaveden virtaussuuntaa ja -nopeutta. Lisäksi pohjavedestä tarvitaan laatunäytteitä eristyksen sisältävän pohjaveden erottamiseksi muusta pohjavedestä. Varaston käyttäytymistä ennakoidaan mallintamalla. Loppusijotuspaikan valintakriteereihin vaikuttavat ratkaisevasti mahdolliset varastointimekanismit ja geologinen muodostuma, johon varastointia suunnitellaan. Öljy- ja kaasukentistä on olemassa enemmän ja tarkempaa tietoa kuin suolavesikerrostumista. Öljyn- ja kaasunetsintä vaatii useita porausreikiä, joiden tulee olla tiedossa ja jotka on suljettava ennen varastointin aloittamista.

Hiilidioksidin injektoinnin aikana pitää jatkuvasti tarkkailla syöttökaivon toimintaa sekä injektoidun hiilidioksidin painetta, määrää ja sen levittäytymistä muodostumassa. Tässä voidaan hyödyntää samankaltaista teknologiaa kuin öljy- ja kaasuteollisuudessa. Jatkuvan valvonnan lisäksi tarvitaan varasuunnitelma hiilidioksidin siirtämiselle toiseen varastoon.

Öljy- ja kaasukentän sulkemista varten on olemassa tarkkoja, kansallisia sääntöjä ja ohjeita riskien minimoimiseksi. Tavallisesti kentät suljetaan sementillä tai mekaanisella sululla ja sulun toimivuus vahvistetaan mittauksilla. Hiilidioksidivarasto suljettaisiin vastaavilla menetelmillä, mutta sulkemisen jälkeen seuraisi ajanjakso, jonka aikana varaston pysyvyys vahvistettaisiin jatkuvin mittauksin.

7.3 CCS-projektien rahoitus

Nykyään CCS:n soveltaminen voimalaitoksissa ei ole taloudellisesti kannattavaa, koska päästöoikeuden hinta on vielä huomattavasti alhaisempi kuin CCS:n tuottamat lisäkustannukset. IEA:n (2008b) mukaan G8-maiden tavoitteleman kahdenkymmenen täyden mittakaavan CCS-demonstrointilaitoksen toteutus vaatisi 20–40 miljardin euron rahoituksen.

Euroopassa on perustettu CCS:n kehitystä tukeva koalitio nimeltään *European technology platform for zero emission fossil fuel power plants* (ETP ZEP). ETP ZEPin mukaan tarvittaisiin 10–12 suurta demonstraatioprojektia, jotta CCS:stä pystyttäisiin kehittämään kaupallinen vuoteen 2020 mennessä (ETP ZEP 2008). Tämä vaatisi 7–12 miljardia euroa tukea projekteille. EU:n uudessa ilmasto- ja energiapaketissa (katso luku 6.2) tämä on otettu huomioon varaamalla 300 miljoonaa päästöoikeutta tukemaan enintään kahdentoista CCS- tai uusiutuvan energian demonstraatiolaitoksen rakentamista vuoteen 2015 mennessä. Tukea

7. Edellytyksiä CCS:n soveltamiselle

myöntämällä halutaan myös varmistaa CCS-tekniologian edelläkävijyys sekä tekniologian tulevaisuuden vientimahdollisuudet EU:n ulkopuolelle. Myös CCS:n pakollisuudesta tietyissä voimalaitoksissa on keskusteltu, mutta siitä on luovuttu ainakin toistaiseksi. Uudet, nettoteholtaan vähintään 300 MW:n polttolaitokset täytyy kuitenkin rakentaa ns. *capture ready* -periaatteella. Käytännössä tämä tarkoittaa muun muassa riittävän tilan jättämistä CCS:n vaatimille prosesseille sekä CCS:n jälkiasennuksen ja CO₂:n siirtomahdollisuuksien teknisen toteutuksen (esim. siirtoreittivaihtoehdot) arviointia (EC 2008b).

Yhdysvallat, Kanada, Norja ja Australia ovat myös kehittäneet omia mekanismeja CCS:n kehityksen tukemiseksi rahallisesti. Esimerkiksi Kanada avasi äskettäin kahden miljardin ns. CAD-rahaston tukemaan CCS:n kehitysprojekteja. Yhdysvaltojen hallitus puolestaan tukee CCS-demonstraatioprojekteja yli miljardilla USD:lla.

7.4 Lait ja säädökset

Talteenoton suorien kustannuksien lisäksi myös epävarmuudet, jotka liittyvät lähinnä CCS:n taloudelliseen kannattavuuteen, ovat toistaiseksi estäneet investointeja. Esimerkkitapausten puuttuessa muun muassa päästökaupan tarkkailu- ja raportointivaatimusten todelliset kustannukset ovat epäselviä. Hankalia ovat myös vastuukysymykset ja korvaukset mahdollisista vuodoista, erityisesti vuodon aiheuttaessa vakavaa vahinkoa tai sen tapahtuessa kaukana tulevaisuudessa.

Viime vuosina lainsäädäntö on kuitenkin kehittynyt paljon. Esimerkiksi Lontoon yleissopimuksessa sekä OSPAR-yleissopimuksessa, jonka tarkoitus on suojata merellistä ympäristöä ja joka koskee muun muassa jätteiden laskemista mereen, luotiin äskettäin mahdollisuus hiilidioksidin varastoimiselle geologisiin muodostumiin merenpohjan alle. OSPAR-sopimuksessa, joka koskee lähinnä Koillis-Atlantia, kiellettiin hiilidioksidin varastointi vesipatsaaseen ja meren pohjaan, eli käytännössä hiilidioksidin injektointia suoraan mereen ei sopimuksessa sallita.

7.4.1 Päästökauppadirektiivin uudistus

EU:n päästökauppa (*European Union emission trading scheme*, EU ETS) käynnistyi tammikuussa 2005. Voimassa oleva päästökauppadirektiivi edellyttää, että jokainen jäsenvaltio EU:ssa jakaa ilmaiseksi kasvihuonekaasujen päästöoikeuksia päästökaupan piiriin kuuluvalla teollisuudelle. EU hyväksyy tämän ns. kan-

sallisen jakosuunnitelman (NAP), jonka edellytyksenä on Kioton päästövähennystavoitteiden saavuttaminen vuonna 2012. Jos toimija tarvitsee enemmän päästöoikeuksia kuin se on alkujaossa saanut kattamaan sen toteutuneet päästöt, joutuu toimija ostamaan päästöoikeuksia. Vastaavasti toimija voi myydä käyttämättömät päästöoikeutensa. EU:n päästökauppa kattaa nykyään noin 45 % EU:n hiilidioksidipäästöistä ja on maailman suurin päästökauppajärjestelmä.

EU:n päästökauppa uudistuu vuonna 2013, jolloin alkaa päästökaupan kolmas kausi. Markkinoilla olevia päästöoikeuksia on tarkoitus leikata vuosi vuodelta siten, että päästökauppasektorin päästövähennys on 21 % vuoden 2005 päästömääristä vuoteen 2020 mennessä. Päästökauppaa säätelevään direktiiviin on lisätty myös CCS:ään liittyviä kohtia selkeyttämään CCS:n kuulumista päästökaupan piiriin vuodesta 2013 alkaen. Direktiivissä todetaan, että varastoitujen päästöjen päästöoikeuksista ei tarvitsisi luopua, eli päästökaupassa päästöjä kohdeltaisiin kuin niitä ei olisi koskaan päästettykään. Direktiivin mukaan kasvihuonekaasujen talteenotolle, kuljetukselle tai varastoinnille ei kuitenkaan pitäisi jakaa ilmaisia päästöoikeuksia. CCS mainitaan myös yhtenä monista ilmastomuutosta hillitsevistä menetelmistä, joihin päästöoikeuksien huutokaupasta saatavia tuottoja voitaisiin käyttää (EC 2008a).

7.4.2 Geologisen varastoinnin direktiivi

EU:ssa valmistellaan parasta aikaa direktiiviä hiilidioksidin geologista varastointia varten (EC 2008b). Direktiivissä varastoitua hiilidioksidia kohdellaan siten, ettei siitä muodostu päästöjä. Mahdollisesti vuotaneen hiilidioksidin osalta päästöoikeudet on palautettava, eli hiilidioksidin on oltava pysyvästi varastoituneena ja eristettynä ilmakehästä. Varastointi on sallittu jäsenvaltioiden alueilla, niiden talousvyöhykkeillä ja niiden mannerlaatoilla siten kuin ne on määritelty Yhdistyneiden kansakuntien merioikeusyleissopimuksessa (UNCLOS). Varastointi näiden alueiden ulkopuolelle ulottuviin geologisiin muodostumiin ei ole sallittua. Direktiivissä kielletään hiilidioksidin varastointi valtameren veteen.

Direktiivi pyrkii takaamaan turvallisen varastoinnin ja riittävän valvonnan. Kansallisilla viranomaisilla on valta päättää varastointialueen tutkimisen tarpeesta ja tutkimiseen myönnettävistä luvista. Ehdotuksessa on esitetty useita vaatimuksia toiminnanharjoittajille. Erotetun hiilidioksidin tulisi olla niin puhdasta, ettei epäpuhtauksista aiheudu merkittävää riskiä siirto- ja varastointiverkon turvallisuudelle. Jäsenvaltioiden olisi varmistettava, että toiminnanharjoittaja seuraa toiminnan aikana, käyttäytyykö injektoitu hiilidioksidi odotetulla tavalla,

7. Edellytyksiä CCS:n soveltamiselle

tapahtuuko kulkeutumista tai vuotamista ja vahingoittaako mahdollinen havaittu vuoto ympäristöä tai ihmisten terveyttä. Erilaisiin ongelmatilanteisiin, esimerkiksi vuotoihin ja sulkemiseen liittyviin toimiin, varautumiseksi toiminnanharjoittajan tulee hankkia ennen lupahakemusta riittävä rahavakuus tai osoittaa jokin muu vastaava järjestely. Vuototapauksissa päästöoikeuksia tulee palauttaa vuotoa vastaava määrä. Injektoinnin lopettamisen jälkeen toiminnanharjoittajan on edelleen vastattava varaston ylläpidosta, seurannasta, valvonnasta ja raportoinnista. Jos kaikki saatavilla oleva näyttö viittaa siihen, että varastoitu hiilidioksidi pysyy täysin eristettynä määräämättömään tulevaisuuteen, ja toiminnanharjoittaja osoittaa asian oikeanlaisella raportilla, vastuu varastopaikasta ja oikeudellisista velvollisuuksista voidaan siirtää viranomaisille.

Yksi direktiivin tavoitteista on lisätä jäsenmaiden kansalaisten luottamusta CCS:ään. Direktiiviä ei sovelleta tutkimushankkeisiin, joissa aiotaan varastoida vähemmän kuin 100 000 tonnia hiilidioksidia. Direktiivin valmistelussa on hyödynnetty muun muassa vuosien aikana kerättyjä tietokantoja päästölähteistä sekä varastointipaikoista ja niiden kapasiteeteista, joista on kertynyt verrattain laaja tietopohja CCS:n mahdollisuuksista Euroopassa.

7.4.3 Lainsäädännön kehitys muualla

Vaikka EU tällä hetkellä johtaa CCS-lainsäädännön kehitystä, myös kansallisella tasolla tapahtuu paljon. Varsinkin Australiassa ja Isossa-Britanniassa kansalliset CCS-lainsäädännöt ovat kehittyneet nopeasti. Nykyään molemmissa maissa sallitaan hiilidioksidin varastointi merenpohjan alla oleviin geologisiin muodostumiin, ja valtio omistaa oikeudet niihin. Vaikka ohjeita ja säädöksiä vielä työstetään, Australiassa on avattu kymmenen aluetta kenttätutkimusta varten. Australia kehittää myös omaa kansallista päästökauppaa, jonka toivotaan olevan valmis käyttöönottettavaksi vuoteen 2010 mennessä. Yhdysvalloissa on kehitteillä oma liittovaltiotasoinen säännöstö hiilidioksidin varastointiin. Säännöstössä ei oteta kantaa pitkäaikaiseen vastuuseen, koska osavaltion oma tilanne vaikuttaa siihen. Kanadassa happamien kaasujen injektointi ja hiilidioksidi-EOR on jo sallittu muutamassa osavaltiossa, kuten Albertassa, mutta liittovaltiotasoinen säännöstö on kehitteillä myös siellä.

7.5 CCS:n julkinen hyväksyttävyyys

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on huomioitu kansainvälisesti varteenotettavana menetelmänä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Julkinen mielipide on erittäin tärkeä CCS:n soveltamisen kannalta. Tällä hetkellä julkinen tietämys CCS:stä on vähäistä, minkä vuoksi myös valtiolliset CCS:n tukiohjelmat ovat saaneet huonosti julkista tukea. Suurelle yleisölle ei ole vielä muodostunut vankkaa mielipidettä CCS:stä ja sen arvosta ilmastonmuutoksen hillitsemismenetelmänä. Kuitenkin on jo muutamia tapauksia, joissa paikalliset asukkaat ovat vastustaneet ja siten hidastaneet CCS-projektien etenemistä. Vastustus on yleensä liittynyt suunnitelmiin, joissa hiilidioksidivaraston sijainti on ollut lähellä asuttuja alueita.

Myös ympäristöjärjestöillä on eriäviä mielipiteitä CCS:stä. Maailman luonnonsäätiö WWF on Australiassa puhunut CCS:n koordinoituneen kehittämisen puolesta. Samalla WWF on painottanut tarvetta kehittää parempia valvonta- ja verifiointimenetelmiä turvallisen varastoinnin takaamiseksi. Greenpeace taas näkee CCS:n energiayritysten menetelmänä saada ympäristöystävällisempi maine ja samalla jatkaa investoimista hiilivoimaan.

Jotta julkista keskustelua voidaan rakentavasti kehittää, on tärkeää saada välitetyksi puolueetonta tietoa CCS:stä yleisölle ja eri sidosryhmille.

8. Demonstraatioprosjektit

Hiilidioksidia varastoidaan geologisiin muodostumiin tällä hetkellä vain muutamassa teollisen mittakaavan⁶ sovellutuksessa. Kolmessa näistä projekteista hiilidioksidi erotetaan maakaasutuotannon yhteydessä (Pohjanmerellä, Barentsinmerellä ja Algeriassa) ja yhdessä talteen otettu hiilidioksidi injektoidaan tehostettua öljyntuotantoa varten (Kanadassa). Suomea lähimmät aktiiviset hiilidioksidin varastointipaikat ovat norjalaisen öljy-yhtiö StatoilHydron omistamat Sleipnerin ja Snøhvitin kentät (Kuva 15). Näiden lisäksi on useita pienempiä projekteja, joissa testataan kehitysmielessä vain tiettyä CCS:n osa-aluetta.

Seuraavan kymmenen vuoden aikana teollisen mittakaavan CCS-projektit tulevat lisääntymään huomattavasti, koska kymmeniä projekteja valmistellaan paraikaa. Seuraavaksi esitellään tällä hetkellä toiminnassa olevat teollisen mittakaavan CCS-sovellukset. Tämän lisäksi esitellään Euroopassa toiminnassa olevat pienemmän mittakaavan CCS-projektit ja suomalaiset CCS:ään liittyvät aktiviteetit.

8.1 Sleipner

StatoilHydronin projektissa erotetaan 1 Mt CO₂:a vuodessa maakaasutuotannon yhteydessä Sleipner Vest -kentällä. Hiilidioksidi varastoidaan Utsira-nimiseen suolavesikerrostumaan, joka sijaitsee yli 800 metriä merenpohjan alla (Kuva 16). Maakaasu Sleipner Vest -kentässä sisältää 9 % CO₂:a. Erotusprosessi perustuu amiinierotustekniikkaan. Projektin suunnitteluvaiheessa oli haasteellista saada

⁶ Teollisen mittakaavan CCS-sovellutuksilla tarkoitetaan yleensä sovellutuksia, joissa käsitellään vuositasolla noin puoli miljoonaa tonnia hiilidioksidia tai enemmän.

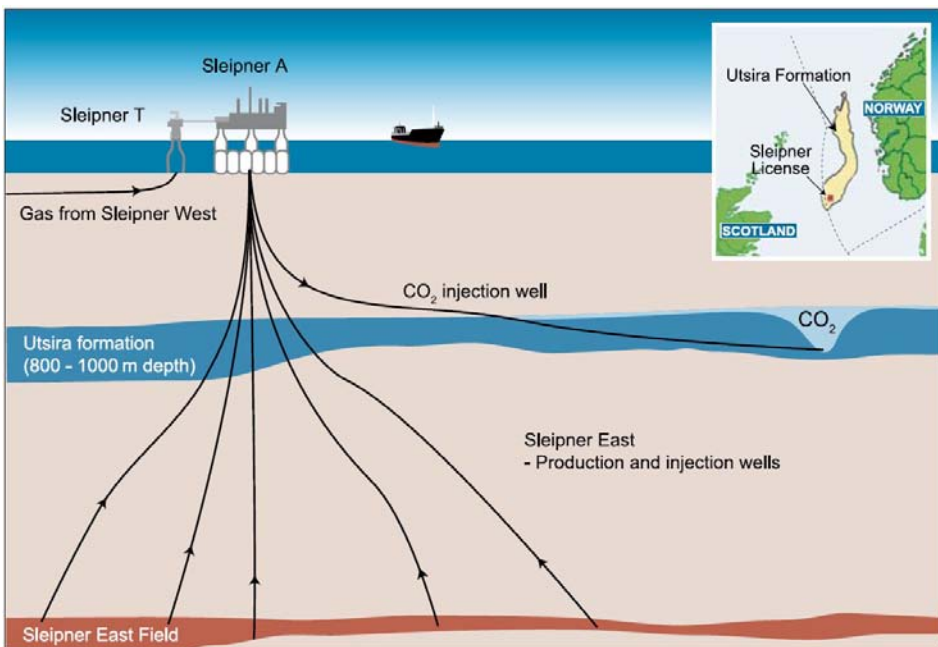
erotuslaitos mahtumaan *offshore*-kaasunporauslautalle. Tavallisesti hiilidioksidia erotetaan maakaasusta puhtausvaatimusten takia ja sitä päästetään ilmaan. Hiilidioksidin paineistamisesta ja injektoinnista aiheutuneet lisäkustannukset olivat noin 100 miljoonaa USD:a, mutta hiilidioksidia varastoimalla vältetään Norjan hiilidioksidipäästövero *offshore*-laitoksille (nykyään n. 50 USD/CO₂-tonni). Projekti on ollut toiminnassa vuodesta 1996, ja tähän asti noin 10 Mt CO₂:a on varastoitu. Hiilidioksidin leviämistä merenpohjan alaisissa geologisissa rakenteissa on kartoitettu useassa EU:n osittain rahoittamassa tutkimusprojektissa. Kerrostumaa monitoroidaan jatkuvasti seismologisilla menetelmillä ja mallinustyökaluilla.



Kuva 15. Käynnissä olevat CCS-projektit Pohjois-Euroopassa. Vihreä merkki esittää varastointilaitoksia ja punainen talteenottovoimalaitoksia. Numeroarvot esittävät injektoidut vuosittaiset hiilidioksidimäärät.

8. Demonstraatiopojektit

Utsira-muodostuma on osoittautunut hyväksi varastointimuodostumaksi. Utsira on erityisen laaja hiekkakivikerrostuma, joka on 400 kilometriä pitkä (pohjoisesta etelään), 50–100 kilometriä leveä ja pinta-alaltaan 26 000 neliökilometriä. Kerrostuma sijaitsee 700–1 000 metrin syvyydellä merenpinnasta, ja sen paksuus on 200–300 metriä. Heti muodostuman yläpuolella on noin 200 metrin paksuinen läpäisemätön kivikerros, ja sen yläpuolella on vielä 500 metrin hienorakeinen kerros. Utsira-muodostuma täyttää hyvin varastomuodostuman huokoisuutta, läpäisevyyttä, eristyskapasiteettia ja varastokapasiteettia koskevat kriteerit. On laskettu, että Utsiran muodostumaan mahtuisi 30 Gt CO₂:a (Chadwick et al. 2007). Sleipner-projektin puitteissa aiotaan kuitenkin varastoida vain 20 Mt CO₂:a, josta suurin piirtein puolet on jo injektoitu.



Kuva 16. Yksinkertaistettu kuva Sleipner-projektista, jossa CO₂ erotetaan maakaasusta ja varastoidaan Utsira-muodostumaan (IPCC 2005).

8.2 Weyburn-Midale

Encana ja *International Energy Agency* (IEA) alkoivat vuonna 2000 varastoida hiilidioksidia Kanadan Weyburnin öljykenttään öljyntuotannon tehostamisen

yhteydessä. Hiilidioksidi, joka on North Dakotassa Yhdysvalloissa sijaitsevan hiilen kaasutuslaitoksen sivutuote, kuljetetaan 320 kilometriä pitkällä putkella pumpattavaksi Weyburnin ja Midalen öljykentille. Alentamalla öljyn viskositeettia hiilidioksidin avulla saadaan öljykentillä tuotettua noin 34 % enemmän öljyä. On arvioitu, että projektin päättyessä vuonna 2011 tällä menetelmällä olisi öljykenttiin saatu varastoitua 30 Mt CO₂:a. Kansainvälinen konsortio kehittää kentällä kaupallisen öljyntuotantotoiminnan ohella tehokkaampia mittaus-, valvonta- ja verifiointimenetelmiä sekä riskien arviointimenetelmiä hiilidioksidin varastointiin.

8.3 In Salah

Sonatrachin, BP:n ja StatoilHydron projektissa Algeriassa hiilidioksidia erotetaan maakaasutuotannon yhteydessä vastaavista syistä kuin Sleipnerin projektissa. In Salahin kaasukentän maakaasu sisältää 10 % hiilidioksidia, jota otetaan talteen amiiniprosessin avulla. Hiilidioksidia injektoidaan 1 800 metrin syvyyteen maanpinnan alle suolavesikerrostumaan, joka sijaitsee kaasukentän alla. Kaasukentän yläpuolella sijaitsee lähes kilometrin paksuinen kerros mutakiveä, joka toimii varaston sulkuna. Varastoidun hiilidioksidin määrä vuodessa on lisääntynyt 186 kilotonnista vuonna 2004 687 kilotonniin vuonna 2007. Tarkoitus on kasvattaa injektoitava CO₂-määrä vuodessa 1,2 miljoonaan tonniin.

8.4 Snøhvit

StatoilHydron uusimmassa projektissa erotetaan hiilidioksidia nesteytetyn maakaasun tuotannon yhteydessä. Maakaasua tuotetaan merenpohjassa toimivilla pumppauslaitoksilla ja toimitetaan 145 kilometrin pituisista monifaasikuljetusputkea pitkin Snøhvit-kentältä tuotantolaitokselle Melkøyan saarelle Hammerfestin lähelle. Tuotantolaitoksella maakaasu nesteytetään jäähdyttämällä se lämpötilaan -163 °C, minkä jälkeen se kuljetetaan säiliöaluksilla Eurooppaan ja Yhdysvaltoihin. Kuten Sleipnerin ja In Salahin myös Snøhvit-kentän maakaasun hiilidioksidipitoisuus on liian suuri, joten hiilidioksidi on erotettava ennen nesteytystä. Myös hiilivetyjä on erotettava hiilidioksidikaasusta aikaisessa vaiheessa prosessia, jottei kaasuseos jäädy. Toinen kuljetusputki kuljettaa hiilidioksidia takaisin Snøhvit-kentälle, missä sitä injektoidaan Tubåenin huokoiseen hiekkakivikerrostumaan 2500 metriä merenpohjan alle. Tarkoitus on varastoida yli 0,7 Mt CO₂:a vuodessa. Maakaasuntuotanto alkoi lokakuussa 2007 ja varastointi huhtikuussa

8. Demonstraatioprojektit

2008. Lisäksi on perustettu EU:n rahoittama monitorointiohjelma tutkimaan hiilidioksidin käyttäytymistä kerrostumassa.

8.5 K-12B

K12-B-nimisellä kaasukentällä (150 km luoteeseen Alankomaiden rannikosta) on tuotettu maakaasua vuodesta 1987 lähtien. Maakaasun sisältämä hiilidioksidi on aikaisemmin erotettu ja päästetty ilmaan, mutta muutama vuosi sitten CO₂-kaasua on aloitettu injektoida (20 000 tonnia vuodessa) takaisin melkein ehtyneeseen maakaasukenttään 4 000 metrin syvyyteen. Hollannin talousministeriön, Gaz de France Production Nederland B.V.:n ja TNO:n rahoittamassa projektissa tutkitaan hiilidioksidin injektoinnin ja varastoinnin kannattavuutta ehtyneissä kaasukentissä sekä injektoidun hiilidioksidin monitorointia ja verifointia.

8.6 Ketzin

CO₂SINK-projektissa tutkitaan pilottilaitoksessa hiilidioksidin injektointia ja varastointia suolavesikerrostumaan. Yhteensä 60 000 t hiilidioksidia tullaan injektoidaan kahden vuoden aikana suolavesikerrostumaan 600–800 metrin syvyyteen alueella, joka sijaitsee mantereella Berliinin länsipuolella. Projekti käynnistyi huhtikuussa 2004 ja heinäkuussa 2008 alkoi injektointi.

8.7 Schwarze Pumpe

Vattenfallin pilottilaitos avattiin Schwarze Pumpella syyskuussa 2008. Voimalaitoksen teho on 30 MW_{th}, ja laitos käyttää happipolttua polttoprosessissa syntyvän hiilidioksidin talteenottoon. Talteen otettu hiilidioksidi (n. 60 000 t vuodessa) tullaan varastoimaan Altmarkin ehtyneeseen kaasukenttään. Hiilidioksidi tullaan sen suhteellisen pienen määrän vuoksi kuljettamaan kuorma-autoilla. Vattenfallin voimalaitos on tähän asti suurin toteutettu happipolttoon perustuva voimalaitos. Voimalaitosta käytetään lähinnä happipolttoteknologian kehittämiseen, ja pilotoinnin jatkoksi on suunnitteilla 250–300 MW:n happipolttodemonstrointi Jämschwalden laitoksella vuosina 2012–2015 sekä 1 000 MW:n happipolttolaitos vuosina 2015–2020.

8.8 Aktiviteetit Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä useita hiilidioksidin tuotantolaitoksia, joissa hiilidioksidi otetaan talteen ja puhdistetaan teollisuuskäyttöä varten. Yksi Euroopan suurimmista hiilidioksidintuotantolaitoksista sijaitsee Kilpilahdessa, Porvoossa. Laitos on Linde Gas AGA:n omistuksessa, ja se tuottaa 0,4 Mt CO₂:a vuosittain ottamalla hiilidioksidia talteen Neste Oilin vedyntuotantoprosessista. Vetyä valmistetaan Kilpilahdessa maakaasusta höyryrefoimoimalla. Tuotetusta hiilidioksidista 120 000 t käytetään Suomessa ja loput myydään Pohjoismaihin sekä Baltiaan, Venäjään ja Puolaan. Suurimmassa osassa käyttökohteista hiilidioksidi päätyy kuitenkin lopuksi ilmakehään.

Fortum ja Teollisuuden voima (TVO) ovat käynnistäneet projektin, jossa sovelletaan hiilidioksidin talteenottoa Meri-Porin lauhdevoimalaitoksella. Meri-Pori on Suomen suurin ja nykyaikaisin kivihiiivoimalaitos. Laitos on valmistunut vuonna 1994, ja sen sähköteho on 560 MW. Tällä hetkellä selvitetään vaihtoehtoisia CCS-prosesseja, minkä jälkeen aletaan suunnitella valitun talteenotto-tekniikan soveltamista voimalaitoksella. Tavoitteena on, että investointipäätös tehdään vuonna 2011, jolloin järjestelmä olisi käytössä Meri-Porissa vuonna 2015. Suunnitteilla on myös, että hiilidioksidi laivataan ja varastoidaan ulkomaille. Hankkeelle haetaan EU:n demonstraatiotukea.

Pohjolan voima (PVO) kehittää uutta laajamittaista (500–700 MWe) voimalaitoskonseptia, joka sallii monen eri polttoaineen rinnakkaiskäytön. Konsepti sallii voimalaitoksen käytön joko sähkön ja lämmön yhteistuotantoon tai ainoastaan sähköntuotantoon, tarpeesta riippuen. Konseptiin kuuluu valmius soveltaa hiilidioksidin talteenottoa. Kehitystyössä on mukana PVO:n lisäksi useita kumppaneita teollisuudesta ja tutkimuslaitoksista. Tavoitteena on, että konsepti olisi käytössä vuonna 2015.

VTT on aktiivisesti mukana kehittämässä CCS:ää. VTT:n koordinoimassa TEKES-projektissa tutkittiin happipolttokonsepteja vuosina 2006–2009. Toisessa projektissa tutkitaan CCS:ää Suomen olosuhteissa. Kyseisen projektin tavoitteena on myös CCS:n tuntemuksen lisääminen sekä suunnitelman (*road-mapin*) kehittäminen CCS:n soveltamiselle Suomessa. VTT ja Foster Wheeler Energia Oy ovat vuodesta 2004 lähtien kehittäneet yhdessä happipolttoa kiertoileijupetikattiloita varten (*circulating fluidized bed*, CFB). Todennäköisesti maailman ensimmäiset onnistuneet happipolttokokeet CFB-olosuhteissa suoritettiin VTT:n koelaitoksella vuonna 2005. VTT:llä tutkitaan ja kehitetään myös muita teknologioita liittyen CCS:ään, kuten hapen kantajiin perustuvaa polttoa (CLC).

8. Demonstraatiopojektit

Åbo Akademissa ja Teknillisessä korkeakoulussa on vuodesta 2000 lähtien tutkittu mineraalien ja teollisuuden sivutuotteiden karbonointia hiilidioksidin vaihtoehtoisena varastointimenetelmänä (katso luku 4.3). Myöhemmin mukaan ovat liittyneet Geologian tutkimuskeskus ja Turun yliopisto. Vaikka karbonointi ei ole vielä kannattava varastointimenetelmä, on Suomessa onnistuttu rakentamaan kansainvälisesti arvostettua tieteellistä osaamista aiheesta.

Suomi osallistuu aktiivisesti kansainvälisiin, CCS:ään liittyviin verkostoihin. Esimerkiksi Suomen edustajia löytyy sekä IEA:n *Greenhouse Gas Programmen* että ETP ZEP:n johtoryhmistä (katso luku 7.3).

9. Yhteenveto

Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia pidetään yhtenä potentiaalisimmista menetelmistä hidastaa ilmastonmuutosta uusiutuvan energian, ydinvoiman, energiasäästön ja energiatehokkuuden parantamisen ohessa. Toisin kuin muut edellä mainitut menetelmät, CCS-teknologia ei ole vielä tarpeeksi pitkälle kehitettyä, eikä se todennäköisesti tule olemaan valmis laajaa käyttöönottoa varten ennen vuotta 2030. CCS:n kehittämistä ja nopeampaa käyttöönottoa varten olisi tärkeää luoda kansainvälisiä säädöksiä ja taloudellisia kannustimia. Ensimmäisten demonstraatiovoimalaitosten avulla CCS-teknologia kehittynee energia- ja kustannustehokkaammaksi.

Useissa yhteyksissä, muun muassa IPCC:n vuoden 2007 raportissa, CCS nähdään eräänlaisena välivaiheen ratkaisuna, joka olisi käytössä seuraavan sadan vuoden ajan. Tämä johtuu pääosin siitä, että CCS:n hyötysuhde on tällä hetkellä melko heikko ja energiavaroja tuhlaava. Myös hiilidioksidin varastoinnin pysyvyyteen, vastuisiin ja vakuuksiin saattaa liittyä ongelmia. CCS:n todellinen hyöty ilmastonmuutoksen hillinnässä riippuu siitä, miten laajasti CCS-teknikat otetaan käyttöön.

Suomen kannalta voisi olla kannattavaa soveltaa CCS:ää sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Jotta CCS:ää kannattaisi soveltaa biomassalle, tämä mahdollisuus pitäisi saada sisällytettyä EU:n päästökauppaan. Säädösten ja kannustimien lisäksi on myös tärkeää kehittää yhteinen hiilidioksidin kuljetusinfrastruktuuri. Lähellä sijaitseva ja riittävä varastointikapasiteetti on erittäin tärkeä CCS:n kannattavuutta ajatellen. Tämä on erittäin oleellista Suomen kannalta, koska hiilidioksidia jouduttaisiin todennäköisimmin varastoimaan maan rajojen ulkopuolelle.

Lähdeluettelo

- Aatos S., Sorjonen-Ward, P., Kontinen, A., Kuivasaari, T., 2006. Serpentiinin ja serpentiinin hyötykäyttökäymiä. Geologinen tutkimuskeskus, Raportti Nro. M10.1/2006/3, Kuopio, Finland.
- Alcoa 2005. Using One Process Waste to Neutralize Another. Tiedote Alcoan kotisivulla. http://www.alcoa.com/global/en/about_alcoa/sustainability/case_studies/2005/kwinana_alumina_refinery.asp (viitattu 17.09.2009).
- Aspelund A., Mølnvik M. J., de Koeijer G., 2006: Ship Transport of CO₂: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO₂ emissions, Chemical Engineering Research and Design, Volume 84, 847–855.
- Aspelund A. & Jordal K., 2007: Gas conditioning – The interface between CO₂ capture and transport, Int. J. Greenhouse Gas Control, doi: 10.1016/S1750-5836(07)00040-0.
- 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.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., Zweigel, P. (eds), 2007. Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers – Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects, 273 p. <http://www.co2store.org> (viitattu 11.12.2008).
- CSA Group, 2008. Assessment of the all island potential for geological storage of carbon dioxide in Ireland. CSA Group, Ireland, in association with Byrne O Cleririgh, Ireland; British Geological Survey, UK and CO₂CRC, Australia. Report number RPT08-1260, 144 p. <http://www.co2crc.com.au/publications/> (viitattu 9.12.2008).
- CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum), 2007: Estimation of CO₂ storage capacity in geological media, June 2007, 43 s.

<http://www.cslforum.org/documents/PhaseIIreportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf> (viitattu 9.12.2008).

de Visser E., Hendriks C., Barrio M., Mølnvik M. J., de Koeijer G., Liljemark S., Le Gallo Y., 2008: Dynamis CO₂ quality recommendations, *Int. J. Greenhouse Gas Control* 2, 478–484.

de Visser E. & Hendriks C. H., 2009: CO₂ quality recommendations. Dynamis-Hypogen project: Deliverable D 3.1.3 http://www.dynamis-hypogen.com/publications/public_reports.htm (viitattu 24.9.2009).

DOE (U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy), 2008: Carbon Sequestration Atlas of United States and Canada, 86 p.
http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/atlas/index.html (viitattu 19.8.2009).

EC 2008a. Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/87/EY muuttamisesta kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kauppaa koskevan yhteisön järjestelmän parantamiseksi ja laajentamiseksi. KOM(2008) 16 lopullinen, Bryssel 23.1.2008.

EC 2008b. Ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi hiilidioksidin geologisesta varastoinnista ja neuvoston direktiivien 85/337/ETY ja 96/61/EY, direktiivien 2000/60/EY, 2001/80/EY, 2004/35/EY ja 2006/12/EY sekä asetuksen (EY) N:o 1013/2006 muuttamisesta. KOM(2008) 18 lopullinen, Bryssel 23.1.2008.

ETP ZEP 2008. EU Demonstration Programme for CO₂ Capture and Storage (CCS) - ZEP's Proposal. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (ETP ZEP), <http://www.zero-emissionplatform.eu> (viitattu 17.2.2009).

IEA 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. International Energy Agency, OECD/IEA, Paris.

IEA 2008a. CO₂ capture and storage – A key carbon abatement option. International Energy Agency, OECD/IEA 2008, 261 s.

IEA 2008b. Energy Technology Perspectives: Scenarios and strategies to 2050. International Energy Agency, OECD/IEA, Paris.

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: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Koljonen T., Siikavirta H., Zevenhoven R., Savolainen I, 2004. CO₂ capture, storage and re-use potential in Finland, *Energy* 29, 1521–1527.
- Koljonen, T., Ronde, H., Lehtilä, A., Ekholm, T., Savolainen, I. & Syri, S. 2008. Greenhouse gas emission mitigation and energy security – Scenario results and practical programmes in some Asian countries. Proceedings of the 2nd IAEE Asian Conference, 5–7 November, Perth, Australia.
- Koljonen, T., Flyktman, M., Lehtilä, A., Pahkala, K., Peltola, E. & Savolainen, I. 2009. The role of CCS and renewables in tackling climate change. *Energy Procedia* 1(1), 4323–4330.
- Lindeberg, E. 2003. The quality of a CO₂ repository: What is the sufficient retention time of CO₂ stored underground? Proceeding of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Edited by J. Gale and Y. Kaya, Vol I, s. 255–266.
- McKinsey & Company 2008. Carbon Capture and Storage: Assessing the Economics. http://www.mckinsey.com/clientservice/ccsi/pdf/CCS_Assessing_the_Economics.pdf (viitattu 9.10.2008).
- Pipiton G., Bolland O., 2009: Power generation with CO₂ capture: Technology for CO₂ purification, *Int. J. Greenhouse Gas Control*, doi:10.1016/j.ijggc.2009.03.001.
- Stern, N., 2007. The economics of climate change: the Stern review. Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-70080-1, 692 s.
- Teir, S., Aatos, S., Isomäki, O-P., Kontinen, A., Zevenhoven, R., 2006. Silikaattimineraalien karbonoiminen hiilidioksidin loppusijoitusmenetelmänä Suomen oloissa. *Vuorimiesyhdistys. Materia*, 1/2006, 40–46.
- TEM 2009. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian esittely 6.11.2008. Tiedotustilaisuus, VN:n linnan tiedotustila. http://www.tem.fi/files/20604/PAIES_esittely_06112008-update.ppt (viitattu 28.1.2009).
- Tilastokeskus 2008. Tilastokeskuksen tiedote: Vuoden 2007 kasvihuonekaasupäästöt noin 10 % Kioton tavoitetason yläpuolella. Julkaistu 12.12.2008.

http://www.stat.fi/til/khki/2007/khki_2007_2008-12-12_tie_001_fi.html
(viitattu 28.1.2009).

Tilastokeskus 2009. Polttoaineiden käyttö sähkön ja lämmön tuotannossa yhteensä 2006–2007. http://www.stat.fi/til/salatu/2007/salatu_2007_2008-09-26_kuv_012.html (viitattu 28.1.2009).

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

van der Zwaan B. & Gerlagh R., 2009. Effectiveness of CCS with time-dependent CO₂ leakage. *Energy Procedia* 1, 4977-4984. Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9), 16-20 November 2008, Washington, USA.

van der Zwaan B. & Smekens K., 2009. CO₂ Capture and Storage with Leakage in an Energy-Climate Model. *Environmental Modelling and Assessment*, 14, 135–148.

Vangkilde-Pedersen T., Kirk K., Smith N., Maurand N., Wojcicki A., Neele F., Hendriks C., Le Nindre Y.-M., Anthonsen K. L., 2009. EU Geocapacity – Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. D42 GeoCapacity Final Report. <http://www.geology.cz/geocapacity/publications> (viitattu 24.9.2009).



Julkaisun sarja, numero ja
raporttikoodi

VTT Tiedotteita 2503
VTT-TIED-2503

Tekijä(t) Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen, Soile Aatos		
Nimeke Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS)		
Tiivistelmä Hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (<i>carbon capture and storage</i> , CCS) pidetään kansainvälisesti yhtenä merkittävimmistä tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinoista. Menetelmä perustuu hiilidioksidin talteen ottamiseen voimalaitoksissa tai teollisuuslaitoksissa, minkä jälkeen hiilidioksidi puhdistetaan, puristetaan kokoon ja kuljetetaan pitkäaikaiseen säilytykseen putkiston tai säiliöalusten avulla. Suuret maanalaiset geologiset muodostumat, kuten ehtyneet öljy- ja kaasukentät sekä suolavesikerrostumat, ovat lupaavimpia varastointipaikkoja hiilidioksidille, mutta jokaisen muodostuman soveltuvuus pitkäaikaiseen varastointiin on tutkittava erikseen. CCS-teknologia perustuu osittain kemianteollisuudessa sekä öljy- ja kaasuteollisuudessa käytössä olevaan teknologiaan. Hiilidioksidia otetaan talteen ja varastoidaan jo muutama massa demonstraatioprojektissa öljy- ja kaasutuotannon yhteydessä, mutta teknologiaa ei ole vielä sovellettu kaupallisen kokoluokan laitoksiin. Menetelmän erityisinä haasteina ovat suuret talteen otettavat hiilidioksidimäärät, hiilidioksidin pitkäaikaiseen varastointiin liittyvät epävarmuudet ja vastuukysymykset sekä teknologian kalleus. Tekniikan ja talouden lisäksi tarvitaan kansainvälisten säännösten kehittämistä CCS:n laajamittaista soveltamista varten. EU:n ilmasto- ja energiapaketin myötä kiinnostus hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin on herännyt myös Suomessa, vaikka Suomen maankamara ei olekaan geologisesti suotuisa varastointiin. CCS nähdäänkin Suomessa erityises-ti teknologiaviennin mahdollisuutena. CCS:n todellinen hyöty ilmastonmuutoksen hillinnässä riippuu siitä, miten laajasti CCS-teknikat tullaan ottamaan käyttöön maailmanlaajuisesti. Tämän tiedotteen tarkoitus on antaa yleiskäsitys CCS:stä globaalisti sekä Suomen näkökulmasta katsottuna.		
ISBN 978-951-38-7324-0 (nid.) 978-951-38-7325-7 (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
Julkaisu-aika Lokakuu 2009	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivu- 61 s.
Projektin nimi CCS:n soveltaminen Suomen olosuhteissa		Toimeksiantaja(t)
Avainsanat CCS, hiilidioksidi, talteenotto, varastointi, ilmastonmuutos, hillintä		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374



Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2503
VTT-TIED-2503

Author(s) Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen & Soile Aatos		
Title Carbon capture and storage (CCS)		
Abstract Carbon capture and storage (CCS) is internationally considered as one of the most significant future measures for reducing carbon dioxide emissions. The method is based on capture of carbon dioxide from power plants or industrial facilities, after which carbon dioxide is purified, compressed and transported by pipelines or tanker ships for long-term storage. Large underground geological formations, such as depleted oil and gas field as well as saline aquifers, are the most promising places for storing carbon dioxide, but the suitability of each formation has to be individually determined. Carbon capture and storage technology is partially based on existing technology used by the chemical industry as well as by the oil and gas industry. Carbon dioxide is captured and stored already in a number of demonstration projects in conjunction with oil and gas production, but the technology has not yet been implemented in commercial-scale power plants. Some of the specific challenges of the method are the large amounts of carbon dioxide that needs to be captured, uncertainties and liability issues with long-term storage of carbon dioxide, and the high level of costs for the technology. In addition to technology and economy also the development of international regulations is required for large-scale deployment of CCS. Due to EU's climate action and renewable energy the interest in carbon capture and storage has awakened also in Finland, although Finnish geology is not favorable for storage of carbon dioxide. The development of CCS is especially seen in Finland as a possibility for export of technology. The real benefit of CCS in mitigating the climate change will depend on how widely CCS-technology is deployed world-wide. The purpose of this report is to give a general idea of CCS, both from a global and a Finnish perspective.		
ISBN 978-951-38-7324-0 (soft back ed.) 978-951-38-7325-7 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 23116
Date October 2009	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 61 p.
Name of project Application of CCS in Finland		Commissioned by
Keywords CCS, carbon dioxide, capture, storage, climate change, mitigation		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

VTT Tiedotteita - Research Notes

- 2485 Marita Hietikko, Timo Malm & Jarmo Alanen. Koneiden ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus. Ohjeita ja työkaluja standardien mukaisen turvallisuusprosessin luomiseen. 2009. 75 s. + liitt. 14 s.
- 2486 Helena Järnström, Sirje Vares & Miimu Airaksinen. Semi volatile organic compounds and flame retardants. Occurrence in indoor environments and risk assessment for indoor exposure. 2009. 58 p. + app. 8 p.
- 2487 Tiina Koljonen, Juha Forsström, Veikko Kekkonen, Göran Koreneff, Maija Ruska, Lassi Similä, Katri Pakkala, Laura Solanko & Iikka Korhonen. Suomalaisen energiateollisuuden kilpailukyky ilmastopolitiikan muuttuessa. 2008. 88 s.
- 2488 Sami Karjalainen. Talotekniikan käytettävyys ja sen kehittäminen. Kohti helpokäyttöisyyttä. 2009. 47 s. + liitt. 3 s.
- 2490 Tiina Apilo, Henri Hytönen & Katri Valkokari. Arvonluonnin uudet muodot ja verkostot 2009. 94 s.
- 2491 Kirsi Aaltonen, Mervi Murtonen & Sampo Tukiainen. Three perspectives to global projects. Managing risks in multicultural project networks. 2009. 47 p. + app. 4 p.
- 2492 Tuomo Tuikka & Minna Isomursu (eds.). Touch the Future with a Smart Touch. 2009. 280 p.
- 2493 Hannele Holttinen, Peter Meibom, Antje Orths et al. Design and operation of power systems with large amounts of wind power. Final report, IEA WIND Task 25, Phase one 2006–2008. 2009. 200 p. + app. 29 p.
- 2494 Marjaana Rättö, Minna Vikman & Matti Siika-aho. Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen biojalostamossa. 2009. 64 s.
- 2496 Mona Arnold. Reduction and monitoring of biogas trace compounds. 2009. 75 p. + app. 5 p.
- 2497 Tuula Hakkarainen, Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka, Teemu Karhula, Terhi Kling, Johan Mangs, Esko Mikkola & Tuuli Oksanen. Survivability for ships in case of fire. Final report of SURSHIP-FIRE project. 2009. 120 p. + app. 7 p.
- 2498 Eveliina Saari, Heli Riikonen, Sirkku Kivisaari & Annika Heikkilä. Jyväskylän uudet päivähoitoratkaisut. 2009. 37 s. + liitt. 2 s.
- 2499 Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. 2009. 75 s. + liitt. 19 s.
- 2501 Jari Konttinen, Nina Suvinen & Mika Nieminen. Välittäjäorganisaatiot tutkimuslähtöisen yritystoiminnan edistäjänä. 2009. 74 s.
- 2503 Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen, Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). 2009. 61 s.