

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Negatiiviset hiilidioksidipäästöt ilmastonmuutoksen  
hillinnässä

Negative carbon dioxide emissions in the mitigation of  
climate change

Työn tarkastaja: Markku Nikku

Työn ohjaaja: Markku Nikku

Lappeenranta 3.4.2019

Tuomas Juntunen

## **TIIVISTELMÄ**

Opiskelijan nimi: Tuomas Juntunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Markku Nikku

Kandidaatintyö 2019: Negatiiviset hiilidioksidipäästöt ilmastonmuutoksen hillinnässä

Sivuja 36, kuvia 2

Hakusanat: hiilidioksidi, negatiiviset hiilidioksidipäästöt, ilmastonmuutos

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää kirjallisuuden pohjalta menetelmiä hiilidioksidin poistamiselle ilmakehästä. Tarkastelulla pyritään selvittämään lähitulevaisuuden kannalta merkittävimmät keinot sekä niihin liittyviä kustannuksia, talteenottopotentiaalia, etuja ja haittoja. Selvityksen kohteena ovat myös hiilidioksidin pitkäaikainen varastointi ja siihen olennaisesti liittyvä hiilidioksidin kuljetus.

Tarve negatiivisille hiilidioksidipäästöille on tunnistettu kansainvälisiä ilmasto- energia- ja poliittisia järjestöjä myöten. Negatiivisia päästöjä saadaan aikaan, kun enemmän hiilidioksidia otetaan talteen menetelmällä, kuin hiilidioksidia tuotetaan menetelmän käyttämisen yhteydessä. Toteuttamisvaihtoehtoja ovat muun muassa bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto, metsittäminen, suora hiilidioksidin kaappaus ilmasta, tehostettu rapautuminen tai biohiilen käyttö maaperään.

Lähitulevaisuuden kannalta merkittävimmät tavat tuottaa negatiivisia hiilidioksidipäästöjä ovat bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto ja metsittäminen. Potentiaalia suuriin negatiivisiin päästöihin on useilla menetelmillä, ja niiden tulevaisuuden kehitykseen vaikuttavat taloudelliset, teknologiset ja poliittiset seikat. Todennäköistä on, ettei mikään menetelmä nouse yksinään ratkaisevaan asemaan, vaan suotuisa tilanne on monen eri menetelmän yhdistelmä.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Ilmastonmuutos</b>	<b>8</b>
2.1	IPCC .....	10
2.2	IEA .....	11
2.3	Pariisin ilmastopimus.....	12
2.4	Skenaariot (1 °C... 6 °C).....	12
<b>3</b>	<b>Hiilidioksidin talteenottomenetelmät</b>	<b>14</b>
3.1	CCS .....	14
3.1.1	Talteenotto ennen polttoa.....	15
3.1.2	Talteenotto savukaasuista .....	15
3.1.3	Talteenotto happipolton avulla.....	16
3.2	BECCS .....	17
3.2.1	BECCS sellu- ja paperiteollisuudessa.....	18
3.3	Hiilidioksidin kaappaus ilmasta .....	19
3.4	Tehostettu rapautuminen .....	20
3.5	Hiilidioksidin sitoutuminen merivesiin .....	21
3.6	Metsittäminen ja uudelleenmetsittäminen .....	22
3.7	Hiilidioksidin kuljetus .....	24
3.8	Hiilidioksidin varastointi .....	25
<b>4</b>	<b>Potentiaali ja nykytilanne</b>	<b>28</b>
4.1	BECCS:n potentiaali .....	28
4.2	Metsittämisen potentiaali .....	30
4.3	Potentiaali hiilidioksidin kaappaukselle ilmasta .....	30
4.4	Tehostetun rapautumisen potentiaali .....	31
4.5	Biohiilen potentiaali .....	31
<b>5</b>	<b>Kustannukset</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Vaikutukset</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>36</b>
	<b>Lähdeluettelo</b>	<b>37</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Kemialliset merkit

Ca	kalsium
CaCO <sub>3</sub>	kalsiumkarbonaatti, kalsiitti
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	dolomiitti
CaO	kalsiumoksidi
CH <sub>4</sub>	metaani
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi
Fe	rauta
H	vety
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	hiilihappo
HCO <sub>3</sub>	vetykarbonaatti
Mg	magnesium
MgCO <sub>3</sub>	magnesiitti
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	forsteriitti
N <sub>2</sub> O	dityppioksidi
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
SF <sub>6</sub>	rikkiheksafluoridi
SO <sub>x</sub>	rikin oksidit

### Lyhenteet

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CHP	Combined Heat and Power
CO <sub>2</sub> eq	Hiilidioksidiekvivalentti

DAC	Direct Air Capture
EW	Enhanced Weathering
GWP	Global Warming Potential
IAM	Integrated Assessment Model
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
SDS	Sustainable Development Scenario

**Roomalaiset**

<i>a</i>	vuosi	[-]
<i>E</i>	energia	[J; MWh]
<i>t</i>	tonni	[10 <sup>3</sup> kg]

## 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos uhkaa maapallomme ekosysteemiä. Maapallon keskilämpötila on ollut viimeiset sata vuotta nousussa, ja kumulatiiviset kasvihuonekaasupäästöt, joista tärkeimpänä hiilidioksidi, ovat kohottamassa keskilämpötilaa kiihtyvällä vauhdilla. Kansainväliset energia- sekä ilmastojärjestöt International Energy Agency (IEA) ja Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ovat arvioineet kriittiseksi lämpötilan nousuksi 2 °C esiteolliseen aikaan verrattuna, mikä sisällä pysyttäessä lämpenemisen aiheuttamat haittavaikutukset pysyvät siedettävänä. Tavoitteeseen pääsemiseksi negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottavien teknologioiden laajamittainen käyttöönotto näyttää entistä todennäköisemmältä, jos tiukkoja päästörajoituksia ei oteta käyttöön lähitulevaisuudessa.

Negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottavia teknologioita on useita jo käytössä tai vielä kehitteillä, ja tässä työssä käsitellään niistä lupaavimpia sekä lähitulevaisuudessa että vuosikymmenten päästä niin teknologian kuin kustannusten puolelta. Tapoja poistaa hiilidioksidia ilmakehästä ovat muun muassa uudelleen metsittäminen, CCS ja BECCS, (Carbon Capture and Storage, ja Bioenergy with CCS) eli hiilidioksidin talteenotto poltettaessa fossiilisia tai biopohjaisia polttoaineita. Lisäksi suora hiilidioksidin kaappaus ilmasta (DAC, Direct Air Capture) ja mineraalien tehostettu rapautuminen (EW, Enhanced Weathering) ovat varteenotettavia keinoja ilman hiilidioksidipitoisuuden vähentämiseen. CCS-teknologiasta on olemassa useampia vaihtoehtoja toteuttaa hiilen talteenotto, ja niitä ovat esimerkiksi hiilidioksidin erotus ennen tai jälkeen polton, happipolttu ja kalsiumkiertoprosessi.

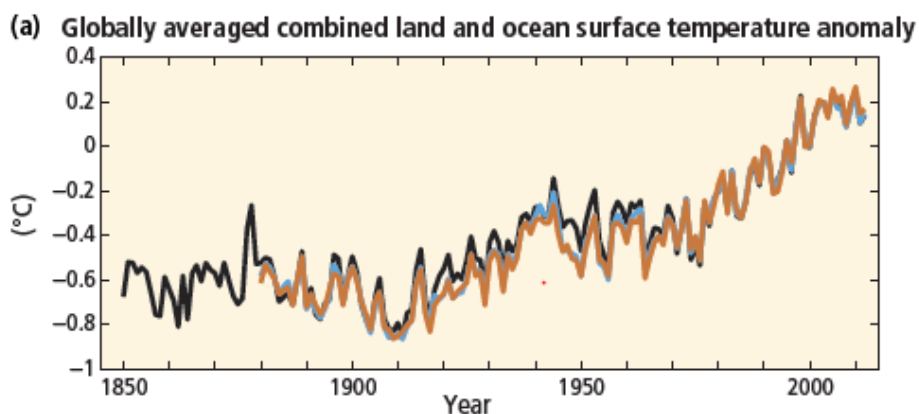
Kaikilla menetelmillä, jotka liittyvät hiilidioksidin poistoon ilmasta tai savukaasuista, on erilaisia ympäristö- ja taloudellisia edellytyksiä käyttöönottoa suunniteltaessa. CCS ja BECCS sopivat joko pienin muutoksin, tai suoraan liitettäväksi jo olemassa oleviin sopivaa polttoainetta käyttäviin voimalaitoksiin, mutta vaativat suuren investointipääoman teknologian ollessa vielä kallista. Lisäksi kyseiset teknologiat vaativat kuluttavat huomattavia määriä sähköä, joten voimalaitosten sähköntuottohyötysuhteet tulevat pienentymään. EW puolestaan tarvitsee sopivia mineraaleja, joita rapauttamalla saadaan lopputuotteena hiilidioksidin kanssa reagoivia molekyylejä, ja niiden louhinta tai keinotekoinen valmistus vaatii investointeja. DAC on

lupaava tapa sitoa hiilidioksidia, sillä menetelmällä ei ole rajoitteita sijainnin suhteen. Kuitenkin on arvioitu, että ensimmäiset tehokkaat ja kustannuksiltaan kohtuulliset laitokset ovat käyttövalmiita aikaisintaan 2050-luvulla.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää oleelliset tavat poistaa hiilidioksidia ilmakehästä ja analysoida niitä kustannusten, tehokkuuden ja käyttökelpoisuuden osalta. Työssä käydään läpi ilmastonmuutoksen nykytila kansainvälisten raporttien pohjalta, esitellään vaihtoehtoisia teknologioita ja niiden hyviä ja huonoja puolia. Työ on kirjallisuustyö, jossa käydään myös läpi eri menetelmien kustannuksia.

## 2 ILMASTONMUUTOS

Ilmastonmuutos on 2000-luvun yksi suurimmista haasteista. Ilmastonmuutoksesta puhuttaessa tarkoitetaan ennen kaikkea maapallon keskilämpötilan kohoamista, jolla on vaikutuksia niin luontoon, talouteen kuin elämään yleisesti maapallolla. Ilmasto muuttuu luonnollisesti, mutta nykyinen muutosvauhti on poikkeuksellisen nopeaa. (Rohweder, Virtanen, 11) Maapallon lämpötilat ovat nousseet viimeisten sadan vuoden aikana nopeasti vertailtaessa kehitystä maapallon historiaan, joka sisältää keskimääräistä selvästi lämpimämpiä ja kylmempiä ajanjaksoja. Kuvassa 1 on esitetty maanpinnan ja merivesien lämpötilakäyrät 1850-luvulta alkaen (IPCC Synthesis Report 2014, 3).

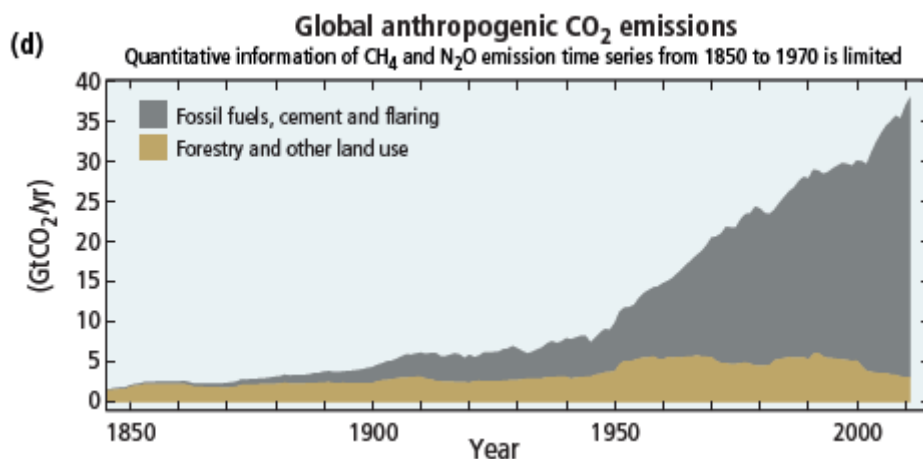


**Kuva 1.** Maanpinnan ja merivesien lämpötilakehitys 1850-luvulta alkaen. (IPCC Synthesis Report 2014, 3)

Ilmastonmuutos on hyvin todennäköisesti ihmiskunnan aiheuttama. Esiteollista aikaa korkeammat kasvihuonekaasupitoisuudet, erityisesti hiilidioksidi, ovat seurausta fossiilisten polttoaineiden käytöstä, joka on lisääntynyt kasvaneen väestömäärän ja teollistumisen myötä. Urry (2013, 13–14) toteaa maapallon keskilämpötilojen nousseen viimeisen vuosisadan aikana vähintään 0,74 °C kasvihuonekaasujen korkeampien pitoisuuksien aiheuttamana. Hiilidioksidin nykyinen pitoisuus ilmassa ylittää reilusti luonnollisen pitoisuuden, joka on määritetty viimeisten 650 000 vuoden pohjalta. Näin ollen hiilidioksidipitoisuuden kasvu on todennäköisesti peräisin luonnosta riippumattomasta tekijästä, jota ihmisen nykytoiminta on. Nykyisellä mallilla jatkaminen ei ole kestävä, koska lämpenemisellä voi olla merkittäviä seurauksia vallitseviin oloihin, esimerkiksi äärimmäisten sääolojen lisääntymisellä, merenpinnan nousulla ja luonnon



monimuotoisuuden vähentymisellä. (Urry 2013, 14-15.) Kuvassa 2 on esitetty maailmanlaajuiset ihmisen toiminnasta peräisin olevat kasvihuonekaasupäästöt 1850-luvulta alkaen.



**Kuva 2.** Ihmiskunnan tuottamat kasvihuonekaasupäästöt 1850-luvulta alkaen. (IPCC Synthesis Report 2014, 3)

Kuvista 1 ja 2 voidaan todeta, että lämpötilan kohoamisella ja ihmisen toiminnasta peräisin olevilla kasvihuonekaasupäästöillä on hyvin todennäköisesti vahva yhteys.

Kasvihuoneilmiö ei ole uusi ilmiö. Kasvihuoneilmiö on elinehto nykymuotoiselle elämälle, jota maapallolla esiintyy. Serreze (2010, 10) toteaa, että maapallolla on luonnollinen kasvihuoneilmiö, jota ilman maailmanlaajuinen keskilämpötila olisi noin 33 °C nykyistä alhaisempi, siis -18 °C. Chen et al. (2012, 3) toteavat, että laskennallinen lämpötilatasapaino olettamalla maapallo mustaksi kappaleeksi ja otettaessa huomioon auringon lähettämä säteily sekä säteilyhäviöt avaruuteen, lämpötilaksi saadaan juurikin -18 °C. Kokonaisuudessaan noin 50 % maapallolle saapuvasta auringosta peräisin olevasta lämpösäteilystä absorboituu maanpintaan, 30 % heijastuu takaisin avaruuteen, ja 20 % absorboituu ilmakehään. Kasvihuoneilmiössä ilmakehän kaasut absorboivat osan maapallon pinnan lähettämästä pitkäaaltoisesta lämpösäteilystä, ja siten estävät lämmön karkaamista avaruuteen. Ilmakehä emittoi lämpöä takaisin maanpintaa kohti, jolloin enemmän lämpöä jää maapallolle kuin ilman kasvihuonekaasuja. (Serreze 2010, 11-12)

Ilmastonmuutoksen hillintä tulee olemaan avainasemassa tulevina vuosina ja vuosikymmeninä. Ihmisen toiminnasta aiheutuvista kasvihuonekaasuista merkittävimpiä ovat hiilidioksidi CO<sub>2</sub>, metaani CH<sub>4</sub>, dityppioksidi N<sub>2</sub>O ja rikkiheksafluoridi SF<sub>6</sub>. Näiden kaasujen vaikutusta voidaan vertailla niiden GWP-indeksillä, jossa hiilidioksidille annetaan arvo 1. Indeksillä tarkoitetaan kaasujen potentiaalia estää lämpöä karkaamasta. Indeksiarvot muille kaasuille lasketaan muun muassa niiden molekyyliarakenteen ja ilmakehässä säilymisen avulla. Metaanille, dityppioksidille ja rikkiheksafluoridille GWP-indeksin arvot ovat 25, 298 ja 22 800. Metaani siis on 25 kertaa tehokkaampi kasvihuonekaasu hiilidioksidiin verrattuna. Hiilidioksidi on silti muita merkittävämpi, sillä sen konsentraatio ilmakehässä on reilusti muita suurempi ja hiilidioksidipitoisuus kasvaa nopeimmin. Täten suurin painopiste ilmastonmuutoksen hillinnässä on hiilidioksidipäästöissä, mutta myös muiden suhteen on tehty ponnisteluja. (Chen 2012, 3-4)

## 2.1 IPCC

Hallitustenvälinen ilmastopaneeli (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) on perustettu vuonna 1988 selvittämään ihmisen toiminnan ja ilmaston lämpenemisen yhteyttä toisiinsa, ja keräämään tieteellistä aineistoa tukemaan päätöksentekoa sekä auttamaan ongelman ymmärtämisessä. IPCC ei tee omaa ilmastotutkimusta, vaan keskittyy kokoamaan yhteen ilmastonmuutoksesta, sen hillitsemisestä ja siihen sopeutumisesta kertovaa tietoa, jota voidaan helpommin käyttää muun muassa poliittisen päätöksenteon tukena. Vanhin IPCC:n arviointiraportista (First Assessment Report) julkaistiin vuonna 1990 ja viimeisin, viides arviointiraportti, vuonna 2014.

Viidennen arviointiraportin ydinsisältö koostuu seuraavista aihealueista (IPCC Synthesis Report 2014, 39; 56; 75):

- Havaitut muutokset ja niiden syyt
- Tulevat ilmastomuutokset, niiden riskit ja vaikutukset
- Sopeutuminen, lievennys, kestävä kehitys ja näihin johtavat polut

Kerätyn tiedon pohjalta raportissa esitellään toteamuksia ja faktoja yllä mainittuihin teemoihin. Esimerkiksi ympäristön lämpeneminen on poikkeuksellista siinä mielessä,

että nähdyt muutokset ovat ennennäkemättömiä vuosituhansiin. Kaikkien päästöskenaarioiden mukaan lämpeneminen tulee myös jatkumaan läpi 2000-luvun. Ilman laajamittaisia lievennyskeinoja on olemassa suuri riski, että lämpeneminen tulee 2100-lukuun mennessä johtamaan vakaviin ja peruuttamattomiin maailmanlaajuisiin vaikutuksiin. On kuitenkin olemassa polkuja, joiden seuraaminen todennäköisesti rajoittaa lämpenemisen 2 °C:n tavoitteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Nämä skenaariot vaatisivat mittavia päästövähennyksiä lähivuosisikymmeninä, sekä lähes kasvihuonekaasupäästöjen nollaamista vuosisadan loppuun mennessä. (IPCC Synthesis Report 2014, 2; 10; 17; 20)

IPCC julkaisi lokakuussa 2018 *Global Warming of 1,5 °C* -erikoisraportin, jossa kerrotaan 1,5 °C:n lämpenemisen vaikutuksista tavoitteenaan vahvistaa maailmanlaajuisia vastatoimia ilmastonmuutosta vastaan. Raportissa nostettiin esille myös negatiivisten päästöjen osuus lämpenemisen rajoittamisessa. Kaikki päästöskenaariot, jotka rajoittavat lämpenemisen 1,5 °C:een tai sen alle, projisoivat hiilidioksidipäästöjen poistamista 2100-lukuun mennessä. Hiilidioksidin poistamista käytettäisiin kompensoimaan vaikeasti vähennettävissä olevia päästöjä, ja saavuttamaan negatiivisia päästöjä palauttamaan lämpeneminen 1,5 asteeseen sen jälkeen, kun kyseinen lukema on jo ylitetty (IPCC 2018, 19). Tarve negatiivisia päästöjä tuottaville menetelmille on siis jo tunnistettu, ja niitä tullaan hyvin suurella todennäköisyydellä myös tarvitsemaan laajamittaisesti.

## **2.2 IEA**

IEA (International Energy Agency) eli kansainvälinen energiajärjestö perustettiin vuonna 1974 öljykriisin jälkeen auttamaan valtioita varautumaan vastaavanlaiseen kriisiin. IEA on kuitenkin sen jälkeen laajentunut suureksi energia-alan asiantuntijajärjestöksi, jonka osaamiseen kuuluvat energianlähteet, uusiutuvan energian teknologiat, energiatehokkuus ja paljon muuta. IEA ajaa käytäntöjä, jotka edustavat luotettavuutta, taloudellista ja kestäväää energiantuotantoa, sekä keskittyy tukemaan energiavarmuutta, taloudellista kehitystä ja ympäristötietoisuutta energiantuotannon suhteen. (IEA 2018)

IEA:n kestäväen kehityksen skenaarion, SDS:n (Sustainable Development Scenario) mukaan hiilidioksidia talteenottavat teknologiat vastaavat 7 % kaikesta

päästövähennyksistä vuoteen 2040 mennessä. Tämä tarkoittaa kyseisten teknologioiden nopeaa toteutusta. IEA katsoo tällä hetkellä käyttökelpoisimmaksi menetelmäksi bioenergian tuotantoon yhdistetyn hiilidioksidin talteenoton. Mahdollisia sovelluskohteita tälle ovat esimerkiksi biomassan käyttö CHP-tuotannossa, sellu- ja paperitehtaat ja biomassan kaasutuslaitokset. (IEA: CCUS 2018)

### **2.3 Pariisin ilmastopimus**

Pariisin ilmastokokous oli järjestyksessään 21. Yhdistyneitten kansakuntien osapuolikokous, jossa sovittiin uudesta, päästöjä rajoittavasta ilmastopimuksesta. Sopimuksen pitkän ajanjakson tavoite on hillitä maapallon lämpeneminen IPCC:n määrittelemään 2 °C:een, jolloin ilmastonmuutoksen mukanaan tuomat vaikutukset ja riskit jäävät huomattavasti matalammiksi. 197 kokoukseen osallistuneesta osapuolesta sopimuksen on ratifioinut tähän mennessä 184. (UNFCCC)

Ilmastopimus sitoo sopimuksen allekirjoittaneita maita osallistumaan päästöjen rajoittamiseen valtiokohtaisesti määritettyjen työpanosten mukaisesti. Sopimus on laajuudessaan ensimmäinen laatuaan, ja asettaa uusia tavoitteita ja määräyksiä yhteisille ilmastoponnisteluille. Tavoitteiden saavuttamiseksi ovat keinoina esimerkiksi tarvittavien resurssien käyttöönotto, uudenlainen viitekehys teknologioille sekä köyhempien maitten tukeminen. (UNFCCC)

Pariisin ilmastopimukseen liittyy olennaisesti myös käsite negatiiviset päästöt. Koska nollatasapaino hiilidioksidipäästöjen suhteen ei ole aina mahdollista, niitä tulisi kompensoida poistamalla hiilidioksidia ilmakehästä. Tutkimusten mukaan 1,5 °C:n rajan alla pysyminen ei ole mahdollista 50 %:n todennäköisyydellä ilman merkittäviä negatiivisia päästöjä. Toisaalta niiden katsotaan olevan teknisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti mahdollisia laajamittaiseen käyttöön 2000-luvun jälkimmäisellä puoliskolla. (Anderson 2016, 183)

### **2.4 Skenaariot (1 °C... 6 °C)**

IAM (Integrated Assessment Model) eli kokonaisvaltainen arviointimalli on työkalu, jota voidaan hyödyntää eri skenaarioitten mallintamisessa, kun kyse on kasvihuonekaasupäästöistä ja eri skenaarioista niiden suhteen. Niiden avulla pystytään

arvioimaan tilanteita, jotka johtavat erilaisiin lopputuloksiin ilmaston lämpenemisen suhteen. Vaikuttavia parametreja malleissa ovat muun muassa eri päästöjä vähennystekniikoiden käyttöönotto ja sen laajuus, kasvihuonekaasupäästöjen kehitys kokonaisvaltaisesti sekä energian tarpeen kehitys. Yleisesti arviointimalleja käytetään pyrittäessä selvittämään pitkän ajan kehitystä, mihin tarvitaan paljon laskentatehoa sekä oletuksia.

Arviointimallit, joissa yhdistetään maankäyttö ja energiantuotanto, ovat tähän mennessä keskittyneet lähinnä bioenergiaan liitettyyn hiilidioksidin talteenottoon sekä uudelleen metsitykseen. Näiden kahden menetelmän on katsottu olevan kustannusmielessä kilpailukykyisimpiä. Vaikka monia muitakin hiilidioksidin poistoon liittyviä tekniikoita on tutkittu, ne eivät ole toistaiseksi edustettuina useimmissa integroiduissa arviointimalleissa. (Smith et al. 2015, 2.)

Suurin osa IAM:stä sallii biomassaan pohjautuvan CHP-tuotannon ja siihen yhdistetyn CCS:n, vedyn valmistuksen, ja liikennepolttoaineiden tai biomuovien valmistamisen. Yhteinen tekijä näille on olennaisesti kyky poistaa hiilidioksidia ilmakehästä. Menetelmiin, yleiseen päästökehitykseen ja IPCC:n tietokantaan pohjautuen, 116 eri arviointimallia 651:stä antavat yli 66 % todennäköisyyden sille, että ilmaston lämpeneminen jää alle 2 °C:n tavoitteen. Näistä 116:sta 87 %, eli 101 mallia, käyttävät hiilidioksidia poistavia menetelmiä laajasti 2050-luvulta alkaen. (Smith et al. 2015, 2) Voidaan siis todeta, että ilman negatiivisia päästöjä asetettuihin ilmastotavoitteisiin on vaikea päästä.

### **3 HIILIDIOKSIDIN TALTEENOTTOMENETELMÄT**

Negatiivisia päästöjä saavutetaan silloin, kun ihmisen toiminnan seurauksena saadaan erotettua ilmakehästä enemmän kasvihuonekaasuja, kuin mitä sinne päästetään. (IPCC 2014, 125) Koska hiilidioksidi on kasvihuonekaasuista tärkein, keskitytään tässä kappaleessa tarkastelemaan menetelmiä, joilla negatiivisia hiilidioksidipäästöjä saavutetaan.

Tärkeimpiä teknologioita ovat ne, jotka pystytään turvallisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti hyväksyttävällä tavalla toteuttamaan laajassa mittakaavassa. Kaikilla menetelmillä on hyvät ja huonot puolensa, mutta monilla on potentiaalia. On epätodennäköistä, että mikään menetelmä yksinään tule ratkaisemaan ongelmaa, mutta niiden yhteisvaikutus voi olla suuri ja ratkaiseva.

#### **3.1 CCS**

CCS (Carbon Capture and Storage) eli hiilidioksidin talteenotto on yksi merkittävimpiä ilmastomuutoksen hillitsemiskeinoja. Ideana on, että hiilidioksidia otetaan talteen suurista päästölähteistä, kuten teollisuuden ja voimalaitosten lähteistä. Puhdistuksen ja paineistamisen jälkeen se kuljetetaan pitkäaikaissäilöön, joita voivat olla esimerkiksi maaperän sedimenttikerrokset tai jo ehtyneet maakaasukentät. (Teir 2009, 11-12) CCS ei itsessään kuitenkaan tuota negatiivisia päästöjä, vaan se pitää yhdistää esimerkiksi bioenergian tuotantoon.

CCU-käsitteellä viitataan hiilidioksidin talteenottoon ja hyötykäyttöön (Carbon Capture and Utilization). Talteenoton jälkeen hiilidioksidia ei varastoida, vaan se käytetään hyödyksi esimerkiksi liuottimena kemiallisissa reaktioissa, jäähdytysaineena, raaka-aineena urean tai metanolin synteesissä, pH:n säädössä sekä elintarvikepakkausten ja hitsauksen suojakaasuna. Hiilen ja hapen sisältyvyys, hyvä saatavuus, alhainen kriittinen piste ja inerttiys ovat esimerkkejä ominaisuuksista, jotka tekevät hiilidioksidista houkuttelevan eri sovelluskäyttöihin. (Turunen 2011, 33; 47; 50) Vaikka CCU-menetelmillä saadaan kontrolloitua hiilidioksidipäästöjä, ei niillä päästä negatiivisiin päästöihin. Yhtä kaikki ne ovat mukana luomassa kokonaisuutta, jonka avulla hiilidioksidipäästöt saadaan kääntymään laskuun.

### 3.1.1 Talteenotto ennen polttoa

Ennen polttoa tapahtuvaa hiilidioksidin talteenottoa voidaan käyttää maakaasua polttavissa voimalaitoksissa tai polttoaineiden kaasutuksen yhteydessä. Kaasutuksessa polttoaine muutetaan lämmön avulla polttoaineseokseksi, jonka pääkomponentteja ovat vety, hiilimonoksidi ja hiilidioksidi. Hiilidioksidin pitoisuus seoksessa on kaasutuksen jälkeen 15–60 %, jolloin itse hiilidioksidin erottaminen on edullisempaa, joskin polttoaineen käsittelyvaiheet ovat monimutkaisempia, kuin erotettaessa hiilidioksidia savukaasuista. (Teir 2009, 17–18)

Ennen hiilidioksidin poistoa kaasuseoksesta on poistettava ympäristölle ja polttolaitteille haitalliset yhdisteet, joita ovat esimerkiksi rikkiyhdisteet ja ammoniakki. Lisäksi kaasutuksen tuotekaasu käsitellään vesikaasun, höyryn tai happi-höyrysekoituksen, kanssa, jolloin tuotekaasu muodostaa pääasiassa hiilidioksidista ja vedystä koostuvaa kaasua. Hiilidioksidin ja vedyn seoksesta hiilidioksidi voidaan erottaa fysikaaliseen tai kemialliseen absorptioon perustuvilla menetelmillä, jotka hyödyntävät erotusprosessissa hiilidioksidin korkeaa osapainetta. Korkean vetypitoisuuden kaasu puolestaan ohjataan kaasuturbiinille polttoon, tai hyödynnettäväksi muuhun käyttötarkoitukseen. (Teir 2009, 18)

### 3.1.2 Talteenotto savukaasuista

Voimalaitosten tai teollisuuden savukaasuista, jotka ovat peräisin esimerkiksi kivihiilen, maakaasun tai biomassan poltosta, voidaan erottaa hiilidioksidia. Savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on noin 3–15 %, ja erottamiseen voidaan käyttää esimerkiksi kemiallisia liuottimia, kuten monoetanoliamiineja. Hiilidioksidi absorboituu ensin amiineihin ja myöhemmin eri kolonnissa vapautuu niistä, jolloin puhdas hiilidioksidivirta voidaan ohjata paineistukseen ja varastoitavaksi. (Teir 2009, 16)

Myös tässä menetelmässä ennen hiilidioksidin erotusta haitalliset aineet, kuten hiukkaset ja  $\text{NO}_x$ - ja  $\text{SO}_x$ -yhdisteet, on poistettava savukaasuista, jotta liuotin kykenisi toimimaan halutulla tavalla. Vaikeuksia erotukselle aiheuttaa myös hiilidioksidin pieni osapaine, minkä vuoksi liuottimen tulee olla korkealuokkaista. Lisäksi liuottimen regenerointi höyryllä vaatii paljon lämpöä, mikä laskee voimalaitoksen hyötysuhdetta. (Teir 2009, 16–17)

Polton jälkeinen hiilidioksidin talteenotto voidaan toteuttaa myös kalsiumkiertoprosessin avulla. Menetelmä perustuu kalsiumkiertoon leijupetimallisten kalsinaattorin ja karbonaattorin välillä. Savukaasu ja kalsiumoksidi, CaO, ohjataan karbonaattoriin, jossa hiilidioksidi ja kalsiumoksidi reagoivat muodostaen kalsiumkarbonaattia, CaCO<sub>3</sub>. Hiilidioksidista puhdas savukaasu jatkaa kohti savupiippua, kun taas syntynyt kalsiumkarbonaatti syötetään kalsinaattoriin regenerointia varten. (Hanak 2017, 245–246)

Kalsinaattorissa kalsiumkarbonaatti hajotetaan lämmön avulla takaisin kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Reaktiossa vapautuva hiilidioksidivirta ohjataan paineistettavaksi ja joko hyödynnetään tai varastoidaan talteen, ja syntyvä kalsiumoksidi ohjataan takaisin karbonaattoriin. Kalsinointireaktio tarvitsee tapahtuakseen lämpöä, mikä toteutetaan epäsuoralla lämmöntuonnilla kattilasta, tai suoralla happipoltolla kalsinaattorissa. Mikäli happipoltoa käytetään, tulee prosessiin olla integroituna myös hapen valmistus. (Hanak 2017, 246–247)

### 3.1.3 Talteenotto happipolton avulla

Happipoltto tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että polttoaine poltetaan lähestulkoon puhtaan hapen sekä kierrätetyn savukaasun seoksessa, minkä seurauksena poltossa syntyneiden savukaasujen hiilidioksidipitoisuus on korkea. Poltossa ei siis ole läsnä typpeä, mikä tekee hiilidioksidin erottamisesta yksinkertaisempaa ja energiataloudellisempaa. Kuivan savukaasun hiilidioksidipitoisuus on yleisesti 80–95 %. (Teir 2009, 18)

Happipolttolaitokseen kuuluu itse voimalaitoksen lisäksi hapenvalmistuslaitos ja hiilidioksidin käsittely-yksikkö. Hapenvalmistus ja hiilidioksidin käsittely kuluttavat paljon sähköä, mikä lisää laitoksen omakäyttötehoa sekä laskee hyötysuhdetta 7–12 % verrattuna samaa tehoa tuottavaan perinteiseen voimalaitokseen. Hyötysuhdetta voitaisiin parantaa löytämällä vähemmän energiaa kuluttavia menetelmiä tai mahdollisuuksia prosessi-integrointiin laitoksen yksiköiden välillä. (Teir 2009, 19)



## 3.2 BECCS

Bioenergia on energiaa, jota saadaan polttamalla tai prosessoimalla biomassaa. Se on peräisin luonnosta, toisin sanoen elävistä organismeista, joita voivat olla esimerkiksi puut, viljelykasvit tai levät. Kasvaakseen ja yhteyttääkseen kasvit tarvitsevat hiilidioksidia, jota ne absorboivat ilmakehästä. Koska kasvamiseen tarvittu hiilidioksidi on peräisin ilmakehästä, polttamisreaktioissa vapautuva hiilidioksidi ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Kasvuun tarvittava ja palamisessa vapautuva hiilidioksidi kompensoivat toisensa, joten nettohiilidioksidipäästöt voidaan ajatella nollaksi. (Guivarch 2012, 80)

BECCS (Bioenergy with CCS) on eräänlainen sovellus CCS:stä. Siinä missä CCS-termillä viitataan hiilidioksidin talteenottoon yleisesti, BECCS liittyy ainoastaan hiilidioksidin erottamiseen ja talteenottoon prosesseista, joissa käytetään biomassaa. Yhdistämällä biomassan poltto hiilidioksidin talteenottoon voidaan päästä negatiivisiin päästöihin. Jos prosessin aikana suoritetaan hiilidioksidin talteenottoa, saadaan poistettua hiilidioksidia ilmakehästä biomassan polton ollessa hiilidioksidineutraalia. Kyseisen mahdollisuuden toivat ensin esille Obersteiner et al. vuonna 2001, joten se on ollut mietinnässä jo hyvän tovin.

BECCS on mielenkiintoinen kahdesta näkökulmasta. Ensinnäkin, sen avulla voitaisiin kompensoida päästöjä hiilidioksidilähteistä, jotka ovat hyvin kalliita ja teknisesti vaikeita muuttaa vähemmän päästäviksi, kuten lentoliikenne. Toisekseen, BECCS:n avulla on mahdollista lieventää päästöjä, jotka ovat tapahtuneet menneisyydessä. Kunhan BECCS toteutettaisiin laajamittaisesti ja varastoja hiilidioksidille löytyisi, BECCS voisi tuottaa negatiivisia päästöjä yhtäjaksoisesti. (Guivarch 2012, 81) Hyvä puoli on myös siinä, että menetelmällä voidaan tuottaa samanaikaisesti myös sähköä tai lämpöä. Kaksi tavoitetta täyttyy, sillä hiilidioksidia poistuu ilmakehästä, ja tuotetaan ympäristöystävällistä sähköä tai lämpöä. Muistamisen arvoista on kuitenkin se tosiasia, että biomassan tuotannossa syntyvät hiilidioksidipäästöt eivät saa ylittää talteen otettavia päästöjä, muutoin negatiivisiin tuloksiin ei päästä.

BECCS soveltuu periaatteessa kaikille CCS:n vaihtoehdoille. Se voidaan myös asentaa jälkikäteen jo olemassa oleviin järjestelmiin. Bioperäisissä prosesseissa voi kuitenkin olla

erityispiirteitä, jotka tulee ottaa huomioon talteenottojärjestelmää suunniteltaessa, kuten suurempi epäpuhtauksien määrä tai erilaiset prosessiparametrit. (Teir 2011, 39)

### 3.2.1 BECCS sellu- ja paperiteollisuudessa

IEA lukee BECCS:n mahdollisiin sovelluksiin sellu- ja paperitehtaat sekä tarkemmin meesauunit ja soodakattilat (IEA CCUS, 2018). Tarkemmin hiilidioksidin talteenottoa ja hyödyntämistä tutkivat Kuparinen, Vakkilainen ja Tynjälä (Kuparinen 2018).

Sellu- ja paperiteollisuus on yksi suurimmista energiankuluttajista, jonka hiilidioksidipäästöistä yli 80 % on peräisin jäännösbiomassan poltosta. Sellun keitossa keittoliuokseen liennut orgaaninen aines poltetaan soodakattilassa, joka on samalla osa keittokemikaalien talteenottoprosessia. Meesauunissa puolestaan poltetaan kaasua, jotta saadaan tuotettua tarvittava lämpö kalkin regeneroitumisreaktioihin. (Kuparinen 2018, 3)

Modernit sellutehtaat ovat hyvin monen asian suhteen omavaraisia. Fossiilisia polttoaineita, lähinnä maakaasua tai öljyä, käytetään meesauunissa tuottamaan lämpöenergiaa, tai häiriötilanteissa, joihin myös ylös- ja alasajot luetaan. Tällöin myös soodakattilassa poltetaan maakaasua tai öljyä tukemaan höyryntuotantoa, koska mustalipeää ei ole saatavilla tarpeeksi. Normaali ajossa tehdas, joka käyttää meesauunissa tehtaan sivuvirroista tuotettua biopolttoainetta, yleisimmin biokaasua, toimii lähes täysin ilman fossiilisia polttoaineita. Näin ollen normaalitilanteessa talteenotettu hiilidioksidi on hyvin pitkälti negatiivisia päästöjä. (Kuparinen 2018, 3-4)

Sellutehtaan pääasialliset hiilidioksidipäästöt syntyvät soodakattilassa, biomassakattilassa ja meesauunissa. Näistä hiilidioksidin talteenotto meesauunin savukaasuista ja sen käyttö kalsiumkarbonaattina paperin täyteaineena on tunnettu ja laajasti käytössä oleva teknologia. Polton jälkeisen hiilidioksidin talteenottomenetelmän asentaminen sooda- ja biomassakattilaan jälkikäteen on teknisesti ottaen mahdollista. (Kuparinen 2018, 4)

Hiilidioksidin poistamiseen tarvitaan paljon energiaa, ja sen kustannuksiin vaikuttaa käytettävä erotustapa ja mahdollinen integraatio tehtaan prosesseihin. Talteenotto ennen polttoa tai polton jälkeen sekä happipolttotekniikka soveltuvat sellutehtaisiin. Sellutehtaat eivät ole kuitenkaan olleet kovin paljota tutkimuksen kohteena hiilidioksidin talteenottoon

liittyen. (Kuparinen 2018, 7) Leeson (2017, 77) toteaa, että yksikään menetelmistä ei erityisesti erotu edukseen kustannusten osalta.

### 3.3 Hiilidioksidin kaappaus ilmasta

DAC (Direct Air Capture) eli hiilidioksidin kaappaus ilmasta on yksi mahdollisuus hiilidioksidin poistamiselle. DAC-teknologiassa hiilidioksidia poistetaan suoraan ympäröivästä ilmasta kemikaalien avulla. Muista CCS-teknologioista poiketen kaappaus ilmasta ei vaadi tiettyä kaasuvirtaa, josta hiilidioksidin kaappaus tapahtuu. Etuna on, että sen ei tarvitse olla yhteydessä voimalaitoksiin tai teollisuuteen, vaan erotus voi tapahtua paikasta ja päästötavasta riippumatta. (Chen 2012, 60) Ilmavirran pieni CO<sub>2</sub>-konsentraatio, 400–430 ppm, puolestaan aiheuttaa sen, että suuria ilmavirtoja tarvitaan. Käyttökelpoisiin tekniikoihin kuuluvat absorptio tai adsorptio liuottimeen. (Marcucci 2017, 183)

DAC käyttää erotukseen väliainetta, jolla on taipumusta reagoida hiilidioksidin kanssa. Yleisimmin väliaineena käytetään kiinteitä sorbentteja, jotka sisältävät amiineja. Sorbentit muodostavat hiilidioksidin kanssa reagoidessaan karbamaatti-ioneja tai karbaamista happoa. Sorbentti voidaan regeneroida ja samalla kemiallisesti absorboitunut hiilidioksidi kerätä käyttämällä joko lämpöä, tyhjiötä tai molempia. Tutkimus DAC:n kehittämiseksi keskittyy suurimmaksi osaksi sorbentin ominaisuuksien kehittämiseen, jotta hiilidioksidin sitoutumista voitaisiin kasvattaa. (Vidal Vázquez 2018, 236) Sorbentin regenerointi vaatii energiaa, jonka määrä kasvaa talteenotetun hiilidioksidimäärän kasvaessa. Tästä syystä energiankulutus on merkittävä haaste DAC-teknologiassa. (Marcucci 2017, 183)

Suoraan ilmasta kaapattua voidaan myös käyttää hyödyksi. DAC-teknologialla on potentiaalia tuottaa raaka-ainetta eli hiilidioksidia synteettisille prosesseille. Koska menetelmä ei ole paikasta riippuvainen, sen avulla voidaan tuottaa paikan päällä hiilidioksidia muissa sovelluksissa käytettäväksi. Yksi tutkituimmista vaihtoehdoista on kaapatun hiilidioksidin käyttö raaka-aineena synteettisten polttoaineiden tuotannossa. Muut vaihtoehdot sisältävät kemiallisen tuotteiden valmistuksen lääketieteellisyydelle ja kasvihuoneille tai levän kasvatukselle biomassan tuotantoa varten. Vaikka DAC:n käyttöä tutkitaan negatiivisena päästöjä tuottavana menetelmänä, voidaan sitä hyödyntää

myös muihin tarkoituksiin, jotka ovat ilmaston kannalta myönteisiä. (Sanz-Pérez 2016, 11842–11843)

### 3.4 Tehostettu rapautuminen

EW (Enhanced Weathering) eli tehostettu rapautuminen on esitetty keino, jolla kiihdytettäisiin luonnostaan tapahtuvaa mineraalista rapautumista. Rapautuminen on yhteyttämisen kautta syntyvän biomassan ohella toinen luonnollinen ilmiö, joka säätelee ilmakehän CO<sub>2</sub>-pitoisuutta. Karbonaateiksi rapautuneet silikaattimineraalit ovat geologisella mittapuulla säädelleet ilmakehän hiilidioksidia sitomalla hiiltä mineraalimuotoon. Maankuoren laattojen kohdatessa toinen laatoista taipuu alle ohjaten samalla hiiltä sisältäviä mineraaleja syvemmälle maapallon vaippaan. Tähän prosessiin kuitenkin kuluu valtavasti aikaa, joten nopeiden tulosten saamiseksi mineraalien rapautumista tulee tehostaa. (ten Berge 2012, 1)

Kivien kemiallinen rapautuminen on keskeinen osa maapallon hiilikiertoa. Kivimateriaali liukenee veden ja hiilidioksidin läsnä ollessa, ja liukenemistuotteet kulkeutuvat jokien kautta merivesiin, joissa ne säilyvät tuhansia vuosia. Luontaista rapautumisprosessia voidaan tehostaa jauhamalla tiettyjä kiviä hienojakeiseksi, ja levittämällä kivijauhetta lämpimillä ja kosteilla alueilla sijaitseviin metsiin ja viljelymaille. Näin kivimateriaalin pinta-alaa reaktiota varten saadaan kasvatettua. Rapautumiseen on mietitty käytettäväksi duniittikiveä, joka koostuu lähes yksinomaan oliviinimineraalista, forsteriitista Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, tai basalttikiveä. Näiden kivien sisältämät mineraalit ovat tehokkaimpia reagoimaan hiilidioksidin kanssa. Tehostettuun rapautumiseen liittyvät tekniset riskit ovat pieniä verrattuna muihin negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottaviin menetelmiin. Menetelmän merkitys ilmastonmuutoksen hillinnässä tulee riippumaan sen potentiaalista hiilidioksidin sitojana sekä taloudellisista kustannuksista. (Strefler 2018, 3)

Rapautumisen suuri etu on, että muodostuvien karbonaattimineraalien on havaittu olevan stabiileja pitkiä aikoja. Tehostettu rapautuminen voidaan toteuttaa keinotekoisesti ruiskuttamalla hiilidioksidia tai hiilidioksidipitoista vettä runsaasti metalli-ioneja eli kationeja (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>) sisältävään liuokseen. Syntyviä mineraaleja ovat esimerkiksi kalsiitti CaCO<sub>3</sub>, dolomiitti CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ja magnesiitti MgCO<sub>3</sub>. Rapautuminen voidaan toteuttaa maanpäällisenä teollisena prosessina, tai antaa sen tapahtua luonnostaan

maanalaisessa hiilidioksidivarastossa, esimerkiksi suolavesikerrostumassa, kun hiilidioksidi on pumpattu sinne. (Vishan 2016, 15)

Käsitteellä maanpäällinen tehostettu rapautuminen viitataan kivijauheen levittämiseen soveltuvalla alueella maanpinnalla, jotta luontaista rapautumisprosessia saadaan kiihdytettyä. Silikaattimineraalien rapautuminen sitoo luonnostaan 1 gigatonnin verran hiilidioksidia mineraalimuotoon, ja tehostamalla tämä lukema voidaan moninkertaistaa. Teoriassa 4 millimetrin paksuisen oliviinikerroksen levittäminen siihen soveltuvalla maanpäälliselle alueelle voisi sitoa kaiken hiilidioksidin ilmakehästä. Ymmärrettävästi tämä on täysin mahdotonta, mutta se antaa kuvan maanpäälliseen tehostettuun rapautumiseen liittyvästä potentiaalista. Menetelmät laajamittaista toteutusta varten ovat jo periaatteessa olemassa, joskin pienemmässä skaalassa, kuten lannoitus tai pH:n säätely maa-alueilla osoittavat. Laajemmassa mittakaavassa tulee kuitenkin huomioida myös sivuvaikutukset ympäristölle, kuten pH:n kehitys ja metallipäästöt. Lisäksi soveltuvien maa-alueiden määrä osoittautunee rajaavaksi tekijäksi. (Moosdorf 2014, 4809)

### **3.5 Hiilidioksidin sitoutuminen merivesiin**

Meret peittävät 70 % maapallon pinnasta. Ne ovat jo pitkään auttaneet hillitsemään maapallon lämpötilan sekä ilman hiilidioksidipitoisuuden nousua. Merillä on kyky toimia hiilinieluna, sillä ne voivat absorboida itseensä suuria määriä hiilidioksidia. Tämä tapahtuu kahdella eri tavalla: liukenemalla ja biologisella erotuksella. Hiilidioksidi on luonnostaan veteen liukeneva aine. Suurempi hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä kasvattaa veteen liukenevan hiilidioksidin määrää. Biologisella erotuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa meressä elävät bio-organismit, kuten levät, käyttävät hiilidioksidia yhteyttämisessä muodostaen biomassaa. (Moreira 2016, 373) Hiilidioksidia sitovia karbonaattimineraaleja voidaan myös varastoida meriin, mikä on yksi keino lisää kasvattaa merien hiilidioksidivarastoja.

Noin kolmasosa ihmisen tuottamista hiilidioksidipäästöistä on imeytynyt merivesiin (Ma 2015, 284). Merien kyky sitoa hiilidioksidia on yhteydessä lämpötilaan ja veden pH-arvoon. Ilmaston lämpenemisestä on seurauksena merivesien lämpeneminen, mikä heikentää hiilidioksidin liukenevuutta veteen vapauttaen täten hiilidioksidia ilmakehään (Ma 2015, 285). Osa veteen liuenneesta hiilidioksidista reagoi hiilihapoksi, mikä esiintyy

vedessä  $H^+$ - ja  $HCO_3^-$ -ioneina. Tämä reaktio laskee merivesien pH-arvoa. On arvioitu, että merien happamuus olisi kasvanut 30 % verrattuna esiteolliseen aikaan, joskin tämä lukema ei ole täysin varma (Ma 2015, 285).

Meriveden lämpötilan noustessa ja pH:n laskiessa myös veden kerrostumisen todennäköisyys nousee, mikä voi heikentää merien kykyä toimia hiilidioksidivarastoina ja pahimmillaan häiritä luonnollisia merivesien virtauksia huomattavasti. Jotta meret säilyisivät yhtä tehokkaina hiilidioksidivarastoina kuin ne ovat nyt, kasvihuonekaasupitoisuudet ja sitä kautta maapallon keskilämpötila eivät saisi nousta liikaa. (GreenHouse Gas Online)

### **3.6 Metsittäminen ja uudelleenmetsittäminen**

Maaperään on luonnostaan varastoitunut paljon hiiltä. Maaperä on maailman toiseksi suurin hiilivarasto merien jälkeen. Orgaanisen hiilen määrä maaperässä on yli nelinkertainen verrattuna maanpäälliseen kasvillisuuteen ja puustoon. Maaperään ylimpään kolmeen metriin kerrokseen sitoutuneen hiilen määräksi on arvioitu 2 344 Gt, josta ylimmässä metrissä on 1 500 Gt ja ylimmässä 20 senttimetrissä 615 Gt. (Stockmann 2013, 82) Maaperään siis varastoituu paljon hiiltä, mutta määrän kasvattaminen voi osoittautua hankalaksi maaperän tullessa niin sanotusti kylläiseksi. Kylläisyystasoon vaikuttavat maaperän tyyppi, veden poistuminen, lämpötila ja sademäärä. (ten Berge 2012, 1)

Metsitykseen keskittyvä hiilidioksidin poisto voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: uudelleen metsittäminen, metsittyminen sekä metsänhoito. Uudelleen metsittämisellä tarkoitetaan puiden istuttamista puuttomalle alueelle, jossa aikaisemmin on ollut metsää. Metsittämisellä tarkoitetaan puiden istuttamista historiallisesti puuttomalle alueelle, kuten ruohotasangoille tai pensasaroille. Metsänhoito kattaa tuottavan ja kestäväen metsänkasvatuksen ja hakkuut. Metsitykseen käytetään usein yksittäisiä nopeasti kasvavia lajeja, kuten eukalyptusta tai mäntyä. (Smith 2013, 90)

Metsittäminen voi tapahtua luonnostaan tai ihmisen toimien seurauksena. Viljely- tai laiduntamiskäytössä olleiden maa-alueiden hylkääminen aloittaa samalla hitaan kasvun, jossa ruoho- ja puuvartiset kasvit lisääntyvät kyseisellä alueella. Mikäli suuria häiriöitä,

kuten metsäpaloja, ei tapahdu alueella, kasvaa alueelle useimmissa tapauksissa nuori metsäyhteisö muutaman vuosikymmenen kuluessa. Sama seuraus on mänty- ja eukalyptuslajeja istutettaessa, jolloin metsän kasvaminen on hallitumpaa. Tällöin myös metsänhoitoon kiinnitetään enemmän huomiota. Aikaisempi maankäyttö, ilmasto, maaperän tyyppi ja sen valmistelu ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat siihen, kuinka paljon enemmän hiiltä voi sitoutua maaperään aikaisempaan verrattuna. (Miglietta 2015, 174–175)

Biohiilen valmistamisella ja levittämällä voidaan myös lisätä maaperän hiilivarastoa. Biohiiltä saadaan pyrolyysistä, jossa orgaaninen materiaali hajotetaan lämmön avulla hapettomassa tilassa. Pyrolyysireaktiosta muodostuu reaktiotuotteina juoksevaa pyrolyysiöljyä sekä kiinteä jäännös, jota kutsutaan biohiileksi. Biohiiltä voidaan lisätä sellaisenaan maaperään, jolloin maaperän hiilivarasto kasvaa. Samalla myös maaperä muuttuu hedelmällisemmäksi, ja myös muut maaperän ominaisuudet, kuten veden sitomiskyky, usein parantuvat. Laajamittaisen biohiilen levittämisen haittavaikutukset eivät ole vielä laajalti tiedossa, sillä suuren mittakaavan kokeilua ei ole vielä toteutettu. (Fuss 2018, 25)

Maa-alueitten lisäksi myös merien osuutta biomassan tuottajana voidaan lisätä. Mikroleviin katsotaan kuuluviksi pienet organismit, jotka pystyvät elämään sekä makeassa että suolaisessa vedessä. Monet näistä ovat paljon tehokkaampia hyödyntämään auringon energiaa yhteyttämisessä kuin maanpäälliset kasvit, jopa kymmenkertaisesti. Mikro-organismit siis kasvavat nopeasti ja saavuttavat korkeita biomassan tuottoasteita. Mikrolevät ovatkin mielenkiintoinen vaihtoehto hiilen sitomiseen, sillä 1,83 kg hiilidioksidia tarvitaan 1 kg mikrolevän kasvattamiseen. (Moreira 2016, 375)

Merissä elävät organismit lieventävät hiilidioksidipitoisuuden nousua tuottamalla biomassaa. Biomassa, jota yleisesti kutsutaan merileväksi, on hyödyllistä myös siitä syystä, että sitä voidaan käyttää bioenergian tuotannossa. Vaikka meribiomassa on vain 0,05 % kaikesta maapallon biomassasta, voi sillä olla tärkeä rooli ilmastonmuutoksen torjunnassa, koska merilevät ovat erittäin tehokkaita käyttämään veteen liuenntua hiilidioksidia yhteyttämiseseen. Löytämällä tehokkaimmat levälajit voidaan valita viljeltävät lajit ja maksimoida biomassan tuotanto. (Moreira 2016, 374)

Vaikka kasvillisuuden lisääminen kasvattaa maaperän hiilivarastoa, voi sillä tietyissä tapauksissa olla myös käänteisiä vaikutuksia. Maanpinta heijastaa aina osan auringon säteilystä takaisin ilmakehään ja edelleen avaruuteen. Metsittäminen voi muuttaa aikaisemmin hyvin säteilyä heijastavan pinnan paljon heikommin säteileväksi. Esimerkkejä tällaisista alueista ovat lunta saavat alueet pohjoisilla ja eteläisillä leveysasteilla, joissa myös luonnollinen kasvupotentiaali puille on myös alhainen. (Kirschbaum 2011, 3688)

Heijastavuuden vaikutus on merkittävämpi lumisilla alueilla, kuin alueilla, joissa heijastavuus aiheutuu muutoksista alueen kasvillisuudessa. Jäätiköiden sulaminen ja lumisten alueiden väheneminen Grönlannissa ja Antarktiksella todistetusti kiihdyttää pintalämpötilojen nousua, sillä aikaisempaa suurempi osuus auringon säteilystä absorboituu huonommin säteilyä heijastavaan pintaan (Lukeš 2016, 297). Tummat havupuumetsät heijastavat takaisin yleisesti 8–15 % säteilystä, joka on 5–10 % vähemmän kuin laidunmailla, mikä osaltaan johtaa paikalliseen lämpenemiseen (Kirschbaum 2011, 3688). Epäselvää on edelleen, kummalla on suurempi rooli maapallon ilmaston lämpenemisen kannalta, hiilen sitoutumisella kasvillisuuteen vai heijastavuuden vähenemisellä, koska tilanteen mallintaminen ja kaikkien tekijöiden huomioon ottaminen on vaikeaa (Lukeš 2016, 297).

### **3.7 Hiilidioksidin kuljetus**

Jotta negatiiviset päästöt toteutuisivat, pitää hiilidioksidi pystyä sijoittamaan siten, että se on pysyvästi poissa ilmakehästä. Tätä varten tarvitaan kuljetukseen ja varastointiin soveltuvaa infrastruktuuria. Varastointi on toistaiseksi vielä harvinaista, mutta menetelmiä sekä kuljetukseen ja varastointiin on olemassa.

Ellei sopivaa hiilidioksidivarastoa ole talteenoton läheisyydessä, talteen otettu hiilidioksidi pitää kuljettaa varastointiin soveltuvaan paikkaan. Kuljetus voidaan toteuttaa pitkin kaasuputkia, jotka vastaavat rakenteeltaan maakaasuputkistoa. Hiilidioksidia on mahdollista kuljettaa myös nestemäisessä muodossa laivoilla, jos hiilidioksidivarasto sijaitsee pitkän matkan päässä. Joka tapauksessa kuljetettavan hiilidioksidin on täytettävä tietyt laatuvaatimukset, toisin sanoen se tulee olla puhdistettu epäpuhtauksista ja vedestä. (Teir 2009, 23)



Kuljetusvaihtoehdot hiilidioksidille ovat yleisesti ottaen joko kuorma-auto-, laiva- tai putkistokuljetus. Vaihtoehdoilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Kuorma-autokuljetuksissa on suurempi vuotoriski kuin muissa, kuljetuskustannukset ovat suuremmat eikä se sovellu suuriin talteenottoprojekteihin, sillä yhden kuorma-auton kapasiteetti on verrattain pieni. Näin ollen kuorma-autoja käytetään ensisijaisesti lyhyillä kuljetusmatkoilla maanteillä ja pienemmissä projekteissa. (Zhang 2017, 1056)

Putkistokuljetusta pidetään luotettavimpana kuljetusvaihtoehtona. Teollisuudella on pitkä kokemus hiilidioksidin kuljettamisesta putkistoja pitkin, ja lisäksi infrastruktuuria on jo nykyisin kohtalaisesti. Suurin osa kuljetusta hiilidioksidista on kuljetettu käyttöön tehostetussa öljynporauksessa. Putkikuljetuksilla vuotojen riski on pieni, kapasiteetti suuri ja putkia voidaan rakentaa niin maalle kuin merelle. Pääasialliset ongelmat, jotka liittyvät putkikuljetuksiin, ovat putkiston yhtenäisyys, virtauksen varmistaminen sekä turvallisuuteen ja operointiin liittyvät seikat. (Zhang 2017, 1056)

Laivakuljetus on erityisen varteenotettava kuljetusvaihtoehto, jos varastointipaikka sijaitsee merellä. Laivojen kapasiteetti on suuri, eikä vuotojen todennäköisyys ole kovin suuri. Hiilidioksidin laivakuljetus vaatii hiilidioksidin nesteyttämisen, eli paineistamisen ja jäädyttämisen matalaan lämpötilaan. Kuljetusaluksen tulee myös pystyä uudelleen nesteyttämään hiilidioksidia, joka kaasuuntuu matkan aikana. Tämä lisää kustannuksia, mutta varastointilämpötilan ollessa alhainen enemmän nestettä pystytään kuljettamaan ja kustannus jää suhteessa riittävän pieneksi. Korkeampi lämpötila pienentää energiakustannuksia, mutta säiliön valmistus on tällöin kalliimpaa ja kuljetusmäärä jää pienemmäksi. (Zhang 2017, 1057)

### **3.8 Hiilidioksidin varastointi**

Varastointi on hiilidioksidin talteenoton tärkein vaihe, sillä jos hiilidioksidi pääsee karkaamaan takaisin ilmakehään, menee kaikki talteenottoon tehty työ hukkaan. Varastointi kattaa ensi kädessä maanalaiset geologiset rakenteet. Maanalaiseen varastointiin sisältyvät sekä sijoitus maan alle pelkässä varastointitarkoituksessa, että hiilidioksidin hyödyntäminen tuotannon tehostamisessa. Öljy- ja kaasukentillä hiilidioksidin ruiskutusta ehtymässä olevaan kenttään on jo käytetty menestyksekkäästi. Muita kohteita, joissa talteenottoa voidaan tehostaa hiilidioksidiruiskutuksella, ovat

esimerkiksi liuskekaasu, pohjavesi ja metaanin tuotanto maanalaisesta hiilikentästä. (Zhang 2017, 1056)

Geologisten varastojen tulee täyttää tiettyjä vaatimuksia, jotta niihin voidaan varastoida hiilidioksidia. Niiden täytyy olla tarpeeksi huokoisia ja suuria, jotta suurien määrien varastointi on mahdollista. Varaston yllä tulee olla ainesta, joka varmasti pystyy pitämään kaasut maan uumenissa. Geologisesti vakaa alue on myös tärkeä, jotta hiilidioksidi ei pääse esimerkiksi maanjäristysten seurauksena pakenemaan varastosta. Lisäksi varastojen tulee sijaita yli 914 metrin syvyydessä, koska silloin saavutetaan lämmön ja paineen suhteen optimaaliset olosuhteet varastoinnille; hiilidioksidin korkea tiheys, alhainen viskositeetti ja hyvä juoksevuus, jolloin hiilidioksidi tunkeutuu huokosiin ja samalla varaston kapasiteetti saadaan maksimoitua. (Zhang 2017, 1057)

Erityisen suuri kapasiteetti hiilidioksidin säilömiseen on suolavesikerrostumilla, jotka ovat maanalaisia suolaisen veden täyttämiä kivikerroksia (Teir 2009, 29). Suolavesikerrostumiin olisi mahdollista varastoida hiilidioksidia geologisesti merkittäviksi ajoiksi. Varastointiin vaadittavia menetelmiä tulee toisaalta vielä kehittää ennen suuria ja kaupallisia projekteja, jotka toimiessaan olisivat sekä turvallisia, tehokkaita että taloudellisia. Toisaalta useita hiilidioksidia suolavesikerrostumiin pumppeavia laitoksia on jo toiminnassa, kuten Sleipner-projekti Pohjanmerellä, joka on vuodesta 1996 alkaen ruiskuttanut yli 8 miljoonaa tonnia hiilidioksidia Utsira-nimiseen muodostumaan. (Vishan 2016, 47–48) Tähän mennessä noin 220 miljoonaa tonnia hiilidioksidia on varastoitu maan alle, mukaan lukien kaikki varastointikohteet (Mohammad Pour 2018, 20)

Suolavesikerrostumia löytyy runsaasti ympäri maailmaa, ja sellaisia on usein löydettävissä myös suurten hiilidioksidipäästökohteiden läheltä. Niiden täytyy olla tarpeeksi kestäviä, jotta pumpaamisesta aiheutuva paine ei hajota muodostelmaa, vaan hiilidioksidi pääsee jakautumaan tasaisesti koko varaston alueelle. Idea kerrostumiin varastoitaessa on, että talteenotettu ja paineistettu hiilidioksidi pumpataan syviin muodostumiin, joiden ympärillä on hyvin hiilidioksidia eristävää ainesta, kuten savikiviliusketta, pitäen hiilidioksidin muodostuman sisällä. Suurin osa hiilidioksidista jää vapaaseen tilaan, osa liukenee veteen ja osa reagoi mineraaleiksi. Ajan kuluessa

hiilidioksidin odotetaan muodostavan stabiileja yhdisteitä, jotka turvaavat onnistuneen varastoinnin pitkiksi ajoiksi. (Vishan 2016, 48)

## 4 POTENTIAALI JA NYKYTILANNE

Kumulatiiviset ihmisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt olivat vuodesta 1750 vuoden 2010 loppuun mennessä noin  $2040 \pm 310$  Gt CO<sub>2</sub>. Lisäksi maailmanlaajuinen kasvihuonekaasupäästö vuonna 2010 oli  $49 \pm 4,5$  Gt CO<sub>2</sub>eq, josta hiilidioksidin osuus on 76 % (IPCC Synthesis Report 2014, 45–46). 2° C:n tavoitteeseen suurella todennäköisyydellä pääseminen tarkoittaa päästöjen rajoittamista vuosina 2000–2100 alle 1 600 Gt CO<sub>2</sub>, mikä on noin 32-kertainen vuoden 2010 päästö määrä. Kuitenkin erään arviointimallin keskimääräinen skenaario perustilanteelle, jossa jatketaan nykyisellä kehitystahdilla, johtaa 5 200 Gt CO<sub>2</sub> päästöihin vuoteen 2100 mennessä, mikä on yli kolminkertainen arvioituun budjettiin nähden. (Vuuren 2013, 17)

Tutkimukset, joissa on käytetty integroituja arviointimalleja mallintamaan ilmaston ja kasvihuonekaasujen kehitystä, ovat käyttäneet avainteknologiana biomassaan yhdistettyä hiilidioksidin talteenottoa. Uusimmissa malleissa myös metsittäminen ja uudelleen metsittäminen on otettu analyysiin mukaan. Mallien avulla on todettu, että oletettaessa negatiiviset päästöt mahdollisiksi, on valtavia päästövähennyksiä tapahduttava nopealla aikataululla. Esimerkiksi vuoteen 2050 mennessä päästöjä pitäisi leikata 60–80 % vuoden 2000 tasosta. (Fuss 2018, 2; Vuuren 2013, 18) Tässä mielessä hiilidioksidia ilmasta poistavat menetelmät antavat joustovaraa aikataululle ja jopa päästöbudjetin ylittämiseksi, jos ne voidaan kumota vuosisadan loppupuolella.

### 4.1 BECCS:n potentiaali

Bioenergiaan yhdistetyn hiilidioksidin talteenoton potentiaaliin vaikuttaa yleisesti ottaen useita tekijöitä. Tärkeimmiksi voidaan kuitenkin nostaa kaksi osatekijää: onko mahdollista tuottaa riittävästi bioenergiaa, ja mikä on menetelmän lopullinen kyvykyys poistaa hiilidioksidia. Vaikka teknologian käyttöönottoon liittyy joitakin teknisiä rajoitteita, ei niitä katsota merkittäviksi esteiksi. (Vuuren 2013, 19) BECCS-projekteja on tähän mennessä ollut 20, joista pääosa on sijainnut Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. Näistä viisi on tällä hetkellä käytössä, ja ne ottavat 0,1–1,0 Mt CO<sub>2</sub> vuosittain talteen etanolin tuotantolaitoksien yhteydessä. Suunnitteilla olevat laitokset yhdistävät hiilidioksidin talteenottoa erilaisten bioenergian tuotantomuotojen kanssa, joita ovat

esimerkiksi biomassan kaasutus, orgaanisen jätteen energiakäyttö ja biomassan poltto joko yksinään tai rinnakkain toisen polttoaineen kanssa. (Mohammad Pour 2018, 21–22)

Maa-alueitten ollessa rajallisia niiden käyttötarkoituksesta kiistellään. Ruoantuotanto, metsänkasvatus ja bioenergian tuotanto ovat toistensa kanssa kilpailevia käyttökohteita. Suurimman keskustelun aiheuttaa maan käyttäminen muuhun kuin ruoantuotantoon. Väestömäärän kasvaessa vuoteen 2050 mennessä nykyisestä 7,3 miljardista 9 miljardiin seuraa lisääntynyt vaatimus ruoantuotannon suhteen. Havaintoja on tehty myös ruoan hintatason noususta, kun bioenergian käyttöä on lisätty. Jos oletetaan, ettei ruoantuotanto kärsi bioenergian tuotannosta, keskeiseksi tekijäksi nousee maa-alueitten tuottavuuden parantaminen suuremman saannon aikaansaamiseksi. Huomioon tulee ottaa myös biodiversiteetin suojeleminen, rajalliset vesiresurssit ja maaperän pilaantumisen estäminen. (Vuuren 2013, 20)

Bioenergiaan yhdistetyn hiilidioksidin talteenoton laajuudelle on erilaisia arvioita. Vuuren (2013, 21) esittää vuonna 2050 saatavilla olevan energian sijoittuvan välille 0–200 EJ/vuosi. Tyypillinen arvo, jota malleissa käytetään, on 150 EJ/vuosi. Arvion suuruuteen vaikuttavat malleja varten tehdyt oletukset teknologian laajuudesta, kilpailukyvykkyydestä ja kestävydestä. Vertailun vuoksi maapallon kokonaisenergiankulutus vuonna 2015 oli 551,7 EJ (Yhdistyneet Kansakunnat 2018, 2). BECCS voisi teoriassa vastata jopa 10–20 % kokonaisenergiankulutuksesta, jos biomassaa kasvatetaan tarkoituksenmukaisesti laajalti energiantuotantoon. Potentiaaliksi vuotuiselle hiilidioksidin talteenotolle arvioidaan 0–10 Gt CO<sub>2</sub> vuonna 2050, ja 0 – 20 Gt CO<sub>2</sub> vuonna 2100. Samalla kuitenkin todetaan, että täyttää potentiaalia tuskin tullaan saavuttamaan, koska kilpailua tulee olemaan biomassan muiden käyttökohteiden, kuten liikennepolttoaineiden ja biomateriaalien tuotannon, kanssa. Tällöin potentiaali asettuisi noin puoleen maksimaalisesta potentiaalista. (Vuuren 2013, 20–21)

Mohammad Pour (2018, 191) toteaa, että biomassaan liittyen 4,8 Gt CO<sub>2</sub> vuosittain on saavutettavissa varmasti kestäväällä tavalla, joka ei kilpaile esimerkiksi ruoantuotannon kanssa. Tämä talteenottomäärä koostuu maatalouden tähteistä, metsänhoidon tähteistä sekä orgaanisesta yhteiskuntajätteestä. Vastaavasti saatavilla olevaksi energiamääräksi, joka on kestäväällä pohjalla, arvioidaan 48 EJ/vuosi, mikä on huomattavasti pienempi kuin arviointimalleissa yleisesti käytetyt arvot. (Mohammad Pour 2018, 191)

## 4.2 Metsittämisen potentiaali

Metsittäminen on varteenotettava vaihtoehto BECCS-menetelmälle, kun halutaan tavoitella negatiivisia päästöjä. Toki ennen kuin on mahdollista päästä negatiivisiin päästöihin, tulee metsien poishakkuista esimerkiksi Amazonin alueella tai Afrikan sademetsissä saada vähennettyä huomattavasti. Merkittäviä päästövähennyksiä on saatavissa muuttamalla metsien käyttöä kestävämmäksi, jolloin metsä myös kasvaa hakatulle alueelle uudestaan. (Vuuren 2013, 22) Trooppisella vyöhykkeellä on noin 500 miljoonaa hehtaaria aluetta, joka oli aikaisemmin metsää, mutta jota ei nykyisin käytetä tuottavasti. Kyseisten metsäalueiden palauttaminen sitoisi vuosittain 3,7 Gt CO<sub>2</sub> vuosikymmenten ajan. (Fuss 2018, 14)

Arviot metsittämisen talteenottopotentialille vaihtelevat pessimistisistä arvioista, joissa negatiivisia päästöjä ei saavuteta lainkaan, positiivisiin 10 Gt CO<sub>2</sub>/a –arvioihin. Realistiseksi arvoksi katsotaan vuosittainen 4 Gt CO<sub>2</sub> talteenotto 2020–2050 aikana. Rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi mahdollinen kilpailu maa-alueista bioenergian kanssa sekä metsittämisen vaikutus maanpinnan heijastavuuteen. (Vuuren 2013, 22) Fuss (2018, 14) arvioi negatiivisten päästöjen olevan vuonna 2050 noin 0,5–7 Gt CO<sub>2</sub>/a, ja ylärajaksi vuonna 2100 12 Gt CO<sub>2</sub>/a.

## 4.3 Potentiaali hiilidioksidin kaappaukselle ilmasta

Suurimmat haasteet hiilidioksidin kaappaukselle suoraan ilmasta asettavat mahdollisimman suuren kontaktipinnan luominen saannon kasvattamiseksi, kosteuden käsittely ja suuri energiantarve. Energiantarve koostuu energiasta, joka tarvitaan hiilidioksidin vapauttamiseen sorbentista, sorbentin regenerointiin, tuulettimiin ja pumppuihin sekä kuljetusta varten suoritettavaan paineistukseen. Esimerkiksi hiilidioksidin erottamiseen kalsiumpohjaisesta liuottimesta tarvitaan yli 700 °C lämpötiloja. (Fuss 2018, 16–17)

Kustannukset nähdään tekijänä, mikä tulee määrittämään suoran ilmakaappauksen toteuttamiskelpoisuuden tulevaisuudessa. Kehityksen ollessa suotuisaa, potentiaali talteenotolle voi olla hyvinkin suuri. Useimmat arviot esittävät 10–15 Gt CO<sub>2</sub> talteenottoa vuosittain. Kirjallisuuden pohjalta Fuss (2018, 31) esittää vuosittaiseksi potentiaaliksi 0,5–5 Gt CO<sub>2</sub>. Huomionarvoista on kuitenkin se, miten tarvittava energia

ilmakaappaukseen on tuotettu. Mikäli energia on peräisin fossiilisten polttoaineiden poltosta, eivät hiilidioksidipäästöt ole kompensoitavissa DAC-tekniikalla. (Fuss 2018, 17)

#### **4.4 Tehostetun rapautumisen potentiaali**

Arviot tehostetun rapautumisen potentiaalista hiilidioksidin sitomiseksi kattavat niin teoreettisia, havainnollisia kuin paikallisia ja maailmanlaajuisia arvioita. Potentiaaleihin vaikuttavat soveltamiskohde, joita ovat erilaiset maaperät, rannikkoalueet tai avomeret. Suurin tähänastinen arvio alueellisesta talteenotto-potentiaalista on 88,1 GtCO<sub>2</sub>/a, jossa jauhattua kiviainesta levitetään erittäin laajalle trooppiselle alueelle. Tarkasteltaessa ainoastaan viljelysalueita, suurimmat vuosittaiset potentiaalit ovat 4,9 Gt CO<sub>2</sub> basalttikivelle ja 95 Gt CO<sub>2</sub> duniittikivelle. Realistiseksi arvioidaan kirjallisuuden välillä toisistaan runsaasti poikkeavien arvojen pohjalta 2–4 Gt CO<sub>2</sub>/a. (Fuss 2018, 21; 32)

#### **4.5 Biohiilen potentiaali**

Arviot biohiilen potentiaalille vaihtelevat välillä 0,6–11,9 Gt CO<sub>2</sub>/a. Arvioitten poikkeavuus toisistaan riippuu paljolti siitä, kuinka paljon biomassaa on käytettävissä biohiilen valmistukseen. Jos kaikki korjaustähteet metsistä ja 50 % käyttämättömistä viljatähteistä käytettäisiin biohiilen tuotantoon, olisi mahdollista päästä 2,8–3,3 GtCO<sub>2</sub>/a lukemiin (Lenton 2010, 148). Kirjallisuuden pohjalta Fuss (2018, 32) arvioi biohiilen sitomispotentiaaliksi 0,5–2 Gt CO<sub>2</sub>/a.

## 5 KUSTANNUKSET

Bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto on hyvistä ominaisuuksistaan huolimatta taloudellisesti huomattavasti kalliimpaa verrattuna esimerkiksi perinteiseen hiilivoimaan tai uusiutuviin tuuli- ja aurinkovoimaan. Tuotetun energian hinta BECCS:lle sijoittuu välille 160–210 €/MWh. Verrattuna hiilivoimaan, jonka kustannukset ovat alle 55 €/MWh, ei BECCS pysty kilpailemaan taloudellisesti ilman taloudellisia tukikeinoja tai lisämaksuja fossiilisille polttoaineille esimerkiksi päästökaupan muodossa, joka olisi suuruusluokkaa 115–175 €/tCO<sub>2</sub>. BECCS:n kilpailukyvykyys on saavutettavissa vain maailmanlaajuisella yhteisellä käytännöllä, jossa hiilidioksidin käytöllä on tuntuvat taloudelliset seuraukset. Nykyinen päästöoikeuden hinta EU:ssa on noin 8–9 €/tCO<sub>2</sub>, mikä on kaukana esitetystä arvosta. Toki bioenergian tuotanto olisi vielä huomattavan kallista, ja sen hintaa tulisi pyrkiä laskemaan suotuisalla lainsäädännöllä ja tukemalla teknologian kehitystyötä. (Mohammad Pour 2018, 192–193)

Metsittäminen on halvin keino tuottaa negatiivisia hiilidioksidipäästöjä. Metsittäminen itsessään sisältää perustamiskustannukset ja metsänhoitokustannukset niin kasvuvaiheessa kuin metsän ollessa täydessä mitassaan. Kustannustehokkuudessa voi esiintyä eroavaisuuksia alueiden välillä, joissa saannot, maan hinta ja liiketoimet ovat eri hintaisia. Fuss (2018, 14; 31) arvioi kirjallisuuden pohjalta, jossa esiintyy kustannusarvioita 0–215 €/tCO<sub>2</sub> välillä, tyypillisten kustannuksien talteenotettua hiilidioksitonnia kohti olevan 5–45 €/tCO<sub>2</sub>.

Suoran ilmaaappauksen kustannukset ovat pääasiallisesti peräisin investoinnista, operoinnin ja sorbentin regeneroinnin energiakustannuksista, sorbenttihäviöistä ja huollosta. Energiavaatimusten ollessa korkeita, on kustannuksia mahdollista pienentää esimerkiksi yhdistämällä laitos halpaa uusiutuvaa energiaa tuottavaan yksikköön. Lisäksi jos erotusprosessiin on mahdollista yhdistää hukkalämmön käyttöä, pystytään välttämään pääasiallisen lämmitysmuodon, esimerkiksi maakaasun, käyttöä. Kirjallisuudessa esiintyneet kustannusarviot ovat toisistaan hyvinkin poikkeavia johtuen erilaisista oletuksista, toteutustavoista ja siitä, että useimmat arviot käsittävät hiilidioksidin talteenoton eikä vältettyjen hiilidioksidipäästöjen kustannuksia. Ensimmäiset toteutuneet laitokset voivat olla kustannuksiltaan 530–890 €/tCO<sub>2</sub>, mutta tehtäessä yhä enemmän laitoksia, voivat kustannukset hyvinkin laskea tasolle 90–270 €/tCO<sub>2</sub>. (Fuss 2018, 17–20)



Tehostetun rapautumisen kustannukset liittyvät keskeisesti kivien jauhamiseen käytettävän teknologian valintaan, materiaalin kuljetukseen ja kiven louhintaan. Renforthin (2012, 238) Isossa-Britanniassa suorittamassa tutkimuksessa, jossa levitettiin paljon rautaa ja magnesiumia sisältäviä silikaattikiveä, päästiin kustannuslukemiin 60–515 €/tCO<sub>2</sub> tai 20–110 €/tCO<sub>2</sub> kivilajikkeen mukaan. Näitä lukemia on kohtuullista käyttää vertailupohjana, johon vaikuttavat toki alueelliset tekijät, kuten kiven hankinta tai kuljetusmuoto. Fuss (2018, 31) päätyy kirjallisuustarkastelun pohjalta arvioon 45–180 €/tCO<sub>2</sub>.

Myös biohiilen kohdalla kustannusarviot vaihtelevat merkittävästi, joskin vaihtelu on vähäisempää kuin esimerkiksi tehostetun rapautumisen kohdalla. Vaikka jotkin tutkimukset (Lomax 2015, 130; Roberts 2010, 832) ehdottavat talteenoton hinnoiksi 27–44 €/tCO<sub>2</sub>, kestäväälle tähteitä käyttävälle menetelmälle löydetään hinnan vaihteluväliksi 50–105 €/tCO<sub>2</sub>. Koska aikaisempaa kokemusta laajasta tuotannosta ei ole, on kustannusarvioissa mukana epävarmuutta. Joka tapauksessa korkeat biohiilen hinnat estävät tällä hetkellä sen laajan käytön. Fuss (2018, 32) mukailee arviossaan pitkälti kirjallisuutta ja päätyy lukemiin 27–110 €/tCO<sub>2</sub>.

## 6 VAIKUTUKSET

Jokaisen negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottavan menetelmän käyttöön liittyy sekä positiivisia että negatiivisia puolia, jotka voivat olla esimerkiksi ympäristöllisiä tai sosioekonomisia. Nämä ominaisuudet vaikuttavat siihen, mitkä menetelmät nousevat toisten edelle ja saavat sekä poliittista että sosiaalista hyväksyntää ja sitä myöten edellytykset laajempaan käyttöönottoon.

Bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto on ympäristöystävällistä, koska sen avulla voidaan korvata fossiilisilla polttoaineella toimivia voimaloita, ja ottaa samalla hiilidioksidia talteen. Tästä vuoksi myös energian tuotantovarmuus pysyy riittävän hyvällä tasolla. Teknologian käyttöönotto myös mahdollistaa maalla asuvalle väestölle tulojen kasvattamisen tuottamalla tarvittavia bioraaka-aineita. Haittapuolena on se, että alueet, joilla raaka-aineita viljellään, kilpailevat ruoantuotannon kanssa. Mahdollista on myös, että luonnon biodiversiteetti pienenee, jos vain tiettyjä lajeja viljellään. Lisäksi runsaan lannoitteiden käytön vaikutukset maaperään ja veteen, sekä mahdolliset maan käytön muutoksesta aiheutuva hiilidioksidin vapautuminen ilmakehään ovat varjopuolia teknologialle. (Fuss 2018, 31)

Hiilidioksidin kaappaus suoraan ilmasta ei aseta vaatimuksia maankäytölle, mikä on menetelmän yksi suurimmista eduista. Tietyt sovellukset voivat myös parantaa sisäilman laatua. Tällä hetkellä suurin haittapuoli on korkeat investointi- ja käyttökustannukset. Jos hiilidioksidin talteenottoon tarvittava energia tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, jää talteenotosta saatava hyöty selvästi maksimaalista pienemmäksi. Mikäli teknologia yleistyy seuraavien vuosikymmenten kuluessa, voivat materiaalien hankinta ja regenerointiprosessissa syntyvät jätevirrat asettaa ympäristölle rasitteita. (Fuss 2018, 19; 31)

Uudelleen metsittämisellä voidaan kasvattaa luonnon monimuotoisuutta, jos useampia eri lajeja käytetään luomaan uutta metsää. Metsien istuttaminen ja metsänhoito tarjoavat alueellista toimeentuloa ja luovat työllisyyttä. Lisäksi on todennäköistä, että maaperän ravinne- ja vesipitoisuudet parantuvat. Viljelyyn tai karjanhoitoon kelpaavan maan muuttaminen metsäksi vähentää maataloustuotteiden vientiä ja voi johtaa korkeampiin ruoan hintoihin. Jos metsää kasvatetaan hyvin yksipuolisesti, voi seurauksena olla myös

biodiversiteetin väheneminen. Mahdollisia haittavaikutuksia ovat myös maan käytön muutoksesta aiheutuvat kasvihuonepäästöt ja muutokset maanpinnan heijastuvuudessa. (Fuss 2018, 31)

Tehokas rapautuminen voi auttaa maaperää, johon kiviainesta levitetään. Suurempi sato ja kasvien parempi ravinteitten saanti ovat menetelmän positiivisia vaikutuksia. Myös maaperän hedelmällisyys, pH-arvo ja kosteus parantuvat. Suuren mittaluokan mineraalikaivuu ja sen kuljetus on ympäristölle haitallista. On olemassa myös riski, että kohdealueiden kasvien raskasmetallipitoisuudet nousevat. (Fuss 2018, 22; 32)

Biohiilen käyttö lisää saantoa viljelyalueilla ja vähentää kuivuutta. Biohiiltä käytettäessä maaperään myös maaperän metaani- ja dityppioksidipäästöt pienenevät. Maaperän vedenpitävyys paranee ja se säilyy ravinteikkaana. Raaka-aineiden saatavuus voi osoittautua rajoittavaksi tekijäksi, koska biomassan käyttöön liittyy kilpailua. Biohiilen aikaansaama kasvien nopeampi kasvu saattaa johtaa siihen, että kasvien puolustuskyky hyönteisiä, taudinaiheuttajia ja kuivuutta vastaan laskee. (Fuss 2018, 25; 32)

## 7 YHTEENVETO

Ilmastonmuutos on todellinen ongelma, ja sen ehkäisemiseksi on tehtävä toimenpiteitä. Se on tunnistettu kansainvälisiä energia-, ilmasto- ja poliittisia järjestöjä myöten. Yksi keino tähän tarkoitukseen on negatiiviset hiilidioksidipäästöt, missä ilmakehään päästettyä hiilidioksidia pyritään poistamaan sieltä. Negatiivisia hiilidioksidipäästöjä tuottavien menetelmien käyttöönotto näyttää todennäköiseltä, jos asetettuihin ilmastotavoitteisiin aiotaan päästä. Menetelmät ovat tarpeellisia myös siksi, koska tiettyjä sektoreita, kuten lentoliikennettä, on kallista muuttaa hiilineutraaliksi. Hiilidioksidin poistamisella voidaan kompensoida muiden sektoreiden tuottamia päästöjä.

Kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää vartenotettavia menetelmiä hiilidioksidin talteenoton toteuttamiseen. Menetelmiä ovat esimerkiksi bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto, metsittäminen, suora ilmakaappaus, tehostettu rapautuminen ja biohiilen käyttö maaperään. Menetelmistä yksikään ei ole vielä laajassa käytössä, vaan joko tutkimus- tai kokeiluasteella. Jokaisella menetelmällä on omat hyvät ja huonot puolensa, ja ne poikkeavat toisistaan esimerkiksi kustannusten ja talteenottopotentiaalien osalta. Työssä tarkasteltiin myös hiilidioksidin kuljetusta ja pitkäaikaista varastointia, joihin löytyy jo riittävän toteuttamiskelpoisia menetelmiä.

On epätodennäköistä, että mikään yksittäinen menetelmä nousee ratkaisevaksi tekijäksi ilmastonmuutoksen hillinnän suhteen, vaan haluttu tilanne saavutetaan monen eri menetelmän ja päästöjen rajoittamisen yhdistelmällä. Menetelmien käyttöönottoon vaikuttavat paitsi taloudelliset seikat, myös poliittinen ja yhteiskunnallinen hyväksyntä. Integroidut arviointimallit, joilla pyritään simuloimaan erilaisia skenaarioita ilmastokehitykselle, antavat ymmärtää, että ilmastotavoitteisiin on vaikea päästä skenaarioissa, joissa hiilidioksidia ei lainkaan poisteta ilmasta. Negatiivisten hiilidioksidipäästöjen toteuttamiseen on jo sitouduttu valtiotasolla, sillä ne ovat olennainen osa Pariisin ilmastosopimusta, jossa sovittiin kansainvälisesti kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisesta.

## LÄHDELUETTELO

Anderson, K. 2016. The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309), pp. 182-183.

Chen, W., Seiner, J., Suzuki, T. & Lackner, M. 2012. *Handbook of Climate Change Mitigation*. New York, NY: Springer US.

GreenHouse Gas Online. [verkkojulkaisu] Viitattu 4.3.2019. Saatavissa: <http://www.ghgonline.org/co2sinkocean.htm>

Guivarch, C., Heidug, W. Bioenergy with carbon capture and storage: the negative emission concept. 2012. *Electricity in a climate-constrained world*. pp. 80-85

Hanak, D. P. 2017. Calcium looping combustion for high-efficiency low-emission power generation. *Journal of Cleaner Production*, 161, pp. 245-255.

Fuss, S. 2018. Negative emissions—part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), p. 063002.

IEA. International Energy Agency. 2018. *World Energy Outlook. Executive Summary*.

IEA. International Energy Agency. *Carbon Capture Utilization and Storage*. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 13.02.2019]. Saatavissa: <https://www.iea.org/topics/carbon-capture-and-storage/>

International Energy Agency. 2010. *Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios and Strategies to 2050*. ISBN: 978-92-64-08597-8

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University

Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. ISBN 978-1-107-65481-5

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp]

Kirschbaum, M. 2011. Implications of albedo changes following afforestation on the benefits of forests as carbon sinks. *Biogeosciences*, 8(12), p. 3687.

Kuparinen, K., Yliopisto, L. t., Technology, L. U. o. & Systems|, f. o. E. S. o. E. Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. Springer Netherlands.

Lenton, T. 2010. The potential for land-based biological CO<sub>2</sub> removal to lower future atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Carbon Management*, 1(1), pp. 145-160.

Lomax, G. 2015. Reframing the policy approach to greenhouse gas removal technologies. *Energy Policy*, 78, pp. 125-136.

Lukeš, P. 2016. Multidecadal analysis of forest growth and albedo in boreal Finland. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 52, pp. 296-305.

Marcucci, A. 2017. The road to achieving the long-term Paris targets: Energy transition and the role of direct air capture. *Climatic Change*, 144(2), pp. 181-193.

Miglietta, F. & Valentini, R. 2015. *The Greenhouse Gas Balance of Italy: An Insight on Managed and Natural Terrestrial Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Mohammad Pour, N. 2018. Bioenergy with carbon capture and storage; sustainability, challenges, and potential.

Moreira, D. 2016. Atmospheric CO<sub>2</sub> capture by algae: Negative carbon dioxide emission path. *Bioresource Technology*, 215, pp. 371-379.

Renforth, P. 2012. The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10(C), pp. 229-243.

Roberts, K. 2010. Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science & Technology*, 44(2), pp. 827-833.

Rohweder L., Virtanen A. 2011. *Ilmastonmuutos käytännössä: Hillinnän ja sopeutumisen keinoja*. ISBN: 978-952-495-178-4.

Sanz-Pérez, E. 2016. Direct Capture of CO<sub>2</sub> from Ambient Air. *Chemical Reviews*, 116(19), pp. 11840-11876.

Serreze, M. 2010. Understanding Recent Climate Change. *Conservation Biology*, 24(1), pp. 10-17.

Smith et al. Review article: Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions. Published 7.12.2015. *Nature Climate Change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE2870.

Smith, L. 2013. Ecological limits to terrestrial biological carbon dioxide removal. *Climatic Change*, 118(1), pp. 89-103.

Stockmann, U. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, pp. 80-99.

Strefler, J. 2018. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3), p. 1-10.

ten Berge, H. F. M. 2012. Olivine Weathering in Soil, and Its Effects on Growth and Nutrient Uptake in Ryegrass (*Lolium perenne* L.): A Pot Experiment (Olivine Weathering in Soil).

Teir, S. 2009. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Espoo: VTT.

Teir S., et al. 2011. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa. ISBN 978-957-38-7697-5

Turunen, H. 2011. CO<sub>2</sub>-balance in the atmosphere and CO<sub>2</sub>-utilization: An engineering approach. Oulu: University of Oulu.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. The Paris Agreement. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 13.02.2019] Saatavissa: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

Vidal Vázquez, F., yliopisto, L. t., Technology, L. U. o. & Systems|, f. o. E. S. o. E. 2018. Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. Elsevier.

Vuuren, D. 2013. The role of negative CO<sub>2</sub> emissions for reaching 2 °C—insights from integrated assessment modelling. Climatic Change, 118(1), pp. 15-27.

Yhdistyneet Kansakunnat. 2018. Energy Statistics Pocketbook 2018.

Zhang, Z. 2017. Carbon dioxide storage schemes: Technology, assessment and deployment. Journal of Cleaner Production, 142, pp. 1055-1064.