

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

HIILIDIOKSIDIN VARASTOINTI

Carbon Storage

Tervakoskella 30.4.2021

Jussi Lähtenmäki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Jussi Lähteenmäki

Hiilidioksidin varastointi

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Dosentti Jouni Ritvanen

Ohjaaja: Dosentti Jouni Ritvanen

37 sivua, 5 taulukkoa, 13 kuvaa ja 4 yhtälö

Hakusanat: hiilidioksidin varastointi, CCS, CCUS, BECCS

Tämä kandidaatintyö perehtyy hiilidioksidin varastoinnin tekniseen valmiuteen, jota peilataan koko hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiketjun soveltuvuuteen taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Työssä tutkitaan erityisesti geologisten muodostumien toimivuutta hiilidioksidin varastointikohteena. Tavoitteena oli tuottaa kirjallisuuskatsaus, jossa puolueettomasti esitetään hiilidioksidin varastoinnin nykytilanne ja vähennetään kansalaisten mahdollisia ennakkoluuloja.

Hiilidioksidin eri varastointitavoista ja -mekanismeista sekä niiden luotettavuudesta on saatu tietoa muutaman vuosikymmenen aikana suoritettujen erilaisten käytännön sekä laskennallisten tutkimusten avulla. Ne ovat osoittaneet hiilidioksidin geologisen varastoinnin mahdolliseksi alle 0,01 %:n vuotuisella vuodolla, kun pitoaika on vähintään sata vuotta. On pystytty toteamaan geologisen muodostuman varastointikyvyn parantuvan varastointiajan pidentyessä. Tämä voidaan perustella varastointimekanismien vaikutusten muuttumisella ajan kuluessa. Luonnonilmiöiden, kuten vuoroveden, on todettu myös vaikuttavan varastointikykyyn. Työn merkittävin tulos on, että hyvin valvottu geologinen muodostuma on soveltuva hiilidioksidin turvalliseen varastointiin, kun varastointiaika on tarpeeksi pitkä.

Varastointi vaatii tulevaisuudessa vielä lisätöitä eli se edellyttää yksityiskohtaista ymmärrystä mahdollisten varastointikohteiden kapasiteeteista, hallinnasta, injektoitavuudesta sekä kaupallisuus- ja kustannuspuolista. Myös poliittisen sääntelyn, yhteiskunnan kehityksen ja esimerkiksi päästöoikeuksien hintojen kehityksen vaikutukset on ymmärrettävä.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	ILMAKEHÄN HIILIDIOKSIDIPITOISUUDEN VÄHENTÄMISEN MERKITYS ..	8
2.1	Negatiiviset päästöt	9
3	HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO	10
3.1	Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista	11
3.1.1	Calcium looping	11
3.2	Hiilidioksidin talteenotto polttoaineesta	12
3.3	Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla	13
4	HIILIDIOKSIDIN GEOLOGINEN VARASTOINTI	16
4.1	Varastointimekanismit	16
4.2	Tutkimukset	19
4.2.1	Hiilidioksidin geologisen varastointiturvallisuuden arviointi	20
4.2.2	Suuren mittakaavan CO ₂ -vuotojen mallintaminen Pohjanmerellä	23
4.2.3	CO ₂ -vuoto sedimentin läpi merenpohjan alaisesta varastosta	25
4.2.4	In Salah	27
4.2.5	Ketzin	27
4.2.6	Weyburn-Midale	28
4.3	Monitorointi	28
4.3.1	Monitorointitekniikat	29
4.4	Potentiaali	31
4.4.1	Enhanced Oil Recovery (EOR)	32
4.5	Toiminnassa olevia varastoinnin kehitysprojekteja	34
4.5.1	SENSE	34
4.5.2	REX-CO ₂	35
4.6	Tulevaisuus	35
5	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET	38

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

Δ	muutos	-
η	hyötysuhde	%

Lyhenteet

ASU	<i>Air Separation Unit</i> eli hapentuotantoyksikkö/happitehdas
BECCS	<i>Bio-Energy with Carbon Capture and Storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi biopohjaisesta energiantuotannosta
CaL	<i>Calcium looping</i> eli kalsiumin kiertoon perustuva talteenottotekniikka
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilisation and Storage</i> eli hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi
CO ₂ e	hiilidioksidiekvivalentti
CPU	<i>CO₂ Processing Unit</i> eli hiilidioksidin käsittely-yksikkö
EEX	<i>European Energy Exchange</i> eli Euroopan unionin yhteinen huutokauppa- paikka
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i> eli tehostettu öljyntuotanto (esim. hiilidioksidin avulla)
EU	Euroopan unioni
IEA	<i>International Energy Agency</i> eli Kansainvälinen energijärjestö
IGCC	<i>Integrated Gasification Combined Cycle</i>
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i> eli interferometrinen synteettisen apertuurin tutka
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> eli Hallitustenvälinen ilmaston- muutospaneeli
Offshore	merellä sijaitseva
Onshore	maalla/mantereella sijaitseva

1 JOHDANTO

Koko ihmiskuntaa koskevan ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat tulleet vuosi vuodelta yhä selvemmiksi. Maapallon keskilämpötila on noussut yli 1 °C:n sitten esiteollisen ajan. Merenpinta nousee. Perinteiset säämallit muuttuvat. Selvistä ilmastonmuutoksen merkeistä huolimatta ilmakehän kasvihuonekaasujen määrä jatkaa kasvamistaan. (Fridahl, 2018.) Ennusteet näyttävät myös synkiltä. Kasvihuonekaasupäästöt ovat kasvaneet 1,5 prosenttiyksikköä joka vuosi viimeisen vuosikymmenen aikana, ja vakautuneet vain hetkeksi vuosien 2014 ja 2016 välillä. Kasvihuonekaasupäästöjen huipusta ei ole merkkejä muutamien seuraavien vuosien aikana. Joka vuosi siirtyvä huipentuma tarkoittaa, että tarvitaan yhä suurempia ja nopeampia päästöleikkauksia. Vuoteen 2030 mennessä päästöjen olisi oltava 25 prosenttia pienemmät kuin vuonna 2018, jotta ilmaston keskilämpötilan nousu pysyisi alle 2 °C:n. Jos maapallon keskilämpötilan nousu rajoitettaisiin puoleentoista asteeseen, tulisi vuonna 2030 päästöjen olla jopa 55 % pienemmät vuoden 2018 tasoon verrattuna. (UNEP, 2019.)

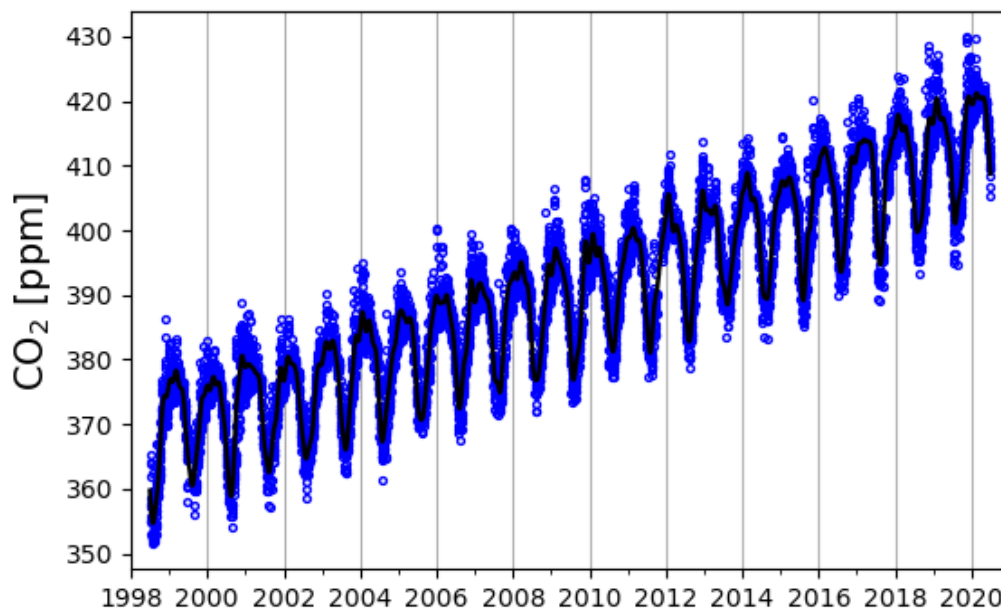
Yhden merkittävimmän kasvihuonekaasun, hiilidioksidin (CO₂), talteenotosta ja varastoinnista eli CCS:stä (Carbon Capture and Storage) on ennustettu jo vuosikymmenen ajan tärkeää tekniikkaa ilmastonmuutoksen hillitsemisessä (Fridahl, 2018). CCS pohjautuu hiilidioksidin talteenottamiseen yksittäisistä pistelähteistä, esimerkiksi voimalaitosten savukaasuista. Hiilidioksidin talteenottoa biopohjaisesta energiantuotannosta kutsutaan BECCS-tekniikaksi (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage), jolla voidaan saavuttaa niin kutsuttuja ”negatiivisia päästöjä” (Teir et al., 2011). Nykyään monet tahot, kuten Kansainvälinen energiajärjestö IEA, on alkanut tarkastelemaan edellä mainittujen tekniikoiden lisäksi myös hiilidioksidin hyödyntämistä eli niin sanottua CCUS-tekniikkaa (Carbon Capture, Utilisation and Storage). Tähän tutkimukseen ei vaikuta, onko tarkasteltavana kohteena CCS-, BECCS- vai CCUS-tekniikka, koska hiilidioksidin alkuperää taikka hyödyntämistä ei huomioida. Edellä mainituista syistä termejä käytetään tietolähteen mukaan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kirjallisuuden avulla ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vähentämisen sekä hiilidioksidin talteenoton vaikutusta yleisellä tasolla. Tutkimuksen pääpaino on hiilidioksidin varastoinnissa. Tavoitteena on selvittää ne erityiskysymykset, joita on otettava huomioon, kun talteenotettua fossiilista taikka biogeenistä hiilidioksidia aletaan varastoimaan geologisesti. Tällä hetkellä vallitseva epävarmuus luo myös mahdollisuuden disinformaation levittämiselle. Varastointiin liittyvät erityiskysymykset ja

haasteet peilautuvat koko CCS:n soveltuvuuteen ilmastonmuutoksen torjunnassa, sillä jos varastointivaiheen toimivuus ei ole tarvittavalla tasolla, on turha kuluttaa resursseja ketjun alkupäässä olevaan kalliiseen talteenottotekniikkaan.

2 ILMAKEHÄN HIILIDIOKSIDIPITOISUUDEN VÄHENTÄMISEN MERKITYS

Hiilidioksidi on merkittävin ihmiskunnan tuottama kasvihuonekaasu. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on noussut teollisuutta edeltävän ajan noin 280 ppm:stä (0,028 prosentista) yli 400 ppm:ään. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa noin 2 ppm:ää vuodessa. Pitoisuus alenee kasvukauden aikana, kun yhteyttämisessä sitoutuu hiilidioksidia. (Ilmatieteen laitos, 2020.) Viimeisen parinkymmenen vuoden aikana tapahtuneen hiilidioksidin ilmakehäpitoisuuden kehityksen Pallaksella huomaa selkeästi kuvasta 1.

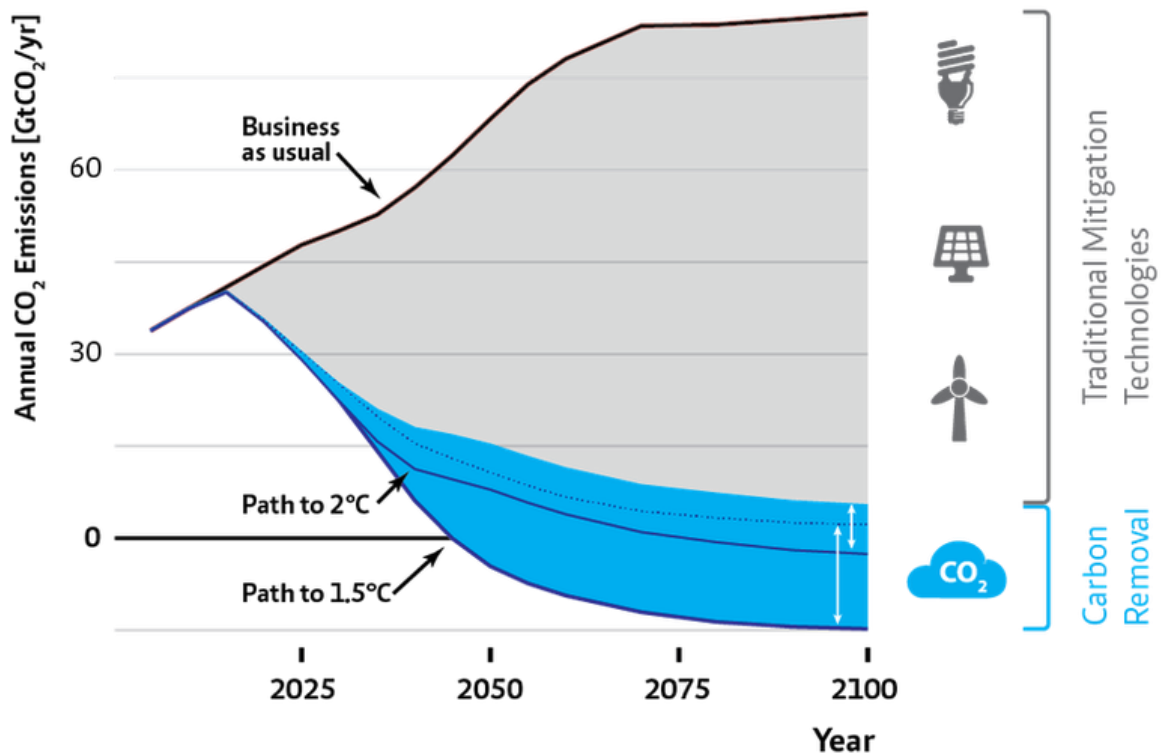


Kuva 1. Hiilidioksidin ilmakehäpitoisuuden kehitys Pallaksen Sammaltunturin huipulla. (Ilmatieteen laitos, 2020.)

Maailmanlaajuisen energiankulutuksen kasvu oli vuonna 2018 lähes kaksinkertainen verrattuna vuoden 2010 keskimääräiseen energiankulutuksen kasvuun. Tähän vaikuttivat vakaa maailmantalous sekä korkeammat lämmitys- ja jäähdytystarpeet. Sähkön kysyntä aiheutti yli puolet energiankulutuksen kasvusta. Suuremman energiankulutuksen takia hiilidioksidipäästöt nousivat ennätyselliset 1,7 % aiemmasta vuodesta (IEA, 2019). Vuonna 2019 hiilidioksidipäästöt tasoittuivat suunnilleen arvoon 33 Gt CO₂. Tämä johtui lähinnä voimalaitosten hiilidioksidipäästöjen voimakkaasta vähentymisestä kehittyneissä talouksissa, mikä johtuu uusiutuvien energianlähteiden (pääasiassa tuuli- ja aurinkoenergia) roolin kasvusta, polttoaineiden vaihdosta hiilestä maakaasuun sekä ydinvoiman kasvusta (IEA, 2020a).

2.1 Negatiiviset päästöt

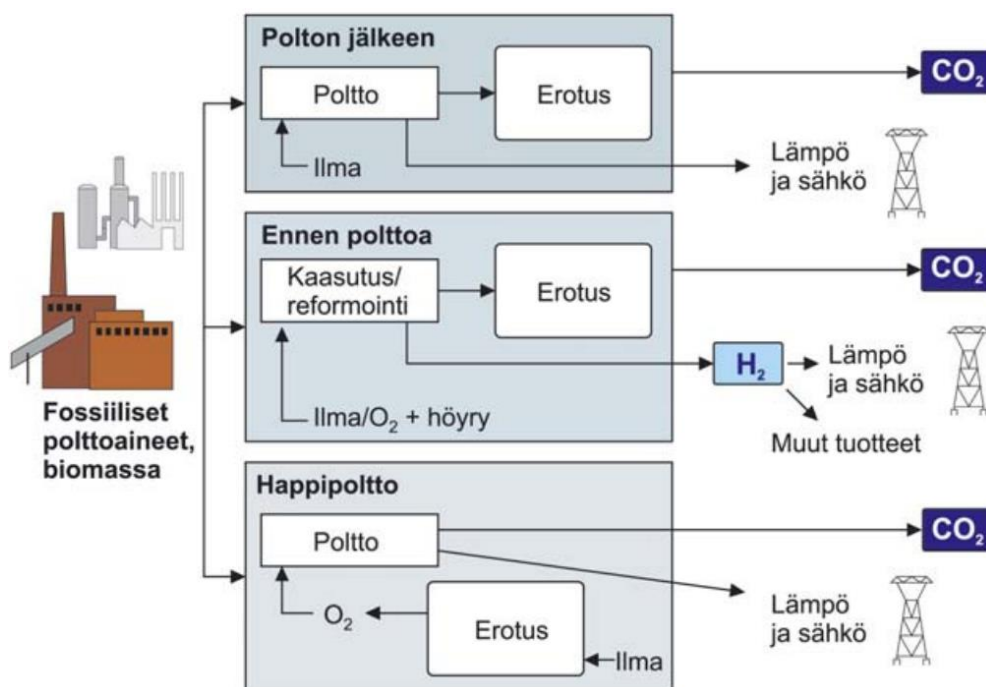
Pariisin ilmastopimuksen tavoitteiden saavuttaminen eli maapallon keskilämpötilan nousun rajaaminen puolentoista ja kahden celsiusasteen väliin esiteolliseen aikaan verrattuna vaatii muutakin kuin vain pyrkimysten nopeuttamista vähentää päästöjä. Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin IPCC:n mukaan se vaatii myös tekniikkaa hiilidioksidin poistamiseksi ilmakehästä. Näiden ”negatiivisten päästöjen” tärkeää roolia on korostettu useissa analyyseissä, jotka osoittavat hiilidioksidin kokonaispäästöjen oltavan negatiiviset tämän vuosisadan loppupuolella (kuva 2). CCS yhdessä bioenergian (BECCS) kanssa on tärkeä tekniikka näiden ”negatiivisten päästöjen” tuottamisessa. (IEA, 2016.)



Kuva 2. Kuvaajassa on esitetty vuosittaiset hiilidioksidipäästöt ajan funktiona. ”Negatiivisten päästöjen” rooli Pariisin ilmastopimuksen tavoitteiden saavuttamisessa kuvattu sinisellä värillä. (IEA, 2016.)

3 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTO

Hiilidioksidia muodostuu hiiltä sisältävän polttoaineen palamisprosessin tuotteena. Palamisprosessin tyyppi vaikuttaa suoraan sopivan hiilidioksidin talteenottotekniikan valintaan. Markkinoilla saatavilla olevat talteenottotekniikat ovat yleensä kalliita ja niiden osuus on noin 70–80 % koko CCS-prosessin kokonaiskustannuksista. Tässä luvussa käsitellään kolme pääasiallista energiateollisuudessa käytettyä talteenottotekniikkaa, jotka ovat talteenotto savukaasuista polton jälkeen (eng. *post-combustion*), talteenotto polttoaineesta ennen polttoa (eng. *pre-combustion*) sekä talteenotto happipolton avulla (eng. *oxy-fuel combustion*) (kuva 3). (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.) Kaikki talteenottotekniikat vaativat paljon energiaa, mikä nostaa polttoainekulutusta (10–40 %) sekä sähköntuotannon kustannuksia (20–90 %) (Teir et al., 2011). Energiateollisuus on suurin hiilidioksidin tuottaja maailmanlaajuisesti yli 80 prosentin osuudellaan. Noin 40 % energiasektorin päästöistä on peräisin sähköntuotannosta (IEA, 2020b). Talteenottotekniikoiden etuja ja haittoja on koottu taulukkoon 1.



Kuva 3. Hiilidioksidin talteenottotekniikoita energiantuotannossa. (Teir et al., 2011.)

3.1 Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista

Tässä prosessissa hiilidioksidi erotetaan savukaasuista polttoprosessin jälkeen. Talteenotto-tekniikkaa voidaan käyttää maakaasu- ja kaasutusvoimalaitoksissa sekä kiinteää polttoainetta käyttävissä voimalaitoksissa. Usein erottamisessa käytetään kemiallisia liuottimia, kuten monoetanoliamiineja. Liuotin absorboi ja prosessin myöhemmässä vaiheessa emittoi hiilidioksidia, tuottaen kuljetukseen ja varastointiin sopivaa puhdasta hiilidioksidia. (Teir et al., 2011.)

Kyseinen tekniikka on ensisijainen vaihtoehto nykyisten voimalaitosten jälkiasennuksissa, sillä se soveltuu hyvin esimerkiksi hiilivoimalaitoksiin. Suurin haaste polttamisen jälkeiselle hiilidioksidin talteenotolle on kemiallisen liuottiminen vaatima suuri regenerointienergia. Hiilidioksidin erottaminen liuottimesta vaatii siis suuren lämpömäärän, mikä laskee huomattavasti voimalaitoksen hyötysuhdetta. Yhdysvaltain National Energy Technology Laboratory on arvioinut kyseisen tekniikan nostavan sähköntuotannon kustannuksia jopa 70 %. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

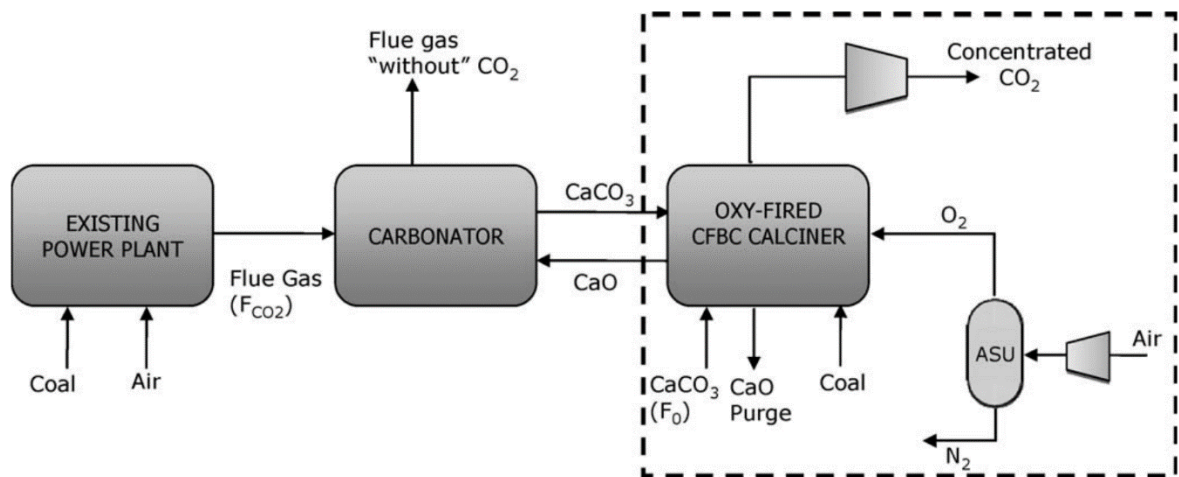
3.1.1 Calcium looping

Calcium looping (CaL) on kalsiumin kiertoon perustuva vaihtoehto hiilidioksidin talteenottoon savukaasuista. Tekniikka perustuu seuraavaan palautuvaan kemialliseen reaktioon,



jossa CaCO_3 on kalsiumkarbonaatti eli kalkkikivi, CaO on kalsiumoksidi eli sammuttamaton kalkki ja CO_2 on hiilidioksidi.

Vaikka kalkkia on käytetty yli 100 vuotta hiilidioksidin poistamisessa kuumista savukaasuista, ajatus sen käytöstä palautuvassa järjestelmässä on suhteellisen uusi. Järjestelmän vaatimuksena on, että kalkkituotetta käytetään useissa kierroissa kustannusten minimoimiseksi ja prosessin kokonaishyötysuhteen parantamiseksi. Tämä edellyttää kemikaalien karbonointia ja regenerointia. Calcium looping -tekniikka on esitetty kuvassa 4. (Bui et al., 2018.)



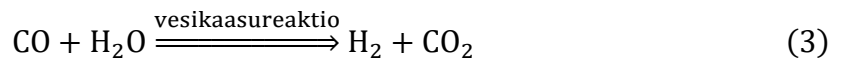
Kuva 4. Calcium looping palamisen jälkeisessä hiilidioksidin talteenotto-prosessissa. Katkoviivan sisällä oleva happipolttainen kalsinointiyksikkö tuottaa hiilidioksidin lisäksi energiaa. (Alonso et al., 2010.)

Kolme avaintekijää erottaa CaL:n muista talteenottotekniikoista. Ensiksi, karbonointi- ja kalsinointiyksiköt voivat toimia höyrykierron lämmönlähteenä lisätehon tuottamiseksi. Toiseksi, sorbenttia eli sitovaa ainetta, kalkkikiveä, on saatavana teollisuuskokoluokissa ja se on vaaraton kemikaali. Kolmanneksi, käytettyä sorbenttia voidaan hyödyntää teollisissa prosesseissa, kuten sementin ja teräksen valmistuksessa. Kalkin valmistus edustaa vähintään puolta sementin tuotannon hiilidioksidipäästöistä. CaL:n avulla voidaan saavuttaa lähes nol-lapäästöt sisällyttämällä tekniikka sementin valmistusprosessiin. Käytettyä sorbenttia voidaan hyödyntää myös esimerkiksi savukaasujen rikinpoistossa. (Bui et al., 2018.)

3.2 Hiilidioksidin talteenotto polttoaineesta

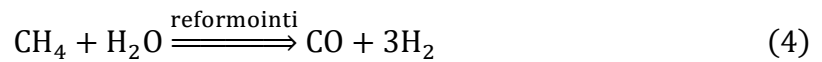
Hiilidioksidi voidaan talteenottaa kaasumaisesta polttoaineesta ennen polttoprosessia. Talteenottotekniikkaa voidaan käyttää maakaasu- sekä kaasutusvoimalaitoksissa. Kaasutuksella kiinteä polttoaine, esimerkiksi kivihiili tai biomassa, muutetaan polttokaasuseokseksi. Kaasuseoksen pääkomponentit ovat hiilimonoksidi, hiilidioksidi sekä vety. Polttokaasusta erotetaan haitalliset komponentit, kuten ammoniakki ja rikkiyhdisteet. Puhdistettua tuotekaasu voidaan käyttää esimerkiksi IGCC-voimalaitoksissa (Integrated Gasification Combined Cycle). (Teir et al., 2011.) IGCC:n seurauksena voimalaitoksen hyötysuhde laskee 7–8 % verrattuna perinteiseen kivihiilivoimalaitokseen, mutta sillä voidaan saavuttaa jopa 80 %:n hiilidioksidin talteenottohyötysuhde (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014).

Ennen polttoprosessia tapahtuvaan kivihiilen esikäsitteilyyn sisältyy matalalla happitasolla suoritettu kaasutusprosessi, missä muodostuu yhtälön 2 mukaista synteetikaasua. Synteetikaasusta muodostetaan edelleen vesikaasureaktiolla vetyä ja hiilidioksidia yhtälön 3 mukaisesti,



jossa CO on hiilimonoksidi eli häkä, H₂O on vesi ja H₂ on vety.

Maakaasuvoimalaitoksilla polttoaine, eli käytännössä metaani (CH₄), reformoidaan synteetikaasuksi yhtälön 4 mukaisesti. Vetypitoisuutta voidaan lisätä vesikaasureaktiolla (yhtälö 3). Prosessin loppuosa on samanlainen kuin kivihiihellä. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

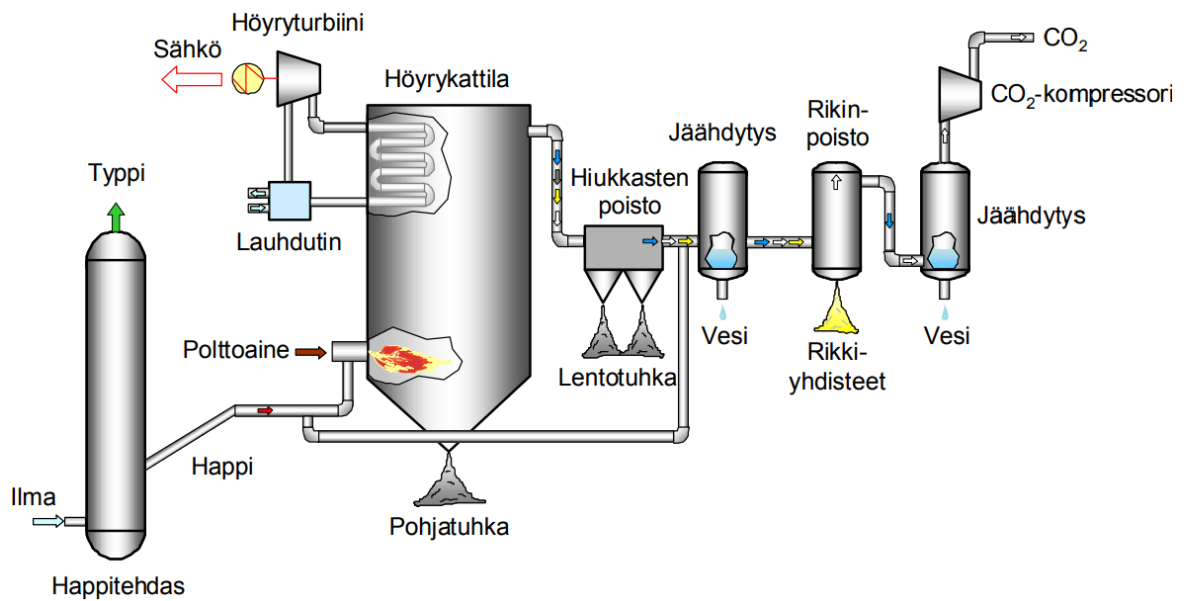


Polttoaineen käsittelyvaiheiden monimutkaisuudesta huolimatta, hiilidioksidin erotus on edullisempaa polttoaineesta kuin savukaasuista. Tämä johtuu siitä, että polttoaineen hiilidioksidipitoisuus on suurempi (15–60 vol-%) ja kaasu on valmiiksi paineinen. Kaasutuslaitoksia on hyvin vähän käytössä energiantuotannossa, joten tekniikkaa voidaan soveltaa lähinnä uusiin voimalaitoksiin. (Teir et al., 2011.)

3.3 Hiilidioksidin talteenotto happipolton avulla

Happipolton polttoprosessissa käytetään ilman sijasta lähes puhdasta happea (tyypillisesti 95–97 vol-%). Tämä vähentää savukaasuissa olevan typen määrää, mikä helpottaa hiilidioksidin erotusprosessia. Happipolton etuna on myös NO_x-päästöjen väheneminen. Kun poltossa käytetään puhdasta happea, savukaasujen pääkomponentit ovat CO₂, H₂O, hiukkaset ja SO₂. Hiukkaset ja SO₂ voidaan poistaa tavanomaisilla sähkösuodattimilla sekä savukaasujen rikkipesureilla. Jäljelle jäävät kaasut, jotka sisältävät suuria pitoisuuksia hiilidioksidia

(polttoaineesta riippuen 80–98 vol-%) voidaan paineistaa kuljetusta ja varastointia varten. Hiilidioksidin erotusprosessi on yksinkertainen ja vähän energiaa kuluttava, mutta poltossa käytettävän hapen erottaminen ilmasta vaatii taas paljon energiaa. Voimalaitoksen omakäyttötehon kasvu huonontaa sähköntuottohyötysuhdetta 7–12 %-yksikköä verrattuna laitokseen, jossa ei ole hiilidioksidin talteenottoa. Myös korkea SO₂-pitoisuus voi lisätä järjestelmän korroosio-ongelmia. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)



Kuva 5. Happipolttovoimala. (Teir et al., 2011.)

Happipolttovoimala koostuu itse voimalaitoksen lisäksi happitehtaasta (ASU) ja hiilidioksidin käsittely-yksiköstä (CPU) (kuva 5). Paljon energiaa kuluttavan happivoimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseksi kehitetään energiatehokkaampia hapentuotantotapoja, kuten membraaneihin perustuvia prosesseja. Lisäksi happitehtaan, voimalaitoksen ja hiilidioksidin käsittely-yksikön prosessioptimoinnin ja -integroinnin mahdollisuuksia tarkastellaan. (Teir et al., 2011.)

Taulukko 1. Talteenottotekniikoiden etuja ja haittoja. (Teir et al., 2011.) (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Talteenottotekniikka	Sovelluskohde	Edut	Haitat
Polton jälkeen savu- kaasuista <i>Post-combustion</i>	Maakaasu- ja kaasutusvoima- laitokset sekä kiinteää polttoai- netta käyttävät voimalaitokset	Kehittynein tekniikka verrattuna muihin. Voidaan helposti jälki- asentaa olemassa ole- viin laitoksiin.	Pieni CO ₂ -pitoisuus vaikut- taa negatiivisesti talteenotto- hyötysuhteeseen.
Ennen polttoa poltto- aineesta <i>Pre-combustion</i>	Maakaasu- sekä kaasutusvoima- laitokset	Korkean CO ₂ -pitoisuu- den ansiosta hyvä tal- teenottohyötysuhde. Kehittynyt tekniikka, joka on kaupallisessa käytössä joillakin teol- lisuuden aloilla. Voidaan jälkiasentaa olemassa olevaan lai- tokseen.	Lämpötilaan liittyvä läm- mönsiirto-ongelma ja voima- laitoksen hyötysuhteen heik- keneminen johtuen vetypi- toisen kaasuturbiinin poltto- aineen käytöstä. Korkea loistehon tarve sor- bentin regeneraatiossa. Kokemuksen puute johtuen vähäisistä markkinoilla ole- vista kaasutuslaitoksista. Korkeat pääoma- ja käyttö- kustannukset.
Happipolttto <i>Oxy-fuel combustion</i>	Hiili-, bio- ja kaasuvoimalai- tokset	Korkean CO ₂ -pitoisuu- den ansiosta hyvä tal- teenottohyötysuhde. Pienempi käsiteltävän kaasun määrä, joten riittää pienemmät komponentit (esim. kattila).	Suuri hyötysuhteen lasku ja energiantarve. Hapen tuotanto kallista. Mahdollisia korroosio- ongelmia. Korkeat lämpötilat johtuen O ₂ -pitoisuudesta ja lämmön- siirtopintojen mitoitus rajoit- tavat.

4 HIILIDIOKSIDIN GEOLOGINEN VARASTOINTI

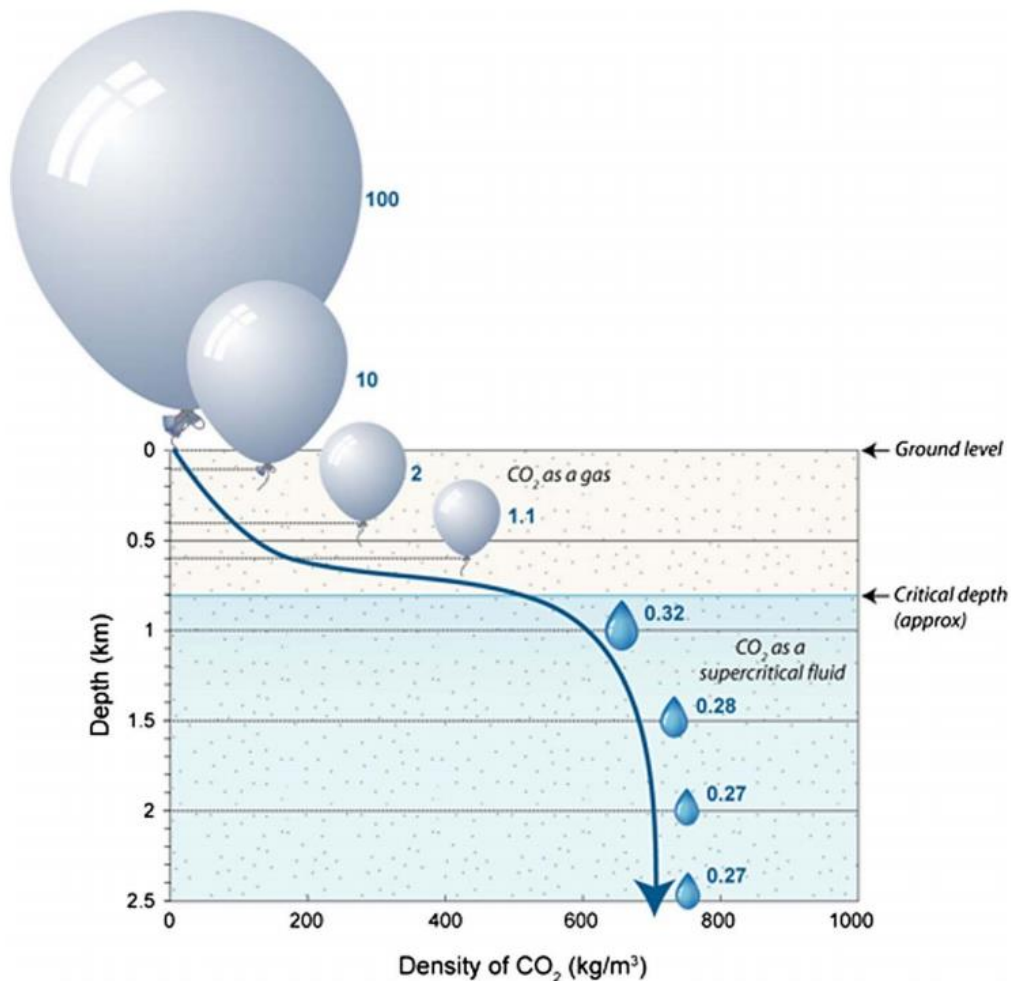
Hiilidioksidin varastointiin sisältyy talteenotetun hiilidioksidin injektointi syvälle huokoisen kiviaineksen muodostamaan geologiseen varantoon. Tätä peittää läpäisemätön kivikerros, joka tekee varannosta suljetun ja estää hiilidioksidin kulkeutumisen ylöspäin ja pääsyn ilmakehään. Hiilidioksidin varastointiin soveltuvia varantoja on useita. Syvillä suolavesikerrostumilla ja köyhdytetyillä öljy- ja kaasukentillä on suurin varastointikapasiteetti. Syvät suolavesikerrostumat ovat huokoisten suolavedestä kyllästyneiden kivien muodostamia kerroksia, jotka ovat levinneet sekä maalla että merellä sijaitsevissa sedimenttialtaissa. Köyhdytetyt öljy- ja kaasukentät ovat huokoisia kalliomuodostumia, jotka ovat vanginneet raakaöljyä ja kaasua miljoonien vuosien ajan ennen pumppaamista ja käyttöönottoa. (IEA, 2020c.) Teoreettisesti valtameret ovat myös potentiaalisia varastointikohteita, mutta menetelmä on lailla kielletty Euroopassa ympäristövaikutusten epävarmuuksien takia (Teir et al., 2011).

Potentiaalisen hiilidioksidin maanpinnanalaisen varastointitekniikan kehittämiseksi tulisi varmistaa varastoidun määrän vähintään sadan vuoden pitoaika alle 0,01 %:n vuotuisella vuodolla (Alcalde et al., 2018). Siksi yksi tärkeimmistä hiilidioksidin varastoinnin näkökulmista on saada selkeä käsitys varastoidun hiilidioksidin käyttäytymisestä keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Hiilidioksidin käyttäytyminen on monimutkainen prosessi, joka riippuu useista geologisen varastointijärjestelmän komponenteista (Aminu et al., 2017). Vuotuisen vuodon määrän laskennassa ensiksi määritetään varastoinnin kokonaisvuodon suuruus, joka aikakeskiarvoistetaan jakamalla kokonaisvuoto varastointivuosien lukumäärällä. Todellisuudessa vuotuisen vuodon suuruus ei ole ajan suhteen vakio, vaan se pienenee varastointimekanismien vaikutusten muuttumisen ansiosta (kuva 8). Tällöin kokonaisvuoto käyttäytyy eksponenttifunktion tavoin.

4.1 Varastointimekanismit

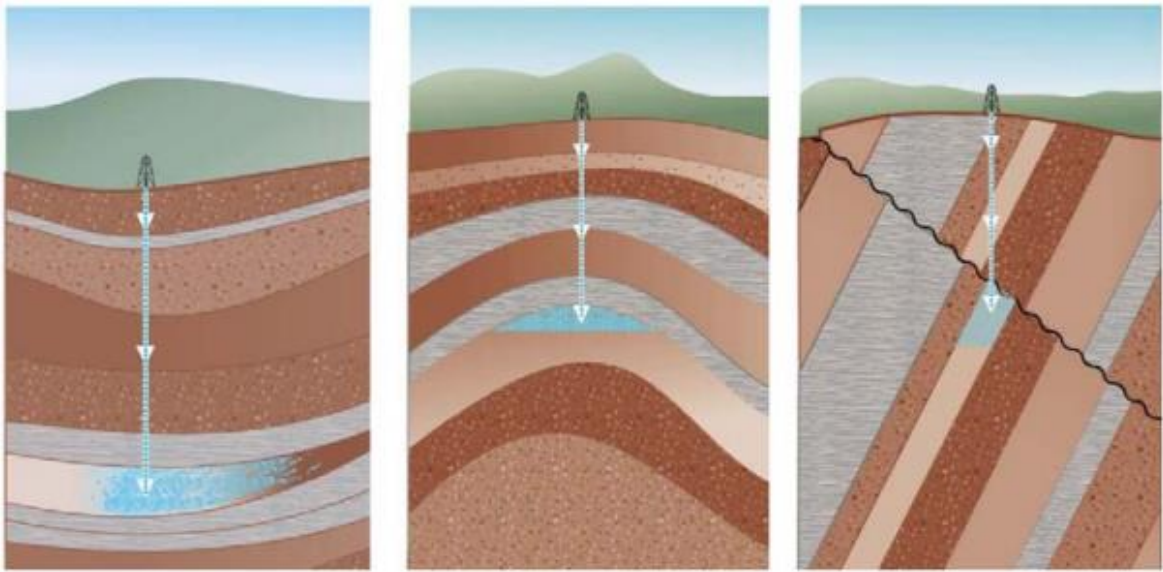
Ennen maaperään varastointia hiilidioksidi puristetaan yleensä ylikriittiseksi (>80 bar) tiheyden lisäämiseksi ja varastointitilavuuden pienentämiseksi. Ylikriittinen hiilidioksidi käyttäytyy kaasun tavoin täyttäen kiven kaikki onkalot. Geologisen varaston on sijaittava yli 800 metrin syvyydessä, jotta yläpuolella oleviin sedimenttikerrokseen muodostunut paine olisi sama kuin injektoidun hiilidioksidin (IEA, 2020c). Näin hiilidioksidissa ei tapahdu

faasimuutoksia sekä geokemialliset ja fysikaaliset mekanismit estävät sen nousemasta kohti maanpintaa. Kerrostuman paine voidaan arvioida lämpötilagradientin avulla (kuva 6).



Kuva 6. Hiilidioksidin tiheyden muutos syvyyden muuttuessa, kun paine arvioidaan hydrostaattisen paineen mukaisesti. Kuvassa maanpinnan lämpötila on 15 °C ja geoterminen lämpötilagradientti on 25 °C/km. (Aminu et al., 2017.)

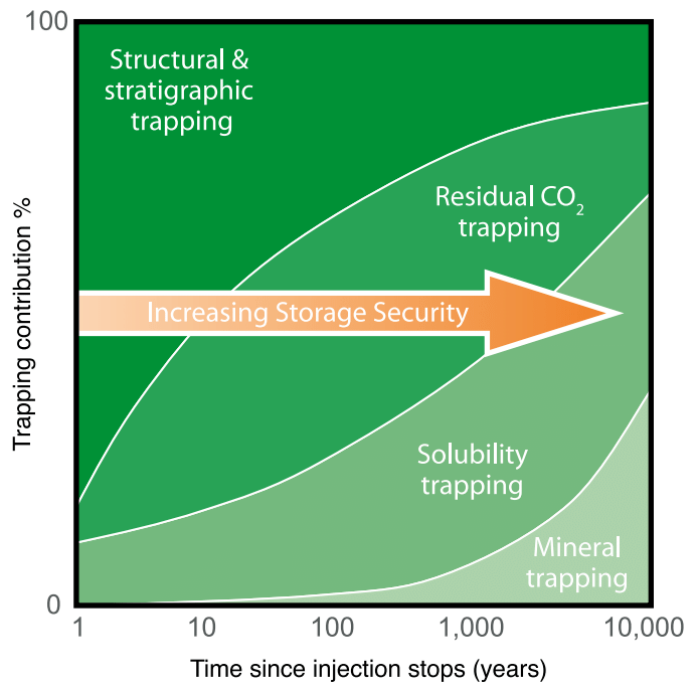
Hiilidioksidin vangitsemisen kannalta tärkein asia on varastokerroksen päällä oleva läpäisemätön sedimentti- ja kivikerros eli tiivis sulkukerros. Sulkukerroksen päällä on usein myös muita läpäisemättömiä sedimentti- tai kivikerroksia. Sulkukerroksen muodostamaa suljettua muodostumaa kutsutaan stratigrafiseksi loukuksi (eng. *stratigraphic trapping*). Injektoinnin seurauksena hiilidioksidi lähtee leviämään sivuille ja ylöspäin injektointipaikasta, sillä se on kevyempää kuin öljy tai suolavesi. Rakenteellisessa loukussa (eng. *structural trapping*) siirrostuneet tai poimuttuneet läpipäisemättömät sedimentti- tai kivirakenteet estävät hiilidioksidin leviämisen. (Teir et al., 2011.)



Kuva 7. Vasemmalla stratigrafinen loukku, oikealla rakenteellinen loukku ja keskellä edellä mainittujen sekoitus. Jokaisessa pääasiallisena hiilidioksidin leviämistä estävänä eristeenä toimii sulkukerros. (Teir et al., 2011.)

Muodostumaan injektoitu hiilidioksidi voi reagoida seinämien mineraalien kanssa, syrjäyttää muodostumassa olevan veden tai sekoittua nesteeseen. Mineraaliloukussa (eng. *mineral trapping*) varastointimuodostuman kivilajin ollessa suotuisa, liuennut hiilidioksidi reagoi hitaasti seinämien kanssa muodostaen pysyviä mineraaleja. Kemiallisessa reaktiossa voi kuitenkin kestää tuhansia vuosia. Hiilidioksidia injektoitaessa voi syrjäyttää muodostumassa olevaa vettä. Injektoinnin loppuessa syrjäytynyt vesi alkaa painumaan takaisin huokoiseen materiaaliin. Tällöin hiilidioksidi jää veden paineen takia loukkuun eli syntyy jäännösloukku (eng. *residual trapping*). Edellä mainitussa mekanismissa injektointipaineen on oltava tarpeeksi suuri, jotta hiilidioksidi painautuisi huokosiin, muttei kuitenkaan niin suuri, että sulkukerros vaurioituu. Ajan kuluessa suuri osa injektoidusta hiilidioksidista liukenee muodostuman öljyyn tai suolaiseen veteen. Liukenemisen seurauksena muodostuu nestettä, joka on vettä tiheämpää ja suotuisissa olosuhteissa vajoaa muodostuman pohjalle. Tätä kutsutaan liukoisuusloukuksi (eng. *solubility trapping*). (Teir et al., 2011.)

Hiilidioksidin geologiseen varastointiin soveltuvilla muodostumilla on oltava korkea huokoisuus, jotta hiilidioksidi virtaa koko varastointitilaan. Sulkukerros materiaalin on taas oltava läpäisevyydeltään ja huokoisuudeltaan vähäisiä. Maksimi-injektointinopeus on myös tärkeä tiedostettava tekijä muodostuman kestävyyskannalta. (Teir et al., 2011.)



Kuva 8. Eri varastointimekanismien suhteellinen vaikutus injektoidun hiilidioksidin varastointiin ajan funktiona. (IPCC, 2005.)

Kuvasta 8 huomataan varastointialueen muuttuvan turvallisemmaksi ajan kuluessa injektoinnin lopettamisesta. Tämä voidaan selittää liukoisuus- ja mineraaliloukkujen suhteellisen vaikutuksen kasvamisella verrattuna muihin, alkuvaiheen heikompiin, varastointimekanismeihin.

4.2 Tutkimukset

Hiilidioksidin eri varastointitavoista ja -mekanismeista sekä niiden luotettavuudesta on saatu tietoa muutaman vuosikymmenen aikana suoritettujen erilaisten käytännön sekä laskennallisten tutkimusten avulla (IEA, 2020c). Tässä luvussa käsitellään pienen kokoluokan lyhytaikaisia tutkimuksia sekä kolmea merkittävää suuren kokoluokan kansainvälistä hiilidioksidin varastointiprojektia.

Eri tutkimuksia analysoitaessa on tiedostettava, etteivät tutkimustulokset hiilidioksidin säilyvyydestä ole täysin vertailukelpoisia taikka yksinkertaisia. Kaikki potentiaaliset geologiset varastointipaikat ovat erilaisia (CO_2 :n injektointimäärä, varaston syvyys, maaperän huokoisuus, permeabiliteetti sekä hauraiden rakenteiden tai vanhojen kairareikien ja injektointikajojen esiintyminen) ja siksi on haastavaa esittää generalisoivasti, mikä esimerkiksi varaston

kokonaisvuoto voisi olla. Epävarmuutta aiheuttavat myös lyhytaikaiset hiilidioksidivuodon simulointikokeet ja tutkimukset. Joitakin viikkoja tai kuukausia kestävät lähellä maankuorta suoritettut tutkimukset antavat erityisesti vuodon osalta yliampuvia tuloksia, joita ei voi verrata todellisen hiilidioksidivaraston varastointikykyyn. Suurten varastointialueiden tutkimuksista ei kuitenkaan ole saatavilla pitkäaikaista dataa, mutta ennustusten sekä ekstrapolointien avulla on todettu varaston varastointikyvyn parantuvan huomattavasti ajan kuluessa (luvut 4.1 ja 4.2.1).

Monet tutkimukset tarkastelevat usein vuodon sijasta, miten nopeasti injektoitu hiilidioksidi kulkeutuu varaston sisällä ja miten paljon varasto kestää esimerkiksi paineen lisäystä ennen kuin aiheutetaan sulkevien kerrosten rikkoutumista, mikä johtaisi vuotoihin ylempiin kerroksiin. Toinen yleinen esimerkkiskenaario on, että miten paljon voidaan varastoida ennen kuin hiilidioksidia kulkeutuu johonkin paikkaan missä löytyy johtavia siirroksia tai vanhoja kairareikiä, mitkä voisi johtaa hiilidioksidin pois varastointimuodostelmasta. Varastoalueen käyttäytymisen monitorointia tarkastellaan enemmän luvussa 4.3.

Edellä mainitut asiat aiheuttavat epävarmaa suhtautumista, erityisesti kansalaisten keskuudessa, geologisen varastoinnin luotettavuutta kohden. Epävarmuus sekä tutkimustulosten haastava saatavuus jättävät tilaa myös disinformaation levittämiselle.

4.2.1 Hiilidioksidin geologisen varastointiturvallisuuden arviointi

Monet sidosryhmät pitävät 0,01 %:n vuotuisia vuotoja, jotka vastaavat varastoituneen hiilidioksidin 99 %:sta säilymistä 100 vuoden jälkeen, riittävän pieninä varastoinnin tehokkuuden varmistamiseksi. Tässä tutkimuksessa tarkkaillaan hiilidioksidin säilytysmallien aikaskaalojen olevan 10 000 vuotta. Pitkän aikavälin CO₂-varastoturvallisuuden arvioinneista ja tutkimuksista puuttuu kvantitatiivisia ennusteita ja todennäköisyyksiä, että vastaava tulos saavutetaan yksittäisen toimipaikan ulkopuolella ja maailmanlaajuisessa CO₂-varastointiteollisuudessa. Monissa geologisen varaston vuototutkimuksissa ei myöskään erikseen arvioida varastoalueen varastointimekanismeja, vaikka kokeelliset mittaukset ovat todistaneet jäännösloukun tehokkaan vaikutuksen melkein välittömästi hiilidioksidin maankuoreen injektoinnin jälkeen (kuva 8). (Alcalde et al., 2018.)

Tämä tutkimus hyödyntää arvioinneissaan numeerista ohjelmaa nimeltä Storage Security Calculator (SSC). SSC käyttää kahta rutiinia: ensimmäinen hyödyntää vakiintuneita ja mitattuja geologisia prosesseja arvioimaan geologisen varaston kaappauskykyä; toinen laskee pinnan vuotovirtausnopeuksia, jotka vaihtelevat ajan funktiona.

Käytännöllistä hiilidioksidin varastointia tehdään jo sekä maalla että merellä, ja kullakin on erilaiset toteutushaasteet. SSC:tä sovelletaan kolmeen eri skenaarioon, jotka eroavat toisistaan syöttöparametrien suhteen. Ohjelma laskee 50 %:n todennäköisyyden, että yli 98 % injektoidusta hiilidioksidista jää loukkuun maanpinnan alle 10 000 vuoden aikana, kun varastointi toteutetaan realistisessa ympäristössä hyvin valvotulla alueella, jonka vanhoissa kaivoissa on kohtalainen tiheys. Pahimmassa tapauksessa, jossa varastointi toteutetaan epärealistisessa ympäristössä puutteellisen valvonnan alla ja jossa varastointialueella sijaitsevat hylätyt kaivot aiheuttavat suuren vuotoriskin, ohjelma laskee injektoidusta hiilidioksidista jäävän loukkuun vähintään 78 % 10 000 vuoden aikana. Taulukkoon 2 on koottu SSC:n määrittämät koko tutkimusajan vuotoprosentit. (Alcalde et al., 2018.)

Taulukko 2. Tutkimuksessa määritetyt vuodon määrät injektoidusta CO₂:sta. a) Kolme tutkimusskenaariota, jotka havainnollistavat alueen varastointivarmuutta. b) Neljä CO₂-vuototodennäköisyyttä: Vertailutapauksessa malliparametrit on valittu asiantuntija-arvioinnin ja Monte Carlo -simulaation avulla. P95 tarkoittaa, että 95 % lasketuista vuotoarvoista ovat suurempia, kuin määritetty vuotoprosentti. Vastaavasti P50 tarkoittaa, että 50 % ja P05, että 5 % lasketuista vuotoarvoista ovat suurempia, kuin määritetty vuotoprosentti. Tavanomaisesti maanalaisten varantojen raportointi käyttää P50:tä todennäköisimpänä lopputuloksena. (Alcalde et al., 2018.)

Skenaario ^a	Aika (vuosi)	CO ₂ :n kokonaisvuoto (%)			
		Vertaus ^b	P95 ^b	P50^b	P05 ^b
Offshore hyvin valvottu	1	0,000755	0,000506	0,000779	0,00144
	100	0,0286	0,0249	0,0447	0,0888
	1 000	0,0744	0,0709	0,213	0,646
	10 000	0,532	0,483	1,89	6,29
Onshore hyvin valvottu	1	0,00211	0,00133	0,00217	0,00451
	100	0,0861	0,0737	0,156	0,358
	1 000	0,269	0,246	0,888	2,96
	10 000	2,1	1,81	8,18	25,71
Onshore puutteellisesti valvottu	1	0,215	0,0517	0,202	0,521
	100	6,71	1,70	6,41	16,5
	1 000	7,12	2,39	8,05	20,0
	10 000	11,3	6,91	22,0	32,6

On todennäköistä, että hiilidioksidivuodon määrä olisi todellisuudessa määritettyjä arvoja pienempi, sillä hiilidioksidin tiheys on noin kolminkertainen verrattuna laskennassa käytetyn maakaasun tiheyteen. Tuloksista huomataan, että geologisen muodostuman varastointikyky tehostuu mitä pidempi varastointiaika on. Taulukkoon 3 on määritetty aikakeskiarvoistetun vuotuisen vuodon määrä.

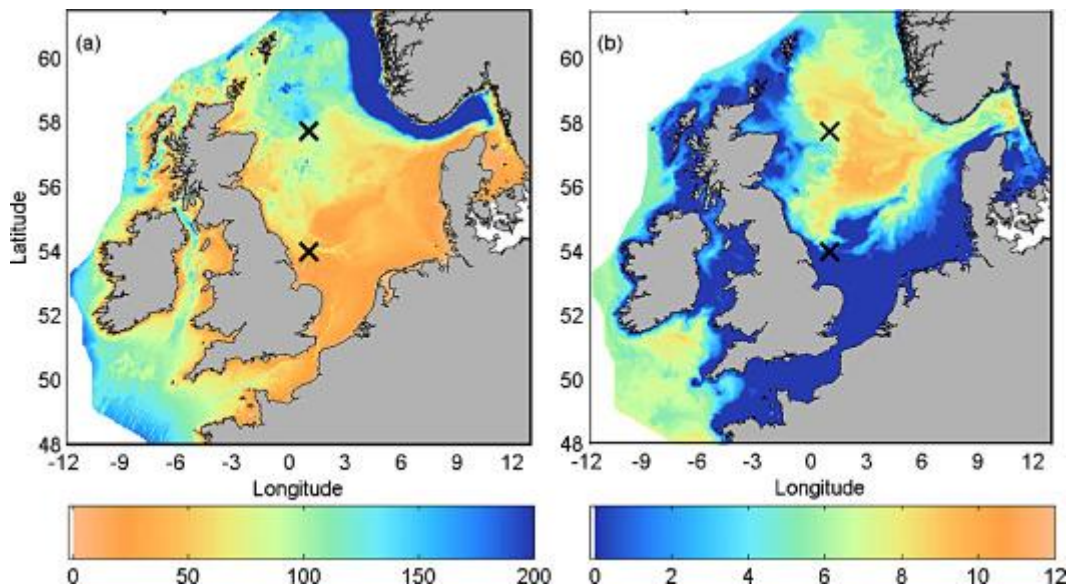
Taulukko 3. Aikakeskiarvoistettu vuotuinen vuodon määrä yhden merkitsevän numeron tarkkuudella. Aikakeskiarvoistetut vuotuiset vuotomäärät määritetään jakamalla valitulle malliajalle laskettu kumulatiivinen vuodon kokonaismäärä mallivuosien määrällä. Tavanomaisesti maanalaisten varantojen raportointi käyttää P50:tä todennäköisimpänä lopputuloksena. (Alcalde et al., 2018.)

Skenaario	Aika (vuosi)	Aikakeskiarvoistettu vuodon määrä (% vuodessa)		
		P95	P50	P05
Offshore hyvin valvottu	1	0,0005	0,0008	0,001
	100	0,0002	0,0004	0,0009
	1 000	0,0001	0,0002	0,0006
	10 000	0,00005	0,00019	0,00063
Onshore hyvin valvottu	1	0,001	0,002	0,005
	100	0,0007	0,002	0,004
	1 000	0,0002	0,0009	0,003
	10 000	0,0002	0,0008	0,003
Onshore puutteellisesti valvottu	1	0,05	0,2	0,5
	100	0,02	0,06	0,2
	1 000	0,002	0,008	0,02
	10 000	0,0007	0,002	0,003

Taulukosta 3 nähdään, että hiilidioksidin aikakeskiarvoistettu vuotuinen vuotoprosentti varastosta pienenee, mitä pidempi varastointiaika on. Tämä voidaan perustella eri varastointimekanismien suhteellisen vaikutuksen ajasta riippuvaisella muutoksella. Lisäksi huomataan, että ainoastaan puutteellisesti valvotun, epärealistisen, ympäristön kaikki tulokset eivät saavuta 0,01 %:n hyväksyttävää tasoa. Taso saavutetaan tässäkin ympäristössä kaikilla vuototodennäköisyyksillä, kun varastointiaika on 10 000 vuotta. Laskentaohjelman keskeisiä epävarmuustekijöitä ovat empiirisen tiedon puute ja siten epätäydellinen ymmärrys vuotojen nopeasta kehittymisestä, hiilidioksidin käyttäytymisestä maanpinnanalaisessa ympäristössä satojen ja tuhansien vuosien aikaväleillä sekä hylättyjen kaivojen pitkäaikainen käyttäytyminen fluidinsiirtoreitteinä.

4.2.2 Suuren mittakaavan CO₂-vuotojen mallintaminen Pohjanmerellä

Kaksi sijaintia Pohjanmerellä on valittu simuloimaan hiilidioksidin vapautumista. Kuvassa 9 rasteilla merkityt tutkimuskohteita kutsutaan pohjoiseksi (57,75 N; 1,0 E) ja eteläiseksi (54,0 N; 1,0 E) alueeksi. Molemmat sijainnit vastaavat potentiaalisia hiilidioksidin varastointipaikkoja, mutta eroavat huomattavasti toisistaan hydrofysikaalisten ominaisuuksiensa suhteen. Pohjoinen alue vastaa sijainniltaan Pohjanmeren suurinta öljykenttää, Forties Oil Field, joka on noin 98 metrin syvyydessä. Eteläinen alue taas kuvaa Viking groupin öljykenttiä, jotka ovat noin 43 metrin syvyydessä. (Phelps et al., 2015.)



Kuva 9. (a) Batymetria, meren pohjan syvyys [m]. Väriakseli rajattu 200 m:n syvyydelle osoittamaan tarkempia tietoja tutkimusalueella. (b) Meren pinta- ja pohjalämpötilojen lämpötilaero [°C] 1. syyskuuta 1999. (Phelps et al., 2015.)

Pitkän aikavälin simulaatioissa hiilidioksidia injektoidaan molempiin kohteisiin jatkuvasti koko vuoden ajan. Tämä simulaatio kuvaa esimerkiksi geologisesta viasta johtuvaa varastointipaikan vuotoa. Tutkimuksessa tarkastellaan vuotavan hiilidioksidin vaikutusta merialueen pH-arvoon sekä ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin määrää.

IEA:n mukaan todennäköiset hiilidioksidivuodot vaihtelevat yhdestä 50 000 tonniin hiilidioksidia päivässä (GHG, 2008). Tutkimuksessa käytettyjen mallien resoluution takia simulaation tasaisiksi vuodoiksi on valittu 1 000 ja 10 000 t CO₂ päivässä.

Suuremman vuodon (10 000 t CO₂ päivässä) simulaatioissa LT1-LT4 suurimmat pH-arvon alenemiset ovat pohjoisella alueella 2,67 ja etelässä 2,32 pH-yksikköä ja 1,0 pH-yksikön suuruista happamoitumista havaittiin pohjoisessa jopa 39 km:n ja etelässä 24 km:n päässä vuotokohdasta. Pienemmän vuodon (1 000 t CO₂ päivässä) simulaatioiden LT5-LT8 happamoitumisalueet vastaavat muodoltaan suuremman vuodon aluetta. Suurimmat meriveden pH-arvon laskut ovat pohjoisessa 1,19 ja etelässä 0,98 pH-yksikköä. Hiilidioksidin happamoittavaa vaikutusta ei havaita yli 6 km:n etäisyydellä vuotokohdasta. Taulukossa 4 on esitetty simulaation tulokset. (Phelps et al., 2015.)

Taulukko 4. Suurin etäisyys vuotokohdasta, jossa havaitaan määritetty pH-arvon muutos. Arvo 0 tarkoittaa, että pH-arvo palaa välittömästi normaaliksi vuodon päätyttyä. (Phelps et al., 2015.)

	Δ pH	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5	LT6	LT7	LT8
Pohjoisalue	1,0	39	21	34	30	0	-	-	0
	0,5	61	49	54	54	0	0	0	0
	0,25	117	103	108	141	6	4	2	2
	0,1	354	306	378	347	26	16	18	16
	0,01	570	575	580	58	299	334	303	322
Eteläinen alue	1,0	23	22	24	24	-	-	-	-
	0,5	62	61	62	57	-	0	0	0
	0,25	122	100	99	108	2	2	2	2
	0,1	166	156	165	160	35	22	33	33
	0,01	693	670	461	437	193	186	196	18

Keskimäärin 40,2 % pohjoisen alueen hiilidioksidivuodosta poistuu merestä 90 päivän kuluessa vuodon päättymisestä. Vastaava arvo eteläisellä alueella on keskimäärin 86,4 %. Taulukossa 5 on esitetty simulaatioiden selvitetty vuotomäärät.

Taulukko 5. Merestä vapautuneen hiilidioksidin määrä vuodetusta määrästä 90 päivää vuotamisen päättymisestä (eli 455 päivää vuodon alkamisesta). (Phelps et al., 2015.)

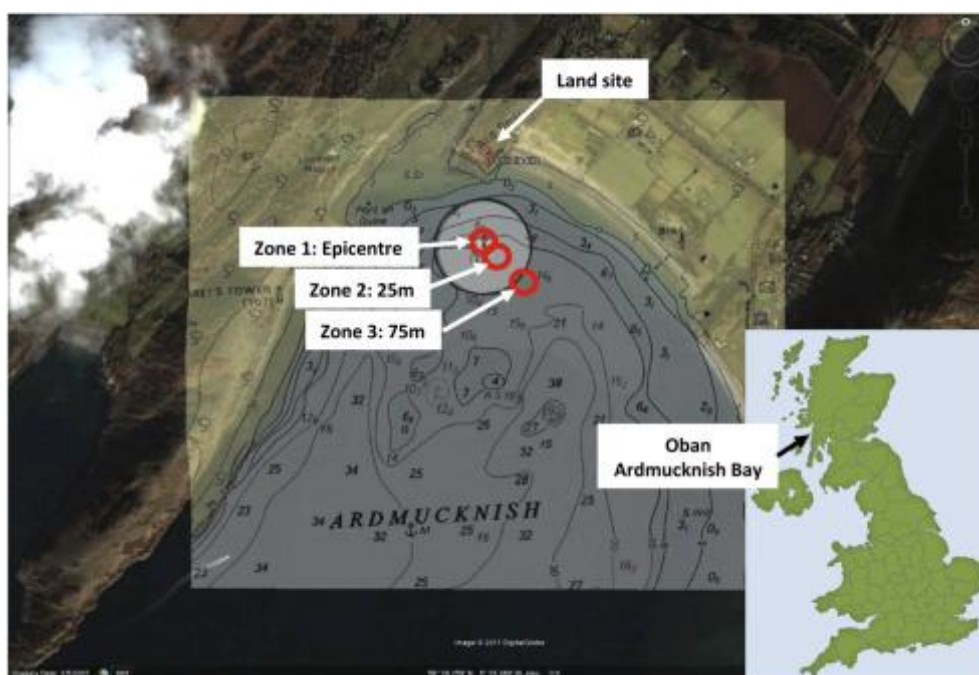
	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5	LT6	LT7	LT8
Pohjoinen	46,0 %	38,8 %	40,2 %	38,0 %	44,7 %	37,2 %	39,1 %	37,2 %
Etelä	90,7 %	84,5 %	92,9 %	85,6 %	87,3 %	79,5 %	90,3 %	80,7 %

Tutkimustuloksista huomataan, kuinka tehokas monitorointitekniikka meren pH-arvon tarkkailu on varastointialueen sijaitessa merialueen pohjan alapuolella. pH-arvon pitkäaikainen noin yhden yksikön alenemisen on esitetty olevan merkittävän haitallista meren eliöstölle. Keskiarvoltaan 10 000 t CO₂ päivävuoto aiheutti vuotokohdan läheisyyteen suurimmillaan 2,50 yksikön pH-arvon laskun. 1 000 t CO₂ päivävuodon vastaava happamoitumisen

keskiarvo oli 1,09 yksikköä. Suuria vuotoprosentteja voidaan kuitenkin selittää tutkimuksen lyhyellä kestolla sekä varastointipaikan sijainnilla lähellä maanpintaa.

4.2.3 CO₂-vuoto sedimentin läpi merenpohjan alaisesta varastosta

Tutkimus suoritettiin Ardmucknish Bay -lahdella Skotlannin länsirannikolla (kuva 10). Tutkimusalue on jaettu neljään vyöhykkeeseen näytteenottoa ja monitorointia varten. Vyöhykkeenä 1 toimii hiilidioksidin vapautumiskohta, joka sijaitsee 350 metrin päässä rannasta. Vyöhykkeet 2 ja 3 sijaitsevat 25 metrin ja 75 metrin päässä vapautumiskohdasta. Hiilidioksidin vapautumiskohdan kerrostunut sedimenttirakenne koostuu kahdeksan metrin paksuisesta mutakerroksesta, kahden metrin paksuisesta kerroksesta hienoa lietehiekkaa sekä noin kahden metrin paksuisesta hiekka- ja sorakerroksesta. (Shitashima, Kiminori, Maeda & Sakamoto, 2015.)

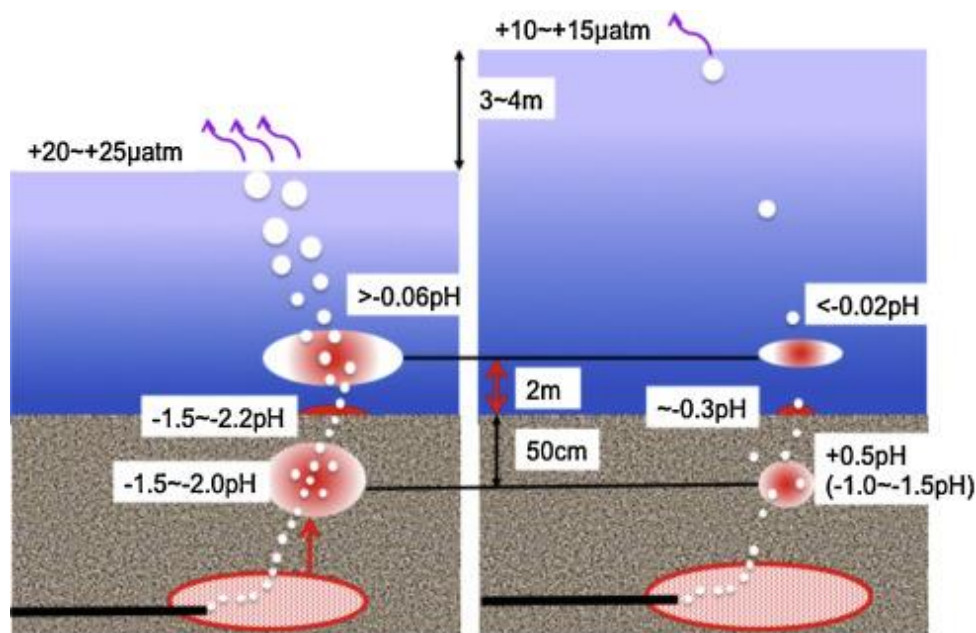


Kuva 10. Tutkimusalue. (Shitashima, Maeda & Sakamoto, 2015.)

Injektointireikä hiilidioksidin syöttöä varten porattiin rannalta (kuvassa 10 ”land site”) 11 metriä merenpinnan alapuolelle. Hiilidioksidin injektointi alkoi 17. toukokuuta ja päättyi 23. kesäkuuta. Sedimentteihin injektointiin yhteensä 4,2 t CO₂ 37 päivän ajan. Aluksi hiilidioksidia injektointiin 10 kg CO₂/päivä, mikä nostettiin 83 kg:aan CO₂/päivä kolme päivää myöhemmin, 150 kg:aan CO₂/päivä 23 päivää myöhemmin ja 210 kg:aan CO₂/päivä 33 päivää

myöhemmin. Usean tunnin jälkeen hiilidioksidin injektoinnin aloittamisesta merenpohjassa havaittiin pieniä kaasukuplia. (Shitashima, Maeda & Sakamoto, 2015.)

Vyöhykkeellä 1 sijainneen meriveden pH- ja hiilidioksidipaineanturin keräämän tiedon perusteella kaikki injektoidusta hiilidioksidista ei vapautunut sedimentin ja meren rajapinnasta kuplina. Vastaavanlaisessa tutkimuksessa oli lisäksi huomattu, että 15 % injektoidusta hiilidioksidista vapautui sedimentistä veteen kaasukuplina (Blackford et al., 2014). Näin ollen 85 % hiilidioksidista joko varastoitui sedimenttiin tai siirtyi tutkimusalueen ulkopuolelle. Injektoitu hiilidioksidi kerääntyi todennäköisesti sedimenttiin ja siitä vapautui vähitellen yhden päivän ajan injektoinnin lopettamisen jälkeen. Siksi todennäköisesti vyöhykkeen 1 pH-anturi havaitsi kertyneen hiilidioksidin poistumisen. pH-arvo palasi perusarvoon varastoituneen hiilidioksidin vapautumisen jälkeen. pH- ja painesensorien arvot on esitetty kuvassa 11. (Shitashima, Maeda & Sakamoto, 2015.)



Kuva 11. Vasemmalla tulokset luoteen eli laskuveden aikana. Oikealla tulokset vuoksen eli nousuveden aikana. (Shitashima, Maeda & Sakamoto, 2015.)

Kuvasta 11 huomataan, että vuoksen aikana (korkeampi vesipatsas aiheuttaa suuremman vedenpaineen) injektoidu hiilidioksidi siirtyy hitaammin mataliin sedimentteihin, kuin luoteen aikana. Koska korkeampi vedenpaine rajoittaa hiilidioksidin vapautumista, lisäksi merivesi happamoituu vähemmän sekä hiilidioksidipäästöt ilmakehään ovat matalammat. Vertailukelpoisia tuloksia on saatu myös paljon syvemmällä, noin 1 400 metrin syvyydellä,

merialueella (Shitashima, K., Maeda, 2005). Tämä tulos viittaa siihen, että vuorovedellä on vaikutusta pluumien (kuplien) vapautumiseen, vaikka merialue olisi syvä. Siksi vuoroveden jaksollisuudella on suuri vaikutus merenpohjan alapuolella sijaitsevien varastojen hiilidioksidivuotojen vaihtelulle myös CCS:n todellisessa skenaariossa. (Shitashima, Maeda & Sakamoto, 2015).

4.2.4 In Salah

In Salah -varastointiprojekti sijaitsee Algeriassa, ja sitä johtavat yhdessä BP (British Petroleum), Statoil ja Sonatrach. Tämä täysin operatiivinen maalla sijaitseva kaasukenttä, joka vastaanottaa hiilidioksidin In Salahin öljykentältä. Varastomuodostuma on köyhdytetty öljy- ja maakaasukenttä, jotka sijaitsevat 1 800, 1 850 ja 1 900 metrin syvyydessä maanpinnasta. Hanke käynnistyi vuonna 2004. Muodostuman kokonaiskapasiteetin arvioidaan olevan noin 17 Mt CO₂ ja vuosina 2004–2011 varastoon injektoitiin yhteensä 4 Mt CO₂. (Aminu et al., 2017.)

Projektialuetta on monitoroitu tarkasti InSAR-tutkan ja seismisen datan avulla. Injektointi keskeytettiin kesäkuussa 2011 pelon vuoksi liittyen kallion (eng. *caprock*) eheyteen. Hiilidioksidivuotoja ilmakehään ei kuitenkaan nähty tapahtuvan. Injektointi aiheutti varastoon huomattavaa seismistä aktiivisuutta, jonka seurauksena tulevaisuuden injektiostrategioita on tarkastettu ja tehostettu kattavampien monitorointistrategioiden avulla. Hankkeen avulla saatu kokemus on auttanut ymmärtää hiilidioksidin injektioikykyä muissa ympäristöissä, missä varastointi on joko käynnissä tai jotka on tarkoitettu vähäisen läpäisevyyden omaaville varastoille. (Aminu et al., 2017.)

4.2.5 Ketzin

Ketzin-varastointiprojekti sijaitsee Ketzinissä, Saksassa, ja sitä johtivat Saksan geotieteiden tutkimuskeskus GFZ sekä Ketzin Partners. Hanke on ensimmäinen maalla oleva varastointiprojekti Euroopassa, joka alkoi vuonna 2008 ja saatiin päätökseen vuonna 2009. Hanke toimi suhteellisen lyhyen ajan verrattuna muihin suuren kokoluokan varastointiprojekteihin. Hankkeen tarkoitus oli varastoida hiilidioksidia geologisesti, jotta siitä saatavaa monitorointitietoa voitaisiin tarjota tulevia linjauksia ja ympäristölainsäädäntöä varten. Hiilidioksidi

varastoitiin suolavesikerrostumaan noin 630 metrin syvyyteen ja sitä injektoitiin onnistuneesti varastoon 67 671 t CO₂ hankkeen loppuun mennessä. Vaikka hiilidioksidi varastoitiin optimisyvyyttä hieman lähemmäksi maanpintaa, monitorointitiedot hiilidioksidin virtauskäyttäytymisestä eivät ole viitanneet vuotoihin. (Aminu et al., 2017.)

4.2.6 Weyburn-Midale

Weyburn-Midale-varastointiprojekti sijaitsee Kanadassa, jota hallinnoi Cenovus Energy, Apache Canada ja Petroleum Technology Research Centre (PTRC). Hankkeen tarkoituksena oli tehostaa öljyntuotantoa noin 34 % (EOR, luku 4.4.1). Vuosina 2000–2012 toiminut hanke oli melkein 20 vuotta maailman suurin varastointiprojekti. Hiilidioksidin ruiskutus tapahtui noin 3 000–5 000 t CO₂ päivänopeudella. Köyhdytettyyn öljykenttään varastoidun hiilidioksidin kokonaismääräksi arvioitiin noin 20 Mt CO₂. Arvio kuitenkin on tehty hankkeen alkuaikoina, kun keston odotettiin olevan 20–25 vuotta, joten varastointimäärä on luultavasti pienempi. (Aminu et al., 2017.)

Vuonna 2011 mediassa kiisteltiin varaston vuotaneen hiilidioksidia ja vaikuttaneen injektio paikan lähellä olevan maatilan kasvustoon ja eläimiin. Monien monitorointitekniikoiden, kuten CO₂-isotooppianalyysin avulla on todistettu, ettei hiilidioksidivarasto ole vuotanut.

4.3 Monitorointi

Hiilidioksidin vuoto geologisista varastoista on tunnistettu tutkimuksissa yhtenä mahdollisista esteistä laajamittaisen CCS:n käyttöönotolle. Lisäksi kuvasta 8 voidaan todeta vuotoriskin kriittisen ajan olevan injektio aikana ja välittömästi sen jälkeen, sillä rakenteellisen ja stratigrafisen loukun vaikutus hiilidioksidin varastointiin on ylivoimaisesti suurin. Kyky havaita ja määrittää nämä mahdolliset vuodot geofysikaalisten tai -kemiallisten monitorointimenetelmien avulla on kuitenkin haastavaa. (Appriou et al., 2020.)

Varastointialuetta on monitoroitava seuraavista syistä (Kühn, 2011):

1. **Turvallisuuden ja ympäristönsuojeluun liittyvät asiat:** On varmistettava, etteivät ihmiset, eläimet ja ekosysteemi vaarannu. Lisäksi sovitut ilmastonsuojelutavoitteet on saavutettava.
2. **Yhteiskunnalliset syyt:** Varastoinnin turvallisuuden yksityiskohdista vaaditaan täydellistä rehellisyyttä ja avoimuutta tarvittavan luottamuksen rakentamiseksi väestön keskuudessa.
3. **Taloudelliset syyt:** Varastoitua hiilidioksidimäärää on monitoroitava, jotta se voidaan määrittää ”estetyiksi päästöiksi” Euroopan unionin päästökauppaohjelmassa.
4. **Operatiiviset syyt:** Injektointiprosessin hallitsemiseksi ja optimoimiseksi.

4.3.1 Monitorointitekniikat

Monitorointistrategia kattaa injektiota edeltävän, injektion aikaisen ja injektion jälkeisen vaiheen käyttäen joukkoa tekniikoita, joiden tarkoitus on varmistaa varaston eheys, vuotojen puuttuminen sekä varastoidun hiilidioksidin määrä ja geometria. Monitoroinnin avulla myös vahvistetaan CCS-hankkeen tavoitteita, kuten ennustettua suorituskykyä. Erilaiset monitorointitekniikat voidaan jaotella eri ryhmiin, joista jokaisella on oma soveltamisalansa hankittavien tietojen ja varastointialueen ympäristön olosuhteiden mukaan. Seuraavaksi käsitellään osa CCS:n esittelyhankkeissa käytetyistä monitorointitekniikoista. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Seisminen monitorointi (eng. *seismic monitoring*): Käytetään sekä aktiivisia että passiivisia järjestelmiä. Aktiivisessa järjestelmässä käytetään energianlähdettä muodostamaan akustisia aaltoja, joiden avulla saadaan tietoa varastoalueen geologiasta. Passiivisessa järjestelmässä geofonit tallentavat nesteiden liikkumisesta tai murtumien muodostumisesta syntyviä värähtelyjä ja mikromaanjärjestyksiä. Käyttämällä näitä menetelmiä injektointia edeltävässä vaiheessa, voidaan tunnistaa varastointialueen ominaisuudet ja rakenteellinen eheys. Injektion aikana sekä sen jälkeen voidaan tarkkailla CO₂-pluumin evoluutiota. 3D-seuranta tuottaa kolmiulotteisen kuvan maanalaisista rakenteista sekä CO₂-pluumista. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Aikarajattua (eng. *time lapse*) tai 4D-seurantaa käytetään taas pluumin evoluution tarkkailuun läpi tietyn ajan. Laadukas 3D-seuranta pystyy tunnistamaan hiilidioksidimassat, joiden massa on yli 106 kg ja sijaitsevat 1–2 km:n syvyydessä. Tämä on toimiva tekniikka merenpohjanalaisten varastojen monitoroinnissa, jossa väliaineena oleva vesi parantaa seismisten aaltojen tunkeutumista. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Geoelektriset menetelmät (eng. *geoelectrical methods*): Perustuvat hiilidioksidin aiheuttamaan resistiivisyyden vaihteluun. Kun hiilidioksidi syrjäyttää korkeamman johtavuuden omaavia nesteitä, ts. suolaliuoksia, resistiivisyyden vaihtelusta voidaan määrittää varaston CO₂-kyllästysaste ja injektoidun pluumin alueellinen jakautuminen. Mitä suurempi ero sähköjohtavuudessa hiilidioksidin ja syrjäytyneiden nesteiden välillä, sitä vahvempi signaali saadaan. Kun hiilidioksidi on liennut veteen, resistiivisyysero laskee hyvin pieneksi. Tämän takia menetelmää voidaan hyödyntää vain vapaan hiilidioksidin monitorointiin ennen sen liukenemista. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Lämpötilalokit (eng. *temperature logs*): Hiilidioksidin injektointiin liittyy joukko lämpöprosesseja, esimerkiksi Joulen ja Thomsonin ilmiö sekä lämmönsiirto, jotka aiheuttavat lämpötilan muutoksia CO₂-pluumin ympärille. Lämpötilan vaihtelun monitorointi voi auttaa tunnistamaan varaston sisäisiä virtausreittejä. Luotettavampien tulosten saavuttamiseksi voidaan kehittää matemaattisia malleja, jotka perustuvat varastointialueen geologiaan sekä injektoidun hiilidioksidin tilavuuksiin ja sen vuorovaikutukseen ympäröivien nesteiden kanssa. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Gravimetriset menetelmät (eng. *gravimetry methods*): Hiilidioksidin injektoinnista johtuvat muutokset maanalaisessa tiheydessä voidaan havaita pienellä häiriöllä paikallisessa painovoimakentässä. Tiheyden laskeminen havaitaan, kun hiilidioksidi syrjäyttää varaston sisällä tiheimmän suolaliuoksen. Näiden muutosten tarkkailu antaa tietoa hiilidioksidin leviämisen nopeudesta. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Kaukokartoitus (eng. *remote sensing*): Suurien fluiditilavuuksien injektointi voi tuottaa tietynasteisen ylipaineen, joka aiheuttaa maanpinnan muodonmuutokseen. Muodonmuutos voidaan havaita ilmasta InSAR-tutkan (Interferometric Synthetic Aperture Radar) tai satelliittiseuranna avulla. 3 Mt CO₂:n injektointi In Salahin kaasukenttään (luku 4.2.4) aiheutti 5

mm:n maanpinnan nousun vuodessa. Pinnan muodonmuutos havaittiin InSAR:n avulla. Kaukokartoituksen avulla voidaan määrittää varastointialueen pinnan sijainti. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Geokemiallinen näytteenotto (eng. *geochemical sampling*): Keräämällä näytteitä varastointialueen nesteistä, voidaan tarkkailla hiilidioksidin injektoinnin aiheuttamia kemiallisia muutoksia. Selvin hiilidioksidin vaikutus on meriekosysteemissä pH-arvon lasku ja siitä johdettu mineraalien, kuten karbonaattien ja silikaattien, pitoisuuksien muutokset. Tätä tekniikkaa hyödynnetään lukujen 4.2.2 ja 4.2.3 tutkimuksissa. pH-arvon laskusta voidaan tunnistaa noin 103 t CO₂ suuruinen vuosittainen vuoto. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

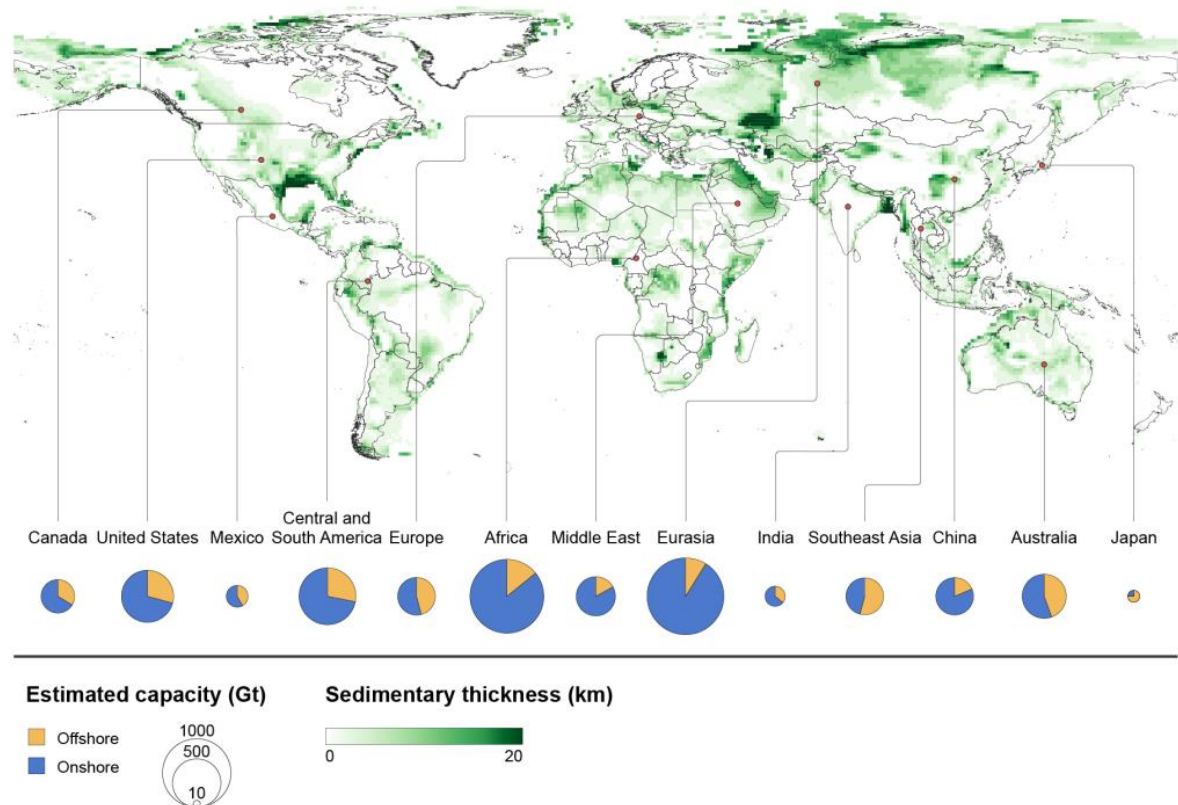
Ilmakehän monitorointi (eng. *atmospheric monitoring*): Hiilidioksidi voi vuotaa varastosta ja pahimmassa tapauksessa vapautua ilmakehään. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta tarkkailemalla voidaan tunnistaa luonnollista perustasoa korkeammat poikkeavuudet. Luonnollisten hiilidioksidiarvojen vaihtelu maaperän hengityksen, orgaanisen aineen hajoamisen tai erityisten ilmasto-olosuhteiden seurauksena voi kuitenkin vaikuttaa tämän tekniikan luotettavuuteen. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

Merkkiaineet (eng. *tracers*): Tiettyjen yhdisteiden samanaikainen injektointi hiilidioksidin kanssa tuottaa tietynlaisen ”sormenjäljen” varastoidulle hiilidioksidille. Nämä merkkiaineet voidaan havaita hyvin pieninä pitoisuuksina (ppm:n suuruusluokissa) eli ne eivät estä minikään tyyppisen vuodon toteutumista. Eräässä tutkimuksessa merkkiaineena on käytetty metaania CH₄ ja rikkiheksafluoria SF₆, kun hiilidioksidia varastoitiin köyhdytettyyn maakaasukenttään. 150 päivän kuluttua injektoinnin aloittamisesta merkkiainetta havaittiin näytteissä, jotka otettiin 700 metrin päässä injektio pisteestä. Tämä antaa arvion hiilidioksidin diffuusiokyvystä varaston sisällä. (Leung, Caramanna & Maroto-Valer, 2014.)

4.4 Potentiaali

Hiilidioksidin geologisen varastoinnin tekninen kokonaiskapasiteetti maailmanlaajuisesti on epävarma. Etenkin suolaiset pohjavesikerrokset vaativat lisää kartoittamista. Varastoinnin potentiaalini oletetaan kuitenkin olevan niin suuri, ettei kapasiteetiltaan rajoita CCUS:n kehitystä. Globaalin kokonaisvarastointikapasiteetin on arvioitu olevan 8 000–55 000 Gt CO₂

(IEA, 2020c). Euroopan varastointipotentialiksi on arvioitu noin 300 Gt CO₂ (European Commission, 2019). Eri alueiden teoreettiset varastointikapasiteetit on esitetty kuvassa 12. Varastointikapasiteettiluvut voivat vaihdella jonkin verran laskutavan mukaan (Teir et al., 2011).



Kuva 12. Maapallon teoreettiset varastointikapasiteetit [Gt CO₂]. Sedimentin paksuus [km] toimii indikaattorina varastointipaikan teoreettisesta potentiaalista. Merellä sijaitsevien (eng. *offshore*) varastojen kapasiteetti-arvioinneissa ei oteta huomioon paikkoja, jossa veden syvyys on yli 300 metriä ja sijainti on yli 300 kilometriä rannasta. Arktista ja Antarktista ei myöskään oteta huomioon. (IEA, 2020c.)

4.4.1 Enhanced Oil Recovery (EOR)

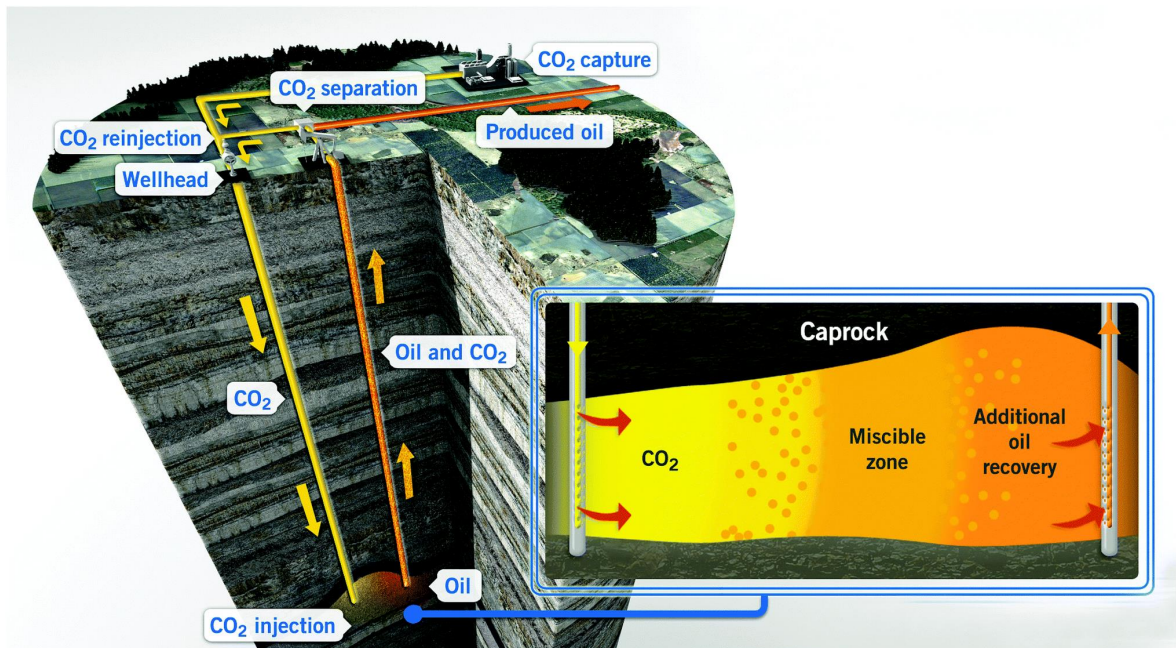
Aiemmin luvussa 4 todetaan, että köyhdytetyt öljykentät soveltuvat hiilidioksidin varastointikohteeksi. Kentän varastointipotentialia voidaan hyödyntää öljyn tuotannon vielä ollessa käynnissä tehostetun öljyntuotannon eli EOR-menetelmien avulla.

Öljyntuotanto voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Primäärivaiheessa öljyntuotanto perustuu öljykentän painegradientteihin, jotka saavat öljyn virtaamaan luonnollisesti kohti maanpintaa. Ajan kuluessa öljyntuotanto vähenee öljykentän paineen laskun seurauksena. Tässä

vaiheessa sekundäärivaihe otetaan käyttöön, kun primäärivaiheen tuotanto ei ole enää tarpeeksi tehokasta. Toisen vaiheen päätarkoitus on tehostaa öljyntuotantoa lisäämällä öljykentän painetta injektoimalla sinne esimerkiksi vettä tai ensimmäisen vaiheen aikana tuotettua maakaasua. Näiden kahden öljyntuotantovaiheen avulla saadaan hyödynnettyä noin 20–40 % koko öljymäärästä (Energy.gov, 2020). Kun sekundäärivaihe ei ole enää tuotannollisesti tehokasta, siirrytään kolmanteen vaiheeseen. (Lee, Cho & Lee, 2020.)

Kolmannessa vaiheessa tapahtuu aiemmin mainittu tehostetuttu öljyntuotanto. Ero toiseen vaiheeseen on se, että injektoitava fluidi (tässä tapauksessa CO₂) muuttaa öljyn ominaisuuksia eikä ylläpidä öljykentän painetta. CO₂-EOR:ää pidetään yhtenä lupaavimpana EOR-menetelmänä. Kyseisessä menetelmässä öljykenttään injektoitu hiilidioksidi sekoittuu öljyn kanssa tehden siitä harvempaa ja näin ”työntää” öljyä kohti talteenottokaivoa (kuva 13). EOR:n avulla öljykentän öljystä saadaan hyödynnettyä jopa 30–60 %, ja joskus jopa enemmän (Energy.gov, 2020). Hiilidioksidin injektointipaineessa on huomioitava, ettei öljykentän paine kasva liian korkeaksi, minkä seurauksena varasto voisi murtua. (Lee, Cho & Lee, 2020.) Koko prosessin aikana yli 95 % injektoidusta hiilidioksidista jää loukkuun geologiseen muodostumaan (Azzolina et al., 2016).

Nykyään Yhdysvalloissa EOR-menetelmissä yhtä öljybarrelia (159 litraa) kohden injektoidaan noin 0,3–0,6 t CO₂. Injektointimäärä tosin vaihtelee prosessin elinkaaren aikana. Maailmanlaajuisesti arviolta 190–430 miljardia barrelia öljyä on teknillisesti hyödynnettävissä CO₂-EOR:n avulla. Tämä edellyttäisi/mahdollistaisi 60–390 Gt CO₂ injektoimista. Suurin EOR-potentiaali on Yhdysvalloissa, mutta myös Keski-Aasiassa, Lähi-idässä ja Venäjällä on hyvät näkymät. Suurimmat esteet CO₂-EOR:n laajemmalle leviämislle ovat kuitenkin hankkeiden korkeat pääomakustannukset, sopiva geologinen sijainti sekä hiilidioksidin kuljettamisinfraan puute. (IEA, 2020c.)



Kuva 13. CO₂-EOR -menetelmä yksinkertaistettuna. (IEA, 2015.)

4.5 Toiminnassa olevia varastoinnin kehitysprojekteja

Jotta CCS-teknologia löisi itsensä läpi konkreettiseksi työkaluksi ilmaston lämpenemisen torjumiseksi, se vaatii paljon tutkimusprojekteja. Tutkimukset vaativat suuria investointeja, joita varten on syntynyt rahoittavia yrityksiä. ACT (Accelerating CCS Technologies) on yksi yrityksistä, joka rahoittaa CCS:än liittyviä tutkimus- ja innovaatioprojekteja. ACT:n kahdeksan ensimmäistä rahoittamaa hanketta aloittivat vuonna 2017, mistä osa on tullut jo päätökseensä. Tässä luvussa käsitellään pintapuolisesti kaksi ACT:n rahoittamaa käynnissä olevaa tutkimusprojektia.

4.5.1 SENSE

SENSE on Norjan geoteknisen instituutin koordinoima projekti, joka käynnistyi syksyllä 2019 ja se tulee päätökseen syksyllä 2022. Projektissa on tarkoitus kehittää luotettavaa ja kustannustehokasta maalla ja merellä käytettävää monitorointitekniikkaa, joka perustuu maanpinnan liikkeen havaitsemiseen yhdistettynä geomekaaniseen mallintamiseen, inversioon, uusien tekniikoiden hyödyntämiseen ja tietojenkäsittelyn optimointiin. Tämän projektin tavoitteena on osoittaa, kuinka maanpinnan liikettä voidaan käyttää kiinteänä osana monitorointiohjelmaa hiilidioksidin turvallisen geologisen varastoinnin varmistamisessa.

Tarkoituksena on siis kehittää luvussa 4.3.1 käsiteltyä kaukokartoitustekniikkaa ja yhdistää sitä muun muassa kuituoptiikkaan. (ACT, 2021.)

4.5.2 REX-CO₂

REX-CO₂ on Alankomaiden sovelletun tieteellisen tutkimuksen järjestön koordinoima hanke, joka käynnistyi syksyllä 2019 ja se tulee päätökseen syksyllä 2022. Hankkeen tarkoituksena on tarjota uudenlaisia ratkaisuja vanhoille käyttämättömille öljy- ja kaasukenttien kairareille. Kaivojen uudelleen uudelleenkäyttö on päinvastainen ongelma viallisten kaivojen tunnistamiseen, jotka soveltuisivat jatkuvaan käyttöön. Kehitteille on prosessi, joka säästää samanaikaisesti CO₂-varastointiprojektien kustannuksia ja aikaa tunnistamalla olemassa olevan infrastruktuurin, joka on turvallinen uudelleenkäytettäväksi. Tämä tapahtuisi korjattavien kaivojen määrittämisen yhteydessä. (ACT, 2021.)

Käyttämättömien kairareikien uudelleenkäytöstä voi olla hyötyä projekteille kaikissa geologisissa olosuhteissa. Eniten hyötyisivät merellä sijaitsevat projektit, jossa kaivon kehittämiskustannukset voisivat muuten olla kohtuuttomia. Huomattavia säästöjä voitaisiin saavuttaa käyttämällä kaivoja uudelleen injektointi-, monitorointi- tai paineenhallintakaivoina. Marraskuussa 2020 hanke julkaisi ensimmäisen työkalunsa kaivojen uudelleen käytölle. Työkalun olisi tarkoitus antaa korkean tason arvio kaivon sementin sekä varastointialueen päällä olevan kivikerroksen eheydestä. (ACT, 2021.)

4.6 Tulevaisuus

Teoreettisen varastointikapasiteetin muuttaminen todelliseksi käytännön varastoiksi vaatii tulevaisuudessa merkittävästi lisätoita. Tämä edellyttää yksityiskohtaista ymmärrystä mahdollisten varastointikohteiden kapasiteeteista, hallinnasta, injektoitavuudesta sekä kaupallisuus- ja kustannuspuolista. Myös sääntelyn ja yhteiskunnan kehityksen aiheuttamat esteet on ymmärrettävä. Historia osoittaa, että tämä voi kestää 1–15 vuotta varastointitavasta riippuen ja se tulee viime kädessä edustamaan nykyistä suurempaa osuutta tulevista CCS:n kustannuksista. (IEA, 2016.)

Luotettavuus tulevaisuuden varastointikapasiteettiin on myös erittäin tärkeää, jotta vaikuttaminen tänä päivänä tehtäviin pitkän aikavälin ilmasto- ja energiapoliittisiin päätöksiin olisi mahdollista. Todellisen ja luotettavan hiilidioksidin varastointikapasiteetin suuruus ja sijainti vaikuttavat tuleviin investointeihin energiaintensiivisessä energiantuotannossa ja teollisuudessa. On myös tärkeää arvioida, onko CCS käyttökelpoinen työkalu päästöjen torjunnassa jo nykyisin toimivassa infrastruktuurissa. Mitä paremmin varastointinäkömät ymmärretään, sitä paremmin perusteltuja tulevaisuuden politiikan ja suunnittelun päätökset voivat olla. Hallitusten tulisi lisäksi pyrkiä maksimoimaan jo edistyneiden hankkeiden onnistumisen vähentämällä poliittisen epävarmuuden ja riittämättömän tuen mahdollisuutta. Hiilidioksidin siirtämisen kehitys vaikuttaa myös varastointipaikkojen hyödyntämiseen. CCS-teollisuutta voisi tällä sektorilla jatkokehittää esimerkiksi maakaasualan rinnalla. (IEA, 2016.)

Varmaa on, että tulevaisuudessa päästökauppa tulee näyttelemään yhtenä isona CCS-hankkeita eteenpäin ajavana voimana. Päästöoikeuksien hintojen noustessa CCS ja samalla hiilidioksidin geologinen varastointi tulee yhä houkuttelevammaksi. Päästöoikeuksien hinnat vaihtelevat ympäri maailmaa suuresti joidenkin alueiden nollasta eurosta useampien maiden 20–50 €/t CO₂e. Vuoden 2021 alussa EU:n yhteisellä huutokauppapaikalla (EEX) päästöoikeudet ovat maksaneet noin 33–40 €/t CO₂e (Energiavirasto, 2021). Halvemmat talteenotto-tekniikat, kuten happipoltto moderneissa voimalaitoksissa, tulevat todennäköisesti yleistymään ensin, kun päästöoikeuksien hinta on yli 40 €/t CO₂e. CCS-tekniikka tulee osaksi paljon saastuttavia energiantuotantomuotoja sekä rauta-, teräs ja sementtiteollisuutta todennäköisesti vain päästöoikeuksien hinnan ollessa yli 80 €/t CO₂e. (Ringrose, 2020.)

5 YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen vaikutukset koko ihmiskuntaan ovat merkittävät. Esiteolliseen aikaan verratun maapallon keskilämpötilan nousun rajoittaminen Pariisin ilmastopimuksen optimisemmän tavoitteen 2 °C:seen vaatii valtavasti töitä. Yhden merkittävimmän kasvihuonekaasun, hiilidioksidin, talteenotto ja varastointi ovat tärkeitä työkaluja tämän tavoitteen saavuttamisessa.

Hiilidioksidin varastoinnin erityiskysymyksiksi nousivat geologisen varastoinnin toimivuus ja luotettavuus. Kuinka suuri on varastointipotentiaali? Kuinka suuri geologisen varaston hiilidioksidivuodon määrä voisi olla? Miten varastointialuetta on mahdollista monitoroida? Varastointiin liittyvät erityiskysymykset ja haasteet peilautuvat koko CCS:n soveltuvuuteen taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Epävarmuus ja tutkimustulosten haastava saatavuus jättää myös tilaa disinformaation levittämiselle. Jos varastointivaiheen toimivuus ei ole tarvittavalla tasolla, on turha kuluttaa resursseja ketjun alkupäässä olevaan kalliiseen talteenototekniikkaan.

Käytännön sekä laskennalliset tutkimukset ovat osoittaneet hiilidioksidin geologisen varastoinnin mahdolliseksi alle 0,01 %:n vuotuisella vuodolla realistisessa ympäristössä hyvin valvotulla alueella, kun pitoaika on vähintään sata vuotta. Tätä voidaan pitää riittävän tehokkuuden mittarina. Monessa skenaariossa raja-arvo alittui reilusti, joten kokonaisvuoto jää sallittua paljon pienemmäksi. Suurten varastointialueiden pitkäaikaisen tutkimusdatan puute sekä vaikea saatavuus vaikeuttavat kuitenkin kokonaiskuvan muodostamista. Erilaisten ennustusten sekä ekstrapolointien avulla on silti pystytty toteamaan varaston varastointikyvyn parantuvan huomattavasti varastointiajan pidentyessä. Tämä on mahdollista perustella eri varastointimekanismien suhteellisella vaikutuksella injektoidun hiilidioksidin varastointiin ajan kuluessa. Luonnonilmiöiden, kuten vuoksen, on myös todettu vaikuttavan positiivisesti offshore-varastointialueen varastointikykyyn.

Varastointi vaatii kuitenkin tulevaisuudessa vielä lisätöitä eli se edellyttää yksityiskohtaista ymmärrystä mahdollisten varastointikohteiden kapasiteeteista, hallinnasta, injektointitavusta sekä kaupallisuus- ja kustannuspuolista. Myös poliittisen sääntelyn, yhteiskunnan kehityksen ja esimerkiksi päästöoikeuksien hintojen kehityksen vaikutukset on ymmärrettävä.

LÄHTEET

- ACT. Accelerating CCS Technologies. [verkkoaineisto]. [viitattu 16.1.2021]. Saatavissa: <http://www.act-ccs.eu/>
- Alcalde, J., Flude, S., Wilkinson, M., Johnson, G., Edlmann, K., Bond, C.E., Scott, V., Gillfillan, S.M.V., Ogaya, X. & Haszeldine, R.S. 2018, "Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation", *Nature Communications*, vol. 9, pp. 1-13.
- Alonso, M., Rodríguez, N., González, B., Grasa, G., Murillo, R. & Abanades, J.C. 2010, "Carbon dioxide capture from combustion flue gases with a calcium oxide chemical loop. Experimental results and process development", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 2, pp. 167-173.
- Aminu, M.D., Nabavi, S.A., Rochelle, C.A. & Manovic, V. 2017, "A review of developments in carbon dioxide storage", *Applied Energy*, vol. 208, pp. 1389-1419.
- Appriou, D., Bonneville, A., Zhou, Q. & Gasperikova, E. 2020, "Time-lapse gravity monitoring of CO₂ migration based on numerical modeling of a faulted storage complex", *International journal of greenhouse gas control*, vol. 95, pp. 102956.
- Azzolina, N.A., Peck, W.D., Hamling, J.A., Gorecki, C.D., Ayash, S.C., Doll, T.E., Nakles, D.V. & Melzer, L.S. 2016, "How green is my oil? A detailed look at greenhouse gas accounting for CO₂-enhanced oil recovery (CO₂-EOR) sites", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 51, pp. 369-379.
- Blackford, J., Stahl, H., Bull, J.M., Bergès, B.J.P., Cevatoglu, M., Lichtschlag, A., Connelly, D., James, R.H., Kita, J., Long, D., Naylor, M., Shitashima, K., Smith, D., Taylor, P., Wright, I., Akhurst, M., Chen, B., Gernon, T.M., Hauton, C., Hayashi, M., Kaieda, H., Leighton, T.G., Sato, T., Sayer, M.D.J., Suzumura, M., Tait, K., Vardy, M.E., White, P.R. & Widdicombe, S. 2014, "Detection and impacts of leakage from sub-seafloor deep geological carbon dioxide storage", *Nature climate change*, vol. 4, no. 11, pp. 1011-1016.
- Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A., Anthony, E.J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P.S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L.A., Hallett, J.P., Herzog, H.J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G.C., Matuszewski, M., Metcalfe, I.S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D.M., Rubin, E.S., Scott, S.A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J.P.M., Webley, P., Wilcox, J. & Mac Dowell, N. 2018, "Carbon capture and storage (CCS): the way forward", *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 5, pp. 1062-1176.
- Energiavirasto. Päästöoikeuksien huutokauppa. [verkkoaineisto]. [viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/huutokauppa>
- Energy.gov. Enhanced Oil Recovery. [verkkoaineisto]. [viitattu 23.12.2020]. Saatavissa: <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/oil-gas-research/enhanced-oil-recovery>

- European Commission, 2019. The potential for CCS and CCU in Europe. Report to the thirty second meeting of the European Gas Regulatory Forum 5-6 June 2019.
- Fridahl, M. 2018, Bioenergy with carbon capture and storage: From global potentials to domestic realities.
- GHG, I. 2008, "Assessment of Sub-Sea Ecosystem Impacts", IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham.
- IEA, 2015. Carbon Capture and Storage: The solution for deep emissions reductions.
- IEA 2016, 20 Years of Carbon Capture and Storage: Accelerating Future Deployment, International Energy Agency, Paris.
- IEA 2019, Global Energy & CO2 Status Report 2018: the latest trends in energy and emissions in 2018, International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2020a. Global CO2 emissions in 2019, IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [päivitetty 11.2.2020] [viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>
- IEA, 2020b. CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview, IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 30.12.2020]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>
- IEA 2020c, Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, OECD Publishing, Paris.
- Ilmatieteen laitos. Kasvihuonekaasujen pitoisuudet. [verkkoaineisto]. [viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-pitoisuudet>
- IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Kühn, M. 2011, "CO2-Speicherung. Chancen und Risiken", Chemie in unserer Zeit, vol. 45, no. 2, pp. 126-138.
- Lee, K.S., Cho, J. & Lee, J.H. 2020, CO2 storage coupled with enhanced oil recovery, 1st edn, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland.
- Leung, D.Y.C., Caramanna, G. & Maroto-Valer, M.M. 2014, "An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, pp. 426-443.
- Phelps, J.J.C., Blackford, J.C., Holt, J.T. & Polton, J.A. 2015, "Modelling large-scale CO2 leakages in the North Sea", International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 38, pp. 210-220.

- Ringrose, P. 2020, *Future of CCS—What Happens Next?*, Springer International Publishing, Cham.
- Shitashima, K. & Maeda, Y. 2005, "Behaviour of hydrothermal plumes and tidal currents in the Suiyo Seamount caldera", *Oceanogr.Jpn.*, vol. 14, pp. 297-307.
- Shitashima, K., Maeda, Y. & Sakamoto, A. 2015, "Detection and monitoring of leaked CO₂ through sediment, water column and atmosphere in a sub-seabed CCS experiment", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 38, pp. 135-142.
- Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. 2011, *Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS): Teknologia katsaus*, VTT Technical Research Centre of Finland.
- UNEP, 2019. United Nations Environment Programme. *Emissions Gap Report 2019*. UNEP, Nairobi. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.10.2020].