



# Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi

Veera Kähkönen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

**Kähkönen, Veera**

### **Hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastointi**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2022, 41 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

### **Tiivistelmä**

Hiilidioksidi on kiistanalainen termi nykyisessä ympäristökeskusteluilmapiirissä. Elintärkeän, muttei ongelmattoman kaasun lisääntymistä ilmakehässä yritetään hillitä hiilikiertoon puuttamalla. Kiertoa muokataan uudelleenohjaamalla hiilidioksidia esimerkiksi teollisuuden tarpeisiin tai loppusijoitusjärjestelmään. Hiilineutraalius toimii myyntivalttina, siksi työssä käsiteltiin tiettyjen päästökompensoinnin osa-alueitten konkreettisia vaatimuksia.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda katsaus ja lähdepaketti Jyväskylän ammattikorkeakoulun energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelmalle. Ympäristöpäästöjen hallinta -opintojakson materiaaleista puuttui ajankohtainen sisältö hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia koskien. Hiilidioksidin käsitteleminen teollisuudelle tärkeänä virtana oli tärkeää saada sisällytettyä materiaaliin. Demonisoinnin sijaan siihen voitaisiin suhtautua resurssina ja arvokkaana sivuvirtana.

Työn tavoitteeksi muodostui myös ympäristökeskustelun puolueettomuuden ajaminen sekä avoimen keskustelu-, pohdinta- ja kyseenalaistamisilmapiirin luominen. Todettiin, että debatointi ja tiedon haalinta laajalti eri lähteistä on ainoa keino lähestyä kompleksisia ja laaja-alaisia ympäristötavoitteita.

Lähteiden luotettavuutta ja julkaisuajankohtaa pohdittiin opiskelijan näkökulmasta. Päädyttiin yhdistämään laajoja teoriapuolen ja kerätyn datan raportteja sekä tietoa erilaisista pilottihankkeista. Myös epäonnistuneita ja keskeytyneitä projekteja käytiin läpi realiteettien esiin tuomiseksi. Lähteinä toimivat niin yritysten sivut, artikkelit, kandidaatin- ja opinnäytetyöt kuin tutkimuskeskusten aineistot.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Pitkään ja hartaasti kerätyn tietoperustan avulla luotiin lähteistö, jonka avulla opintojakson vetäjä pystyy säästämään aikaa ja resursseja kurssiaineistoa päivittäessään. Työn on silti tarkoitus olla helposti lähestyttävä lukijan taustasta riippumatta.

Todettiin, että suurin osa raporteista ja tutkimuksista sijoittuu muutaman vuoden – reilun vuosikymmenen taakse. Ajankohtaisen ja puolueettoman tiedon kerääminen osoittautui haastavaksi. Alan tulevaisuus näyttää suhteellisen valoisalta energiamurroksen ansiosta, mutta hektinen ja epävarma maailmantilanne saattaa tulla jarruttamaan etenkin suunnitteilla olevia projekteja.

### **Avainsanat (asiasanat)**

Hiilidioksidi, talteenotto, hyötykäyttö, varastointi

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

**Kähkönen, Veera**

### **Capture, utilization, and storage of carbon dioxide**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2022, 41 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

Carbon dioxide is a controversial term in the current climate of debate. Attempts are being made to control the increase of the vital, but not unproblematic gas by altering the carbon cycle. The cycle is altered by redirecting carbon dioxide for example to the needs of industry or to a permanent repository. Carbon neutrality is an effective selling point, and that is why the concrete requirements of some sectors of the emission compensation are addressed in the thesis.

The aim of the thesis was to create a report and a source list for the Degree Programme in Energy and Environmental Technology of JAMK University of Applied Sciences. The course of controlling environmental emissions was missing up-to-date content regarding the capture and storage of carbon dioxide. It was important to include the role of carbon dioxide as a significant stream for industry. Instead of demonizing, it could be considered as a resource and a valuable side stream.

It also became an aim of the thesis to work towards neutrality in the environmental debate and to create an open space for discussion, contemplation, and questioning. It was established that the only way to approach complex and wide-ranging environmental goals is to debate and collect information from a multitude of sources.

The reliability of the sources and the date of publication were looked at from the perspective of the student. This led to combining large reports including theoretical and collected data and information about different pilot projects. Failed projects were also brought up to bring forward the realities. The used sources were corporate websites, articles, bachelor's theses, and research center materials.

The thesis implementation method was a literature review. A list of references was created through a long and time-consuming collection of information. That bibliography will help the course teacher to save time and resources when updating the course materials. The aim of the thesis is to still be easily approachable regardless of the reader's background.

It was found that the timeframe of most of the reports ranged from a few years to little over a decade. The collection of up-to-date and unbiased information proved challenging. The future of the industry seems quite positive because of the global energy transition but the hectic and uncertain state of the world may slow down especially projects that are under planning.

### **Keywords/tags (subjects)**

Carbon dioxide, capture, utilization, storage

### **Miscellaneous (Confidential information)**

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma ja eettisyys</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Elämän hiili</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Hiilen kiertokulku</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Hiilidioksidin talteenotto</b> .....	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Talteenotto polttoaineista</b> .....	<b>11</b>
6.1	Ennen polttoa.....	13
6.2	Happipolttto .....	13
6.3	Savukaasuista .....	14
6.3.1	Drax BECCS.....	14
6.3.2	Petra Nova .....	15
<b>7</b>	<b>Hiili-imurit</b> .....	<b>15</b>
7.1	Climeworks.....	17
7.2	Carbon Engineering.....	18
<b>8</b>	<b>Bio-CCS</b> .....	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Hiilidioksidin hyötykäyttö</b> .....	<b>20</b>
9.1	Puhtaan hiilidioksidin käyttö.....	22
9.2	Jalostetun hiilidioksidin käyttö.....	23
<b>10</b>	<b>Puhtaan hiilidioksidin loppusijoitus</b> .....	<b>24</b>
10.1	Carbfix .....	27
10.2	Northern Lights .....	28
10.3	Project Sleipner .....	28
10.4	In Salah .....	29
<b>11</b>	<b>Ympäristökeskustelu</b> .....	<b>30</b>
11.1	Energiamurros.....	31
11.2	Hiilineutraalius .....	33
<b>12</b>	<b>Luotettavuus</b> .....	<b>34</b>
<b>13</b>	<b>Tulokset ja yhteenveto</b> .....	<b>35</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>36</b>

**Kuviot**

Kuvio 1. Erilaisia talteenottomenetelmiä .....	11
Kuvio 2. Hiilidioksidin talteenotto polttoaineista .....	12
Kuvio 3. Drax BECCS .....	14
Kuvio 4. Kaupallisia Direct Air Capture -toimijoita vuonna 2019 .....	16
Kuvio 5. Climeworksin ja Carbfixin yhteisprosessi .....	17
Kuvio 6. Carbon Engineeringin hiilidioksidin talteenottoprosessi .....	18
Kuvio 7. Hiilidioksidin teollisuuskäytön kasvu sekä sen kohteet .....	21
Kuvio 8. Northern Lights: Varastoitavan hiilidioksidin laatuvaatimukset .....	26
Kuvio 9. Hiilidioksidin mineralisoituminen .....	27
Kuvio 12. Northern Lights .....	28
Kuvio 10. Project Sleipner .....	29
Kuvio 11. In Salah Project .....	30

# 1 Johdanto

Hiilidioksidi on ollut jo pitkään pinnalla yleisessä keskustelussa. Yritysten, organisaatioiden kuten yksityishenkilöidenkin vastuuta ja hiilijalanjälkeä on nostettu tapetille. Hiilineutraalius on termi, joka on yleistynyt niin mainoskampanjoissa kuin tuotepakkauksissa, kertoen hiilidioksidin huomiointamisesta prosessissa. Kansalaisen pää on saattanut mennä pyörälle, tai vaihtoehtoisesti kuluttaja on saanut ostettua itselleen mielenrauhan käyttämällä hiilitietoisten yritysten tuotteita ja palveluita. Tosiasia on, että hiilidioksidia vapautuu joka ikisessä tuotantoprosessissa. Oli sitten kyse jättimäisestä tehtaasta tai yksittäisestä villasukkan neulojasta niin hiilidioksidia vapautuu, halettiin tai ei. Opinnäytetyössä käsitellään hiilikiertoa ja sen osittaista katkaisua sekä uudelleenohjausta. Selvitetään, miten hiilidioksidia voidaan palauttaa ihmisen luomaan kiertoon luonnonkierron sijaan ja joko valjastaa prosessikäyttöön tai loppusijoittaa takaisin Äiti Maan huomaan.

Aihevalinta opinnäytetyölle oli helppo Jyväskylän ammattikorkeakoulun ollessa vailla kurssimateriaalia ympäristöpäästöjen hallinta -opintojaksolle. Lisäksi sitä joudutti itseäni kiinnostava aihepiiri, jossa on paljon uutta opittavaa. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma käy läpi monipuolisesti erilaisia aiheita, ympäristöpäästöjen ja -vaikutusten ymmärtäminen on niistä todella monien sidoksissa. Työn tarkoituksena on tuoda terminologia, erilaiset lähteet, teknologioitten ja menetelmien pääpiirteet sekä niin työn kirjoittajan kuin lukijan oma ajattelu samaan pakettiin. Hiilidioksidin kaltainen reaktioita nostattava keskeinen termi, josta saatava tieto on monella pelkän valtamedian tai yritysten ja organisaatioitten luoman mielikuvan varassa, on ollut mielestäni loistava kohde. Tulevaisuuden ammattilaisten tulee pystyä ymmärtämään ihmiskunnan vaikutusten eri ulottuvuuksia: ei ole olemassa vain mustaa ja valkoista. Turhautuminen yksipuoliseen ja meille elintärkeää kemiallista yhdistettä demonisoivaan informaatioon koitui lopulta työni keskeisimmäksi henkilökohtaiseksi oivallukseksi ja punaiseksi langaksi.

Työssä käsitellään energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen talteenottoa prosessin eri vaiheissa, sekä talteen otetun hiilidioksidin jatkokäyttöä. Käsiteltävänä on erilaisia pilottilaitoksia sekä hiilidioksidin talteenottolaitoksia, työssä ei oteta huomioon esimerkiksi logistisia päästöjä. Työssä käydään läpi myös yleisimpiä ja tutkituimpia hiilidioksidin loppusijoitusmenetelmiä. Ala kasvaa ja uusia ratkaisuja ja teknologioita löydetään koko ajan, työstä saa käsityksen menetelmien perusteista ja pohjaa kehittyneempiin ja uudempiin innovaatioihin. Aiheeksi valikoitui myös ympäristökeskustelun tila.

## 2 Tutkimusasetelma ja eettisyys

Tutkimuskysymykset muotoutuivat työn edetessä ja tavoite muodostui varsinaisten kysymysten lisäksi avaintermeistä ja -lauseista. Työ käynnistettiin ja tietoperustaa aloitettiin keräämään alla listattujen kysymysten ja termien avulla, mutta opinnäytetyön edetessä ja välipalavereissa asiaa puidessa työtä rajattiin ja uudelleensuunnattiin useaan otteeseen. Tutkittavien aiheiden rajallisuus tuli ilmi vasta työn edetessä, ja siitä muodostui ajankäytöllisiä haasteita.

1. Millaisia teknologioita on jo olemassa? Entä kehitteillä?
2. Millaisia pilottilaitoksia on?
3. Mikä merkitys hiilidioksidin talteenotolla on kansainvälisessä ilmastopolitiikassa?
4. Talteenotto bioenergiasta
5. Hiilidioksidin varastointi ja käyttö
6. Hiilineutraalius

Opinnäytetyön menetelmä on kirjallisuuskatsaus, sillä työssä ei kehitetä olemassa olevaa eikä luoda uutta. Kirjallisuuskatsaus paisuu helposti ja työn laajuuden rajaaminen aiheuttikin ajoittain lisäpohdintaa. Sisältöanalyysin taso on pohdittava oletetun lukijan näkökulmasta, tässä tapauksessa niin yksittäisen energia- ja ympäristötekniikan opiskelijan kuin ympäristöpäästöjen hallinta -opintojakson vetäjän. Työn on silti tarkoitus olla helposti lähestyttävä ja antaa ruohonjuuritasoltakin valmius tutustua aiheeseen syvemmin lähteistön muodossa. Työ ei ole salassapidettävä eikä se vaatinut tutkimuslupaa.

Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet on huomioitu kirjoitusprosessin aikana. Puolueettomuus on ollut koko työn perustana, vaikka aiheiden sisäistä debatointia onkin käyty etenkin ympäristökeskustelun kohdalla. Tavoitteena on päästää irti tämänhetkisestä puolueellisuudesta, muttei työntää lukijaa liikaa toiseenkaan suuntaan. Lähdeaineiston kohdalla on pyritty etsimään mahdollisimman puolueetonta tietoa, lukijan on kuitenkin hyvä ymmärtää kyseessä olevan muun muassa yritysten antamaa informaatiota. Aineiston luotettavuudesta lisää opinnäytetyön loppuosassa.

### 3 Elämän hiili

Hiili, C, lat. *carbonium*, epämetallinen alkuaine järjestysluvultaan kuusi (6). Tuo luonnon kiertokulun korvaamaton rakennuspalikka. Missä on elämää, siellä on oltava myös hiiltä. Kaikista yhdisteistä on hiilyhdisteitä 95 prosenttia, lähes kymmenen miljoonaa, ja lisää löydetään koko ajan. (Hiili alkuaineena n.d.) Hiilen yhdisteet ovat sekä orgaanisia että epäorgaanisia. Yli 99 prosenttia hiilestä on varastoituneena maan fossiilisiin muodostumiin, pelkästään kivihiiltä on Maan kuoressa tuhat miljardia tonnia. Öljy, maakaasu ja ruskohiili ovat muita sen fossiilisia muodostumatyyppejä. Fossiilinen aine on eloperäistä ainesta eli muinaisten eliöitten jäänteitä, jotka ovat vaatineet miljoonia vuosia korkeaa lämpötilaa ja painetta kehittyäkseen nykyiseen muotoonsa. (Hiilivarannot n.d.)

Tiivistetään edellinen; hiili on elämää ja fossiilinen polttoaine muinaisbiomassaa. Missä siis ongelma? ”Palavaa kiveä” on osattu käyttää ihmiskunnan toimesta tuhansia vuosia. Meillä ei olisi ollut teollista vallankumousta 1800-luvulla, jos kivihiilen sijaan höyrykoneen kattilaan olisi mätetty puuklapia. Energiarikkaitten fossiilisten polttoaineiden käyttöön valjastaminen on rakentanut kivilajan nykyiselle elintasollemme, mutta osa niiden kustannuksista näkyy viiveellä. Elinympäristömme laadun syöksylasku on ihmiskunnan kehittymisen, energiantarpeen ja räjähdysmäisen väestönkasvun aiheuttamaa. Biodiversiteetti on kaiken luonnon toiminnan lähtökohta. Mitä monimuotoisempaa elämä maapallolla on, sitä monipuolisemmin resursseja se käyttää ja myös tuottaa. Paikallisten vaikutusten minimointi on eläin- ja kasvilajeille ensiarvoisen tärkeää ja on avainasemassa myös ihmisten ravinnonsaannissa, mutta hiilidioksidin vähentäminen luonnon hiilikierrosta on kokonaiskuvassa vahva vaikuttaja. Monen asian yhtälö on kasvattanut ihmisten määrää ja tarpeita luonnottomaan mittakaavaan, josta ei ole paluuta. Ilmaston tekohengitys on yksi konkreettinen keino jarruttaa ihmisen toiminnan aiheuttamaa vahinkoa.

### 4 Hiilen kiertokulku

Maapallon omana termostaattina toimii sen monimuotoinen luonto ja jatkuva energian ja aineen kiertokulku eliöissä ja ympäristössä. Lämpötilaan vaikuttavat ulkoisten vaikutusten kuten Auringon energian heilahtelun lisäksi niin ilman sisältämä vesihöyry, hiilen ja typen yhdisteet kuin esimerkiksi otsonikerrosta vahingoittavat freonit. Hiiltä sitoutuu ja vapautuu maapallon ekosysteemeissä koko ajan, kiertäen ilmakehän, vesistöjen, maaperän, kasvien ja eläinten välillä. Hiilikierto on yksi

biogeokemiallisista kierroista vedyn, typen, hapen, rikin ja fosforin ohella. Auringonvalon sisältämä energia mahdollistaa kasvien fotosynteesin, jossa vedestä ja hiilidioksidista muodostuu erilaisia hiilihydraatteja sekä happea. Hiiltä vapautuu takaisin ympäristöön ja ilmakehään kasvien soluhengityksessä, sekä niiden maatuessa. Eläinten uloshengitys sisältää hiilidioksidia, niiden kuollessa ja maatuessa vapautuu hiiltä niin maaperään kuin ilmakehään. Meren pintakerrokseen hiiltä sitoutuu suuria määriä, mutta sitä vapautuu lähes samaan tahtiin. Syvällä valtamerissä hiilidioksidi pysyy varastossa, sinne se kulkeutuu mm. levien avulla. (Fisher 2017; Globaalit nielut n.d.; The Causes of Climate Change n.d.)

Erilaiset luontotyypit ja ekosysteemit sitovat hiiltä omilla tavoillaan ja omanlaisellaan volyymilla. Kun puhutaan hiilinielusta, tarkoitetaan sillä mitä tahansa hiiltä sisältävää kemiallista yhdistettä keräävää prosessia. Hiilinielusta puhutaan paljon mediassa, ja suomalaisille tuttuja luonnonnieluja ovat metsät sekä suot. Kangasmetsä on havumetsää parempi hiilensidonnassa, sillä havupuut yhteyttävät vähemmän (trooppisia sademetsiä ei turhaan kutsutakaan maapallon keuhkoiksi). Valittavasti Suomessakin yleistyneet puupellot eli yhden puulajin talousmetsät sitovat energiaa rajallisesti, verrattuna monimuotoisen ekologisen ympäristön kasvustoon (Suokko & Partanen 2017, 253–254). Vaikka soluhengitys myös vapauttaa hiiltä, on kasvava metsä hiilinielu sitoessaan sitä enemmän mitä vapauttaa. Hiilinielut ovat luonnollisesti samalla hiilivarastoja. Kun hakkuut ylittävät kasvun, muuttuu metsä varastosta hiilenlähteeksi. Tämä on suuri ongelma etenkin köyhissä, kasvavan asukasmäärän ja maatalouden maissa. Suomessa merkittävimpinä varastoina toimivat kasvavan metsän ja suoturpeen lisäksi vesistöjen pohjien maa-aineskerrokset sekä maaperä. Ison pallon mittakaavassa bio-, hydro-, lito-, kryo- ja geosfäärissä varastoina toimivat muun muassa vanhat puut ja suot, valtameret, jäätiköt ja maan kerrostumat. (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.; Hiilenkierto 2017; Hiilinielusta huolehtiminen n.d.)

Hiilen määrä maapallolla on vakio. Siitä valtaosa sijaitsee maan pinnan alapuolella, miljardeja vuosia varastoituneena. Hiili vapautuu ilmakehään muun muassa hiilidioksidina (CO<sub>2</sub>) ja metaanina (CH<sub>4</sub>). Metaani on molekyylitasolla selkeästi voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi (noin 86-kertainen, 20 vuoden ajanjaksolla), mutta sen määrä ja elinikä ilmakehässä ei ole yhtä merkittävä. Noin 12 vuoden jälkeen metaanimolekyylit hajoaa Maan ilmakehässä vedeksi ja hiilidioksidiksi. Metaanin määrä on kasvanut yli kahdeksankertaiseksi 250 vuoden aikana, ja sitä on varastoituneena ikeroudassa sekä merien pohjakerroksissa. Vaikka metaanin vaikutusaika ei ole kovin

pitkä, ovat sen vaikutukset suuria ja kasvavat vuosi vuodelta. Sitä vapautuu erilaisissa mätänemisprosesseissa, kuten kaatopaikoilla, märehitjööitten suolistossa (niin luonnonvaraisten kuin tuotantoeläinten osalta), vesistöjen pohjakerroksissa, soilla ja kosteikoilla. Metaania vapautuu maatalouden prosesseista sekä puun poltosta, hiilikaivoksista, fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja tuotannosta sekä maakaasuputkivuodoista. (Metaani n.d.; Tervonen 2021.)

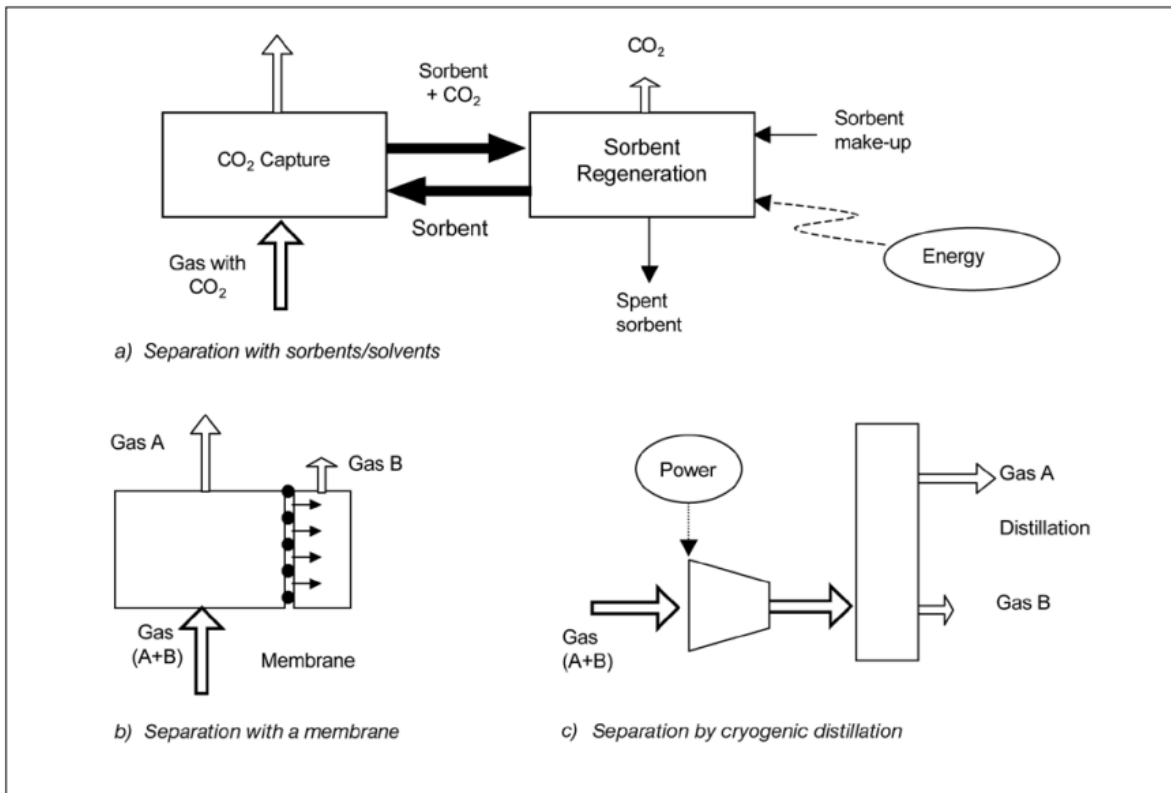
Hiilidioksidi on elintärkeä osa ilmakehää, samoin kuin muutkin kasvihuonekaasut. Ilman näitä kaasuja maanpinnan lämpösäteily karkaisi avaruuteen ja maapallon pinnan lämpötila olisi arviolta 33 astetta alhaisempi. (Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin 2020.) Hiilidioksidi on silti ollut tapetilla jo pitkään. Sen pitoisuuksien noustessa ilmakehässä vaikutukset ovat pidempiaikaisia, vaikka hiilikierto itsessään on nopeaa. Yksittäinen hiilidioksidimolekyyli viipty ilmakehässä vain viitisen vuotta, mutta sen vaikutus näkyy satoja vuosia. Sadasta ylimääräisestä CO<sub>2</sub>-molekyylistä on ilmakehässä 30 vuoden kuluttua vielä puolet, muutaman sadan vuoden päästä viidesosa ja pieni määrä säilyy ilmakehässä tuhansia vuosia, kunnes päätyy syvälle valtameriin. Alkuperäiset molekyylit jatkavat matkaansa hiilikierrossa, mutta ne korvautuvat kierron kapasiteetin rajoissa uusilla ja näin vaikutus jatkuu huomattavan pitkään. (Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku n.d.)

## 5 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidikeskustelussa esiin nousee termi Carbon Capture and Storage (CCS), eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. The Global CCS Institutin raportin mukaan vuoden 2021 syyskuussa CCS-laitoksia oli 135 kappaletta. Näistä toiminnassa 27 laitosta, rakennusvaiheessa 4, kehitysvaiheessa 102 ja toiminta keskeytetty 2 laitoksen osalta. Toiminnassa olevien laitosten kapasiteetiksi ilmoitettiin 36,6 miljoonaa tonnia vuodessa ja kaikkien tällä hetkellä suunnitteilla olevien laitosten toimintaan saaminen nostaisi kapasiteetin 147,3 miljoonaan tonniin. (Global status of CCS 2021 2021, 14.) Suoraan ilmasta talteen ottavia hankkeita on IEA:n mukaan 19 (Direct Air Capture [1] 2021). Vertailun vuoksi; Suomen hiilidioksidipäästöt olivat 47,8 miljoonaa tonnia vuonna 2020 (Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020 2022).

Esimerkiksi maakaasun tuotannossa hiilidioksidin talteenotto on pakollista kaasun korkean CO<sub>2</sub>-pitoisuuden vuoksi. Puhtausvaatimusten takia erotettu hiilidioksidi on kuitenkin päästetty perinteisesti ilmaan, sitä lainkaan hyödyntämättä.

Kuviossa 1 on havainnollistettu kolme käytettyä hiilidioksidin erotus- ja talteenottomenetelmää. Talteenotto sorbentin (sorbent) tai liuotteen (solvent), kalvon (membrane) tai kylmätisleen (cryogenic distillation) avulla. Menetelmistä on lukuisia eri sovelluksia, mutta pääperiaatteet pysyvät. (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 110.)



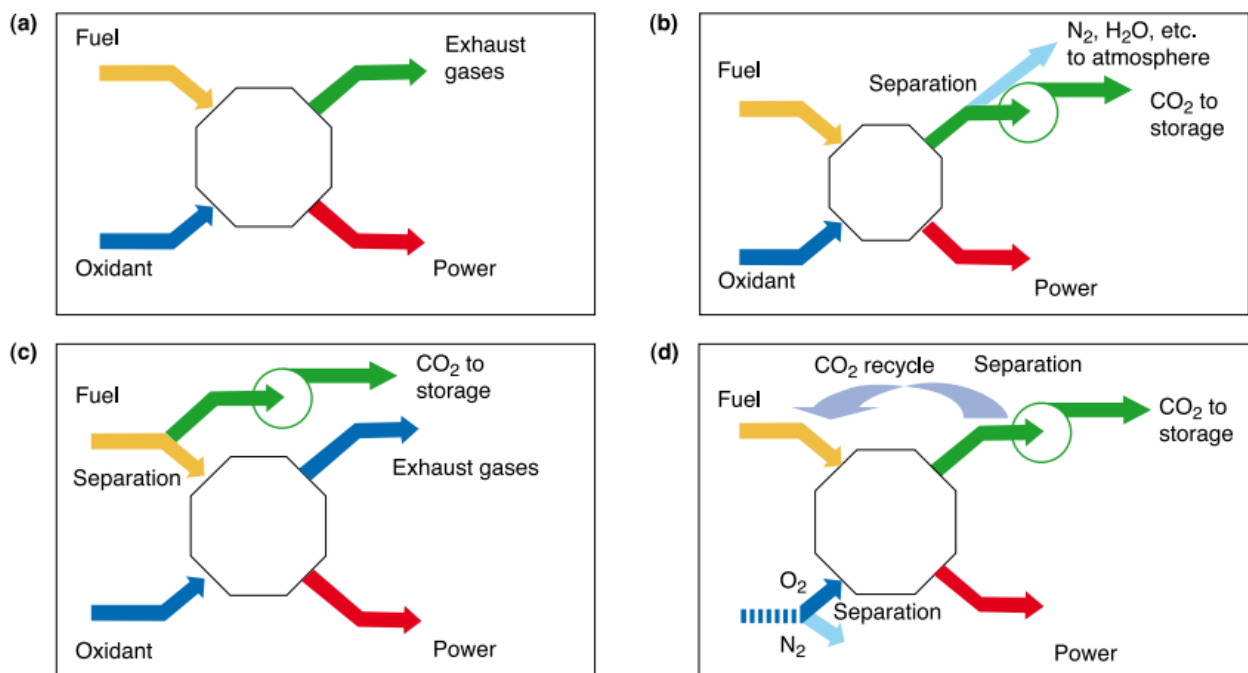
Kuvio 1. Erilaisia talteenottomenetelmiä (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 110.)

## 6 Talteenotto polttoaineista

Hiilidioksidin talteenotto lisää voimalaitoksen kustannuksia ja energiankulutusta ja täten laskee hyötysuhdetta, siksi talteenottotekniikka tulee arvioida kohteen mukaan. Erilaiset menetelmät soveltuvat erilaisiin laitos- ja polttoainetyyppeihin. Hiilidioksidin erottaminen prosessissa ei ole uusi ajatus, vaan on ollut käytössä vuosikymmeniä erilaisissa kemianteollisuuden ja synteettisten polttoaineteiden tuotannon toiminnoissa. Menetelmä on kuitenkin keskittynyt vetytitoisen kaasun tuottamiseen hiilidioksidin talteenoton sijaan, vasta viime vuosikymmeninä sitä on alettu kehittää voimalaitosmittakaavaan ja juurikin talteenottoon. (Kousa 2009, 6–7.) Hiilidioksidipitoisuus-

det vaihtelevat menetelmittäin, ennen polttoa saadun seoksen pitoisuus on 25–40 %, savukaasujen pitoisuus 3–15 % ja happipolton lopputuotteen jopa yli 80 %. (Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi n.d.)

Kuviossa 2 yksinkertaistettuna eri periaatteet ja seuraavissa alaluvuissa kerrotaan menetelmistä tarkemmin. Kaaviot: (a) sähköntuotanto fossiilisilla polttoaineilla; (b) talteenotto savukaasuista (post-combustion); (c) talteenotto ennen polttoa (pre-combustion); (d) happipolto (oxy-combustion) (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 61).



Kuvio 2. Hiilidioksidin talteenotto polttoaineista (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 61).

Nykyisten laitosten iän, tyyppin ja kohteiden omien rajallisuuksien ja taloudellisen kannattavuuden määrätessä ei sopivaa talteenottotekniikkaa aina löydy. Tällä hetkellä toiminnassa olevien esimerkkilaitosten löytäminen on haastavaa, eikä kaikkiin menetelmiin sellaista päätynt.

## 6.1 Ennen polttoa

Ennen polttoa (pre-combustion) tapahtuva hiilidioksidin talteenotto vaatii polttoaineen olevan kaasumaisessa olotilassa, tämän vuoksi maakaasu on tyypillinen polttoaine kyseisen menetelmän kohdalla. Kivihiili on toinen tyypillinen polttoaine, sillä se voidaan esikäsitellä menetelmään sopivaksi. Kivihiilivarannot ovat myös huomattavasti maakaasuvarantoja suuremmat. Talteenotto ennen polttoa on kivihiilen kohdalla tehokkaampaa kuin talteenotto savukaasuista perinteisen hiilikattilan kohdalla. Polttoainetta käsitellään hapella ja/tai vesihöyryllä, näin saadaan muodostettua hiilimonoksidia eli häkää ja vetyä sisältävä seos. Häkä reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen hiilidioksidia, lopputuotoksena on siis kaasuseos vedystä ja hiilidioksidista. (Kousa 2009, 6–8; Pre-combustion n.d.)

Talteenottomenetelmään ei sovellu minkäläinen laitostyyppi tahansa, vaan siihen vaaditaan kombivoimalaitos. Jo 70-luvulta käytössä ollut maakaasunpolttolaitostyyppi koostuu yhdistetystä höyry- ja kaasukierrosta. Kiinteän, kaasutetun polttoaineen laitokset kehitettiin parikymmentä vuotta myöhemmin kaupalliseen mittakaavaan. Hiilidioksidin talteenottoon soveltuminen huomattiin kuitenkin vasta myöhemmin, eli laitoksia ei ole suunniteltu alun perin erotusprosessia ajatellen. Kaasutusprosessi on suhteellisen kallis, vaikka hiilidioksidin erotusprosessin kustannukset ovat matalahkot. (Kousa 2009, 10.)

## 6.2 Happipoltto

Happipoltto (oxy-combustion) on nimensä mukaisesti menetelmä, jossa polttoilman sijaan käytetään puhdasta happea. Polttoprosessista saadaan ulos pääosin vesihöyrystä ja hiilidioksidista muodostuva seos, jonka jäähtyessä vesihöyry kondensoituu nesteeksi eli vedeksi ja jäljelle jää hiilidioksidipitoisuudeltaan korkea seos, jopa yli 80 %. Puhtaan hapen valmistaminen nostaa kustannuksia, eikä menetelmällä ole muita etuja. Happipoltto nostaa palamislämpötilaa merkittävästi, joten osa savukaasuista on johdettava takaisin tulipesään. (Kousa 2009, 8; Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi n.d.)

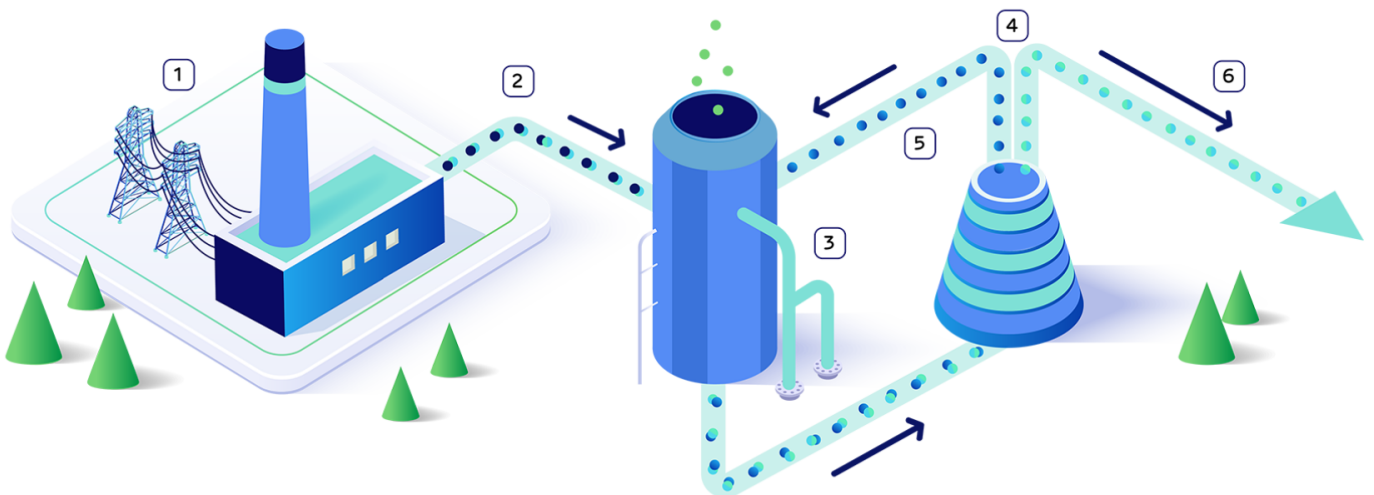
## 6.3 Savukaasuista

Polton jälkeinen (post-combustion) talteenotto tapahtuu prosessin savukaasuista. Savukaasut johdetaan erotuslaitteistoon, jossa hiilidioksidi erotetaan kohteen mukaisella menetelmällä. Yleisimmin käytetty erotusmenetelmä on kemiallinen absorptio, jossa savukaasut johdetaan kontaktiin hiilidioksidia liuottavan aineen kanssa. Hiilidioksidi erotetaan liuosaineesta ja kompressoidaan. (Kousa 2009, 8.) Menetelmän haasteena on savukaasujen matalat hiilidioksidipitoisuudet.

### 6.3.1 Drax BECCS

Kuviossa 3 on havainnollistettu savukaasun kierto talteenottolaitoksessa. Kuviossa on yksinkertaistettuna Draxin voimalaitoksen BECCS-prosessi.

1. Savukaasut siirtyvät eteenpäin energiantuotantoprosessista
2. Savukaasuja käsitellään ja ne jäädytetään ennen absorptiokolonniin päätymistä
3. Absorptiokolonnissa hiilidioksidi erotetaan savukaasusta kemiallisen reaktion avulla liuotteeseen, köyhdytetty kaasu vapautetaan ilmakehään
4. Saatu liuos lämmitetään ja hiilidioksidi erkanee liuotteesta
5. Liuote kierrätetään takaisin talteenottojärjestelmään
6. Puhdas hiilidioksidivirta siirretään putkistoa pitkin varastoon merenpohjaan



Kuvio 3. Drax BECCS (BECCS and negative emissions n.d.)

Draxin voimalaitos on entinen hiili- ja nykyinen biomassavoimala Yhdistyneen kuningaskunnan Pohjois-Yorkshiressa. Lyhenne BECCS tulee termistä ”BioEnergy Carbon Capture and Storage”. Draxin pilottihanke käynnistyi lokakuussa 2018, ja se otti talteen ensimmäiset hiilidioksidinsa C-Capture-menetelmällä vuoden 2019 alussa. Toinen Draxin pilottihankkeista toimii Mitsubishi Heavy Industriesin (MHI) tekniikalla. Voimalaitokselta talteenotettu hiilidioksidi johdetaan putkistolla loppusijoituspaikkaansa eteläisen Pohjanmeren alle. (BECCS and negative emissions n.d.) Draxin ensimmäinen C-Capturella toimiva pilottihanke pystyy ottamaan hiilidioksidia talteen jopa tonnin vuorokaudessa. Mitsubishi Heavy Industriesin pilotin kapasiteetiksi on ilmoitettu noin 300 kg hiilidioksidia vuorokaudessa. Drax suunnittelee myös kaupallisen mittakaavan talteenottojärjestelmää, kapasiteetiltaan 17 miljoonaa tonnia vuodessa. (Drax BECCS n.d.)

### 6.3.2 Petra Nova

Vuodesta 1977 Texasin Thompsonsissa toimineeseen WA Parish Generating Station -voimalaan rakennettiin hiilidioksidin talteenottolaitos Petra Nova. Miljardiprojekti käynnistyi vuonna 2017, mutta ei ehtinyt olla toiminnassa kuin kolme vuotta COVID-19-pandemian heiluttaessa maailmantaloutta ja öljyn hintaa. Voimalaitoksella poltetaan sekä hiiltä, että maakaasua. Petra Nova talteenotti hiilivoimalan 240 megawatin savukaasuvirran hiilidioksidista 92,4 prosenttia, kapasiteetin ylitäessä 1,7 miljoonaa tonnia vuodessa. Talteen otetusta hiilidioksidista saatiin erotettua puhtaaksi kaasuksi yli 99 %. Erotettu hiilidioksidi johdettiin noin 130 km pituisella putkella tehostettuun öljyntuotantoon The West Ranch Oil Fieldille (The West Ranch CO<sub>2</sub>-EOR Project). Petra Novaa ei ole kuopattu, vaan se odottaa vakaampia aikoja käynnistyäkseen uudestaan. On mielenkiintoista seurata, miten öljyn hinnan tämänhetkinen nousu vaikuttaa niin Petra Novaan kuin muihin CCS-projekteihin. (Carbon capture and the future of coal power n.d.; Petra Nova - W.A. Parish Project n.d.; The West Ranch CO<sub>2</sub>-EOR Project n.d.)

## 7 Hiili-imurit

DAC-tyypin laitos on CCS-laitos, joka vangitsee hiilidioksidia suoraan ilmakehästä. Lyhenne DAC tulee sanoista Direct Air Capture. Talteenottoon on erilaisia vaihtoehtoja, niistä käytetyin on amiiniprosessi. Muiden kemikaalien kuten ammoniakkin, erilaisten ionisten nesteiden, karbonaattien ja

aminohapposuolaliuosten lisäksi voidaan hiilidioksidia ottaa talteen myös esimerkiksi vesiabsorptiolla. Talteenottoaste on veden avulla pienempi, mutta niin ovat myös kustannukset sekä ympäristöhaitat. (Korppi 2019.)

Hiili-imurit ovat yksi avain negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin. Niissä kiehtoo myös kokoluokkien helppo skaalautuvuus, sillä ne koostuvat usein paneeleista joita voidaan lisätä kohteen mukaisesti. Pienen kokoluokan siirrettävästä talteenottolaitteistosta löytyy mielenkiintoinen prosessitekniikan opinnäytetyö. Sami Korppi (2019) käsittelee hiilidioksidin talteenottoa fysikaalisella vesiabsorptiolla, CarbonReUse Finlandin pilottilaitteiston toimiessa pohjana työlle. (Korppi 2019.)

Alan konkareita sekä lupaavimpia tulokkaita ovat työn kirjoitushetkellä Climeworks, Carbon Engineering, Global Thermostat, InfiniTree, Prometheus Fuels, Soletair, Terrafixing, Heirloom Carbon, Carbon Infinity, Mission Zero, Sustaera, Noya, Verdox, Carbyon ja Carbon collect. Suomalainen Soletair (Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT) ja Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston (LUT) pilotti) kehittää muun muassa teknologiaa metaanin tuotantoon rakennusten ilmanpoistojärjestelmien sisältämästä hiilidioksidista, kun esimerkiksi InfiniTree:n teknologia perustuu ilmankosteuden avulla ulkoilmasta kasvihuoneeseen siirtyvään hiilidioksidiin. (Products n.d.; Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda 2019, 189.)

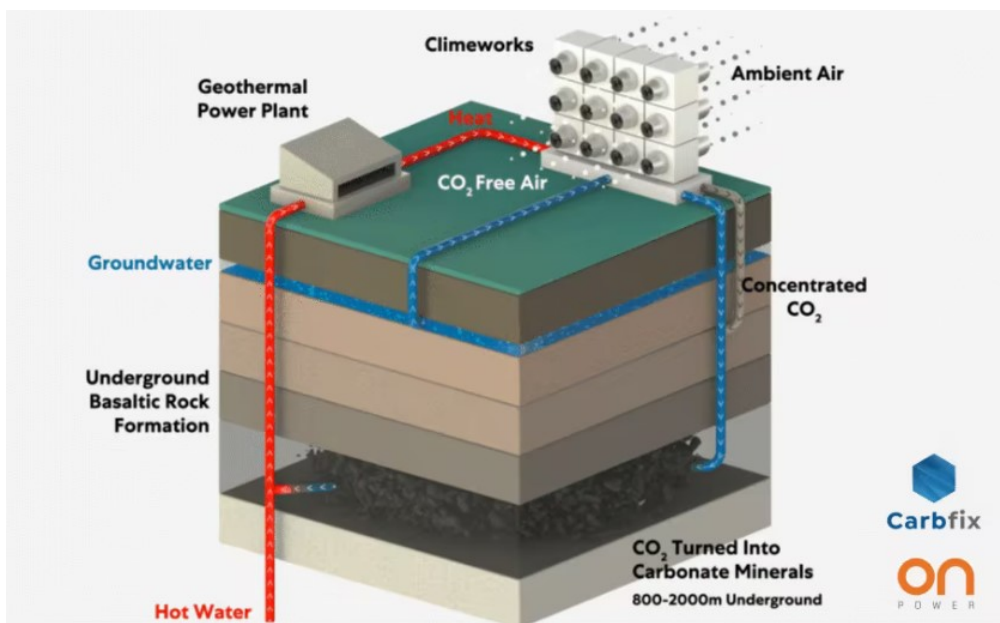
Company	System Type	Technology	Regeneration	Purity/Application Scale	
Carbon Engineering	Liquid solvent	Potassium hydroxide solution/calcium carbonation	Temperature	99%	Pilot 1 t/d
Climeworks	Solid sorbent	Amine-functionalized filter	Temperature or vacuum	99% w/dilution depending on application	Demonstration 900 t/y
Global Thermostat	Solid sorbent	Amine-modified monolith	Temperature and/or vacuum	99%	1,000 t/y
InfiniTree	Solid sorbent	Ion-exchange sorbent	Humidity	3-5% algae	Laboratory
Skytree	Solid sorbent	Porous plastic beads functionalized with benzylamines (Alesi and Kitchin, 2012)	Temperature	Air purification, greenhouses	Appliance

Kuvio 4. Kaupallisia Direct Air Capture -toimijoita vuonna 2019 (Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda 2019, 189.)

## 7.1 Climeworks

Islantiin, Hellisheiðin geotermisen voimalaitoksen kupeeseen rakennettu Arctic Fox on DAC-tyyppinen CCS-pilottilaitos. Lokakuusta 2017 toiminut pilotti on islantilaisen Carbfixin ja sveitsiläisen Climeworksin rakentama. Arctic Fox on osa EU:n rahoittamaa CarbFix2-projektia. Pilotin menestyksen ansiosta lähdettiin kehittämään suuren mittakaavan projektia, Orcaa, jonka toiminta käynnistettiin syksyllä 2021. Sen kapasiteetiksi on kerrottu 4 000 tonnia hiilidioksidia vuodessa. (Direct Air Capture [2] n.d.; Arctic Fox n.d.)

Climeworksin kehittämä keräinlaitteisto tuottaa puhdasta hiilidioksidia Carbfixille, joka sekoittaa sen veteen ja pumppaa maaperään. Ilma imetään tuuletinten avulla keräimiin, joissa hiilidioksidi kiinnittyy suodattimen pintamateriaaliin. Suodattimen materiaali on liikesalaisuus, eli käytettyjä kemikaaliyhdistelmiä ei ole julkisessa tiedossa. Kun suodatin on täynnä hiilidioksidia, keräin sulkeutuu ja sen lämpötila nostetaan geotermisen energian avulla 80 ja 100 celsiusasteen välille. Keräimen lämmentyessä, hiilidioksidi vapautuu suodattimesta ja se kerätään, sekoitetaan veteen ja loppuvarastoidaan maaperän vulkaanisiin basalttimuodostumiin. Luonnollisen mineralisaation vaikutuksesta hiilidioksidiliemi reagoi basaltin kanssa ja mineralisoituu kiinteäksi muutaman vuoden sisällä. Prosessi on havainnollistettuna kuviossa 5, varastoinnista lisää myöhemmin. (Direct Air Capture [2] n.d.; Arctic Fox n.d.)

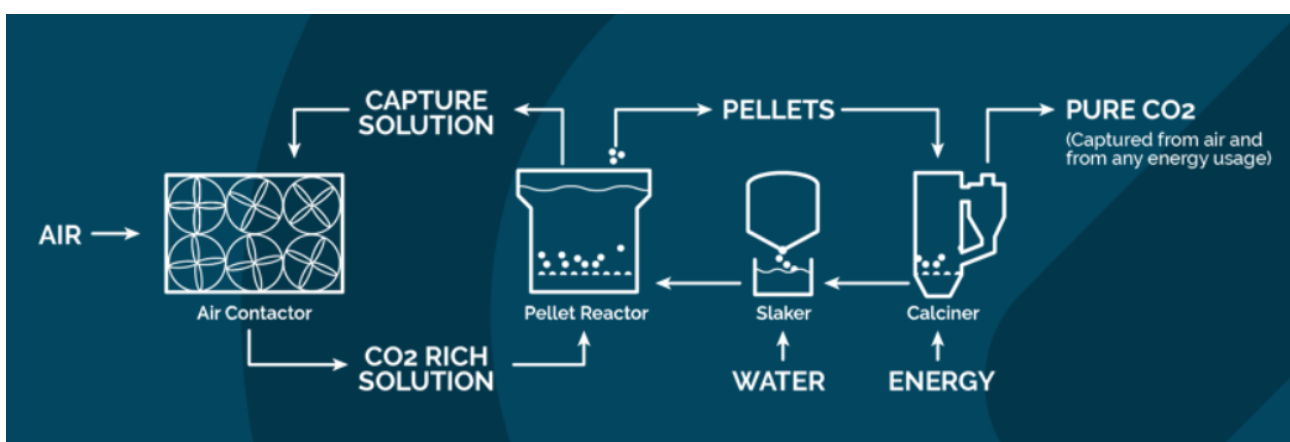


Kuvio 5. Climeworksin ja Carbfixin yhteisprosessi (Arctic Fox n.d.)

Climeworksin Capricorn käynnistyi toukokuussa 2017 Sveitsin Hinwilissä. Se on ensimmäinen kaupallinen DAC-laitos. Moduulit on mitoitettu massatuotannon tarpeisiin; kuusi keräintä mahtuu standardikokoiseen merikonttiin. Capricorn käsittää 18 keräintä, joiden kapasiteetti on useampi sata tonnia hiilidioksidia vuodessa. Capricorn saa tarvitsemansa energian jätteenpolttolaitokselta, jonka katolle se on rakennettu. Kerättyä hiilidioksidia ei tällä laitoksella loppusijoiteta, vaan se siirretään läheisen kasvihuoneen käyttöön. Hiilidioksidia käytetään kasvihuoneella lannoitteena tehostamaan kasvua ja yhteyttämistä. Capricornin keräämä hiilidioksidi on saanut myös sertifikaatin, jolla sitä voidaan laatunsa puolesta käyttää juomateollisuuden tarpeisiin. (Capricorn n.d.)

## 7.2 Carbon Engineering

Vuonna 2024 Yhdysvaltojen Permian Basin -muodostumaan käynnistyväksi suunniteltu DAC 1 -laitos tulee olemaan maailman suurin laatuaan. Laitoksen kapasiteetiksi on ilmoitettu miljoona tonnia vuodessa. Suurelta jäähdytysyksiköltä näyttävä ilmakonttorijärjestelmä vetää ilmaa prosessiin, jossa se päätyy kosketuksiin kaliumhydroksidiliuoksen kanssa. Liuos virtaa ohuitten muovilevyjen päällä, joiden yli ilma johtuu ja siinä oleva hiilidioksidi jää liuokseen vangiksi karbonaattisuolana. Liuos kulkee erilaisten kemiallisten prosessien läpi, tiivistyen ja puhdistuen. Karbonaattisuola erotetaan liuoksesta pieniksi pelleteiksi, jotka kuumennetaan pasutus- eli kalsinointiuunissa. Uunissa erottuu puhdas hiilidioksidikaasu sekä prosessoituja pellettejä, jotka kierrätetään takaisin prosessiin sammutuksen jälkeen. Puhdas hiilidioksidivirta johdetaan maaperään loppusijoitukseen. Prosessi on havainnollistettuna kuviossa 6. (DAC 1 n.d.; Our Technology n.d.)



Kuvio 6. Carbon Engineeringin hiilidioksidin talteenotto prosessi (Our Technology n.d.)

Laitoksen teknologian on kehittänyt Kanadalainen Carbon Engineering. CE:n ensimmäinen DAC-pilottilaitos Kanadan Squamishissa käynnistyi vuonna 2015, ja ensimmäinen erä synteettistä polttoainetta AIR TO FUELS™ -tekniikalla saatiin 2017. AIR TO FUELS™ hyödyntää DAC-prosessista saatua hiilidioksidia polttoaineen tuotannossa. Uusiutuvan energian voimalla elektrolysoidaan vettä hapeksi ja vedyksi, jonka jälkeen vedystä ja hiilidioksidista muodostetaan polttoainetuotantoon tarvittavia hiilivetyjä. Carbon Engineeringin DAC-teknologiaa rahoittaa, kaupallistaa ja tuo teollisuusmittakaavaan 1PointFive, jonka muodostaa Oxy Low Carbon Ventures (Occidental Petroleum Corporation) sekä Rusheen Capital Management. (AIR TO FUELS™ n.d.; DAC 1 Launch Release n.d.; Our Story n.d.)

## 8 Bio-CCS

Lyhenne BECCS tuli Draxin kohdalla esiin, mutta yleisesti biomassan käytöstä talteen otetusta hiilidioksidista puhutaan termillä bio-CCS. Suomessa biomassan käyttäminen polttoaineena ja erilaisissa teollisuuden prosesseissa on mittavaa, siksi kyseinen hiilidioksidin talteenoton osa-alue on mielenkiintoinen kansallisella tasolla. Kestävästi tuotetun biomassan käyttäminen energiantuotantoon luo itsessään hiilikierron ja jos prosessista vapautuvaa hiilidioksidia poistetaan kyseisestä kierrosta, saadaan elinkaarinäkökulmasta nettonegatiivia päästöjä. (Lund n.d.) Tähän perustuen biomassan poltosta vapautuvaa hiilidioksidia ei huomioida lainkaan päästökaupassa, joka aiheuttaa tietynlaista tulkinnanvaraisuutta. Vaikka kestävän metsänhoidon avulla hiilikierto pysyisikin netoltaan suljettuna, se ei poista sitä tosiasiaa, että hiilidioksidia vapautuu suoraan ilmakehään. Jos fossiilisia polttoaineita korvataan biomassalla enenevässä määrin, tulee myös hakkuiden osalta raja vastaan. Biodiversiteetti ja pelkkä puupelto eivät tue toisiaan. Bio-CCS voisi myös parantaa energiarikkaan turpeen asemaa, mutta turvelaitosten pieni kokoluokka ja sijainti sisämaassa kaukana hiilidioksidin mahdollisista varastointipaikoista ei tee siitä kannattavaa (Teir, Arasto, Tsupari, Koljonen, Kärki, Kujanpää, Lehtilä, Nieminen & Aatos 2011a, 19).

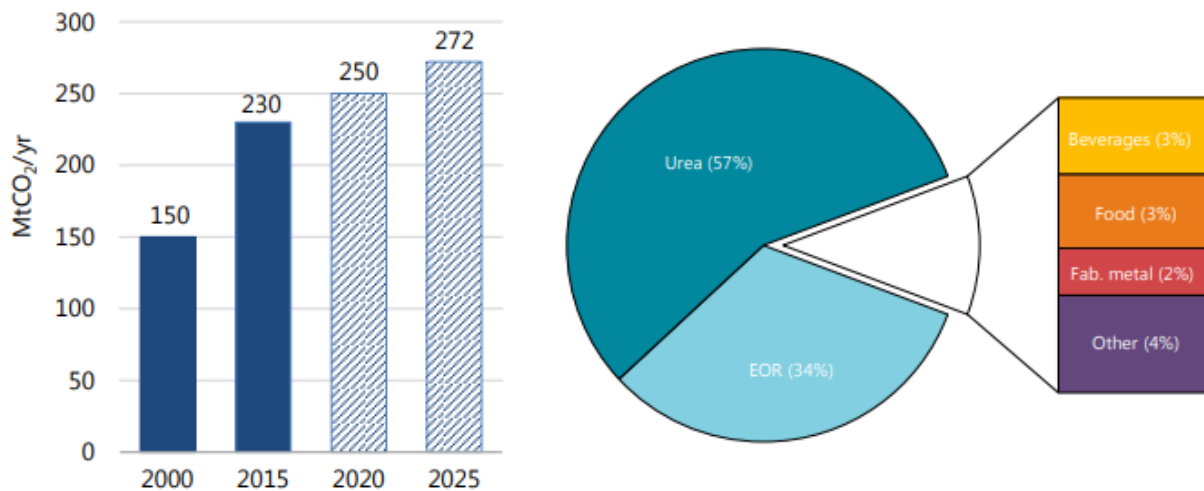
Voimalaitosten kohdalla talteenotto on huomattavasti yksinkertaisempaa, kuin erilaisten prosessiteollisuuslaitosten. Prosessin ollessa pitkä, on teollisuuslaitoksissa usein pienempiä ja ominaisuuksiltaan erilaisia päästökohteita eri prosessin vaiheissa. Näiden hajanaisten päästölähteiden lisäksi esimerkiksi paperin ja sellun tuotantolaitosten päästämät savukaasuvirratt ovat epäpuhtaita ja talteenotto on haastavaa. Erilaiset voimakkaat kemikaalit häiritsevät talteenottoa, vaikka hiilidioksidin määrä on merkittävä. (Teir ym. 2011a, 39.)

Biopolttoaineiden kirjo laajenee ja kehittyy vuosi vuodelta, ja niiden raaka-aineet monipuolistuvat. Ruoantuotannon ja metsäteollisuuden sivuvirrat sekä esimerkiksi levät luovat jatkuvan biomassatarjonnan, jota hyödynnetään biopohjaisessa energiantuotannossa joko suoraan tai jalostettuna. Bio-CCS ja sen moninaiset teknologiat voitaisiin nostaa merkittäväksi vahvuudeksi ja lopulta vientituotteiksi erilaisilla ympäristöpoliittisilla kannustimilla.

Bio-CCS on usein fossiilisista polttoaineista talteenottoa kalliimpaa ja tehottomampaa. Vuodelta 2018 löytyy kaksi julkaisua, joissa kustannuksia ja niiden rakentumista avataan enemmän: An assessment of CCS costs, barriers and potential sekä Negative emissions — Part 2: Costs, potentials and side effects. (Budinis, Krevor, Dowell, Brandon & Hawkes 2018; Fuss, Lamb, Callaghan, Hilaire, Creutzig, Amann, Beringer, Garcia, Hartmann, Khanna, Luderer, Nemet, Rogelj, Smith, Vicente, Wilcox, Dominguez & Minx 2018.)

## 9 Hiilidioksidin hyötykäyttö

CCU eli Carbon Capture and Utilization, hiilidioksidin talteenotto ja jatkokäyttö, luo hiilidioksidikierron, jossa ilmakehään päätyvän hiilen määrä ei lisäännä prosessin osalta. Käyttökohteita on lukuisia erilaisia ja niiden laatu määrittää sen, voidaanko puhua hiilivarastoista. Kansainvälisen energijärjestön vuoden 2019 raportin mukaan hiilidioksidia käytettiin noin 230 miljoonaa tonnia vuosittain, mutta määrä on varmasti tästä muuttunut. Lannoiteteollisuus oli suurin hiilidioksidin käyttäjä noin 130 miljoonan tonnin vuositahdilla, tehostetun öljyntuotannon käyttäessä 70–80 miljoonaa tonnia. Kuviossa 7 on vasemmalla hiilidioksidin käytön virtojen kasvu sekä ennusteet, oikealla vuoden 2015 käytön jakauma. (Putting CO<sub>2</sub> to Use 2019, 20–21.) Suomen teollisuuden käyttämien hiilidioksidivirtojen kokoluokasta ei löytynyt ajantasaista tietoa, eikä edes selkeää vanhentunutta dataa. Teknologian tutkimuskeskus VTT vastasi kysymykseen arviolla 200 000 tonnia vuodessa.



Kuvio 7. Hiilidioksidin teollisuuskäytön kasvu sekä sen kohteet (Putting CO<sub>2</sub> to Use 2019, 21).

Hiilidioksidia voidaan käyttää sellaisenaan, tai jalostaa erilaisiin teollisuuden tarpeisiin. Vaikka puhutaan puhtaasta hiilidioksidista, on esimerkiksi elintarvike- ja lääketeollisuuteen soveltuva kaasu eri asia kuin yleisimmin käytetty teollinen laatu. Kuljetus ja varastointi tapahtuu usein paineistettuna nesteinä, yhdestä litrasta nestemäistä hiilidioksidia saadaan noin 440 litraa hiilidioksidikaasua. Nestemäisestä hiilidioksidista voidaan myös valmistaa -78,5 °C -asteista kuivajäätä eli hiilihapojäätä. Hiilidioksidi kiinteytetään lumeksi ja sen jälkeen puristetaan jääksi, esimerkiksi pieniksi rakeiksi tai isommiksi paloiksi. (Hiilidioksidi CO<sub>2</sub> n.d.)

Hiilidioksidin hyötykäytön kannattavuus vaatii lakimuutoksia. Esimerkkinä LUT-yliopiston ja VTT:n Soletair-pilottiprojektin toimivaksi toteama prosessi ja sen jatkojalostus kaupalliseen, suuremman skaalan toimintaan. Valmis, vuodesta 2017 tutkittu tekniikka voisi talteenottaa Finnsementin päästämää hiilidioksidia ja Kemiran tehtaan ylijäämävedyä. Vedystä ja hiilidioksidista saataisiin synteettistä metanolia, josta jalostettaisiin edelleen bensaa, dieseliä ja lentokerosiinia. Lainsäädännöt niin Suomessa kuin EU:ssa eivät kuitenkaan tunnista ylijäämävedystä valmistettavaa polttoainetta uusiutuvaksi. (Synteettisten polttoaineiden P2X-tuotantolaitos Joutsenossa olisi harppaus kohti päästötöntä liikennettä 2021.)

## 9.1 Puhtaan hiilidioksidin käyttö

Ruokateollisuudessa hiilidioksidilla on useita eri käyttökohteita. Sitä käytetään suojakaasuna elintarvikkeiden pakkauksissa, joissa se parantaa ja pidentää säilyvyyttä sekä ehkäisee bakteereitten kasvua. Hiilidioksidilla myös täytetään tietyt elintarvikepakkaukset kuten perunalastupussit pulleiksi, tämä estää herkkien elintarvikkeiden murskaantumisen kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Ilmassa oleva kosteus voisi myös pilata lastujen koostumuksen. Kahvipavuista voidaan poistaa kofeiini hiilidioksidin avulla. Nestemäisestä hiilidioksidista voidaan valmistaa hiilihappojäätä, jota käytetään kylmäaineena esimerkiksi lihateollisuudessa. Lihateollisuudessa hiilidioksidia käytetään useampaan tarkoitukseen, sillä myös tainnutetaan esimerkiksi sikoja ennen teurastusta.

Juomateollisuudessa hiilidioksidia liuotetaan nesteeseen ja saadaan aikaan hiilihappoa, jota käytetään erilaisissa virvoitusjuomissa. (Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin 2020.) Muun muassa aiemmin mainittu Climeworksin Capricorn on saanut juomateollisuuden vaatimukset täyttävän sertifikaatin tuottamalleen hiilidioksidille (Heilers 2019).

Tällä hetkellä Capricornin tuottama puhdas hiilidioksidi johdetaan kasvihuonelannoitteeksi. Tuotannon lisääminen esimerkiksi kasvihuoneissa ja leväteollisuudessa on mahdollista hiilidioksidilla. Kasvit menestyisivät paremmin jos ilmakehän hiilidioksidipitoisuus olisi korkeampi, tämä on helppo toteuttaa kasvihuoneympäristössä. Kasvu voi nopeutua jopa 40 % ja satokausi pitenee. Myös kasvien oma vastustuskyky kasvaa ja tautien ja tuholaisten määrä vähenee. Hiilidioksidi on luonnollisin tehoste kasvihuoneisiin sen kiihdyttäessä kasvien omaa fotosynteesiä. (Hiilidioksidi CO<sub>2</sub> n.d.) Esimerkiksi Alankomaissa vuosittainen käyttö ylittää 6 miljoonaa tonnia (Putting CO<sub>2</sub> to Use 2019, 13).

Lääketeollisuus käyttää kuivajäätä kudosten pakastamiseen. Myös tähytysleikkauksissa käytetään hiilidioksidia, sillä täytetään tähytettävä ontelo ja mahdollistetaan näkyvyys sekä toimintatila operoinnille. (Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin 2020.)

Hiilidioksidisammuttimilla saadaan nopeasti tukahdutettua niin sähköpalot kuin palavat nesteet. Bensiini, öljy- sekä rasvapaloja ei voi sammuttaa vedellä, mutta hiilidioksidi syrjäyttää palamiseen vaaditun hapen. (Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin 2020.)

Teollisuudessa ja prosessiteollisuudessa hiilidioksidilla on lukuisia käyttökohteita, sen eri muodoissa. Kuivajääpuhallus on vedetön ja kemikaaliton vaihtoehto hiekkapuhallukselle sekä soodapuhallukselle. Sillä voidaan puhdistaa sähkölaitteita ja muita kuivana pidettäviä kohteita. Kuivajääpellettejä puhalletaan paineilmalla puhdistettavalle pinnalle, lika irtoaa lämpöshokin vaikutuksesta ja kuivajää sublimoituu ilmaan. Se samalla myös desinfioi alueen. (Kuivajääpuhallus n.d.) Kuivajään aiheuttamaa lämpötilamuutosta hyödynnetään myös teollisuuden sovitteissa (Kuivajää n.d.). Hiilidioksidia käytetään hitsauskaasuna MAG-hitsauksessa lyhytkaarella (Hiilidioksidi CO<sub>2</sub> n.d.). Vedenkäsittelyssä hiilidioksidia käytetään moneen eri tarkoitukseen, niin prosessi- ja jätevesien kuin juomaveden neutralisointiin. Sillä myös säädellään kalsiumkarbonaattitasapainoa ja lisäksi veden pH-tasoa esimerkiksi uimahalleissa sekä jätevesissä. (Vedenkäsittely n.d.) Ylikriittisessä sähköntuotannossa voidaan käyttää veden/vesihöyryn sijasta ylikriittistä hiilidioksidia, pienetkin lämpötilamuutokset vaikuttavat sen tiheyteen radikaalisti. Turbiinit ovat pienempiä ja tehokkaampia perinteisiin verrattuna. (Supercritical Carbon Dioxide Power Systems n.d.) Hiilidioksidi toimii inertointikaasuna, eli inertoitavan yhdisteen tai tuotteen kanssa reagoimattomana aineena joka muuntaa aineen epäreaktiiviseksi, syttymättömäksi ja turvalliseksi. Esimerkiksi happea sisältävän ilman syrjäyttäminen hiilidioksidilla estää palamisreaktion. Paperi- ja selluteollisuudessa voidaan tehostaa eri prosessin vaiheita ja reaktioita, parantaa massan suotautumista, tehostaa vedenpoistoa, säädellä pH:ta, käsitellä jätevesiä sekä korvata muun muassa rikkihappoa hiilidioksidilla (Linnanen 2018). Tehostettu öljyntuotanto sekä maakaasukentät ovat merkittävimpiä käyttökohteita. Öljykenttään pumpattu hiilidioksidi nostaa kentän painetta, pienentää öljyn viskositeettia ja parantaa sen pumpattavuutta. Hiilidioksidi on loistava lämmönsiirtoaine, jota käytetään erilaisissa lämpöpumpuissa sekä esimerkiksi kaukojäähdytysverkostoissa.

## 9.2 Jalostetun hiilidioksidin käyttö

Hiilidioksidista ja ammoniakista tuotettu urea eli karbamidi on lannoitteiden raaka-aine, ja globaalisti suurin hiilidioksidin käyttökohde. Hiilidioksidia vapautuu ammoniakin tuotannossa, joten se pystytään käyttämään hyödyksi heti alkulähteellä.

Kaasukattiloissa ja -moottoreissa käytettävästä biokaasusta on yksi kolmasosa hiilidioksidia ja loput metaania (Biokaasun tuotanto maatilalla 2013). Sitä voidaan biometanoida hiilidioksidista ja vedystä joko biologisesti tai epäorgaanisesti. Biologinen metanointi tapahtuu matalassa lämpötilassa ja paineessa, epäorgaaninen vaatii korkeamman lämpötilan ja paineen sekä nikkelikatalyytin.

(Biometanointi n.d.) Synteettistä metanolia valmistetaan vedestä ja hiilidioksidista. Vesi ja hiilidioksidi pilkotaan ja niistä saadut vety ja hiili yhdistetään kemiallisessa synteessissä. Metanolista jatkojalostetaan muun muassa erilaisia liuottimia, muoveja sekä polttoaineita kuten bensiiniä, dieseliä ja kerosiinia. Esimerkiksi sellutehtailla synteettisen metanolin tuotanto on jo nykytekniikalla järkevää kustannusten osalta, sillä prosessin vaatimat sähkö sekä vety ovat saatavilla, samoin hiilidioksidi jos se otetaan tehtaan prosessista talteen. (Laaksonen 2019)

Sementti- ja sitä myöten betoniteollisuus ovat suuria saastuttajia, hiilidioksidia vapautuu huomattavia määriä sementin valmistukseen tarvittavan kalkkikiven polttamisessa. Jos sementtiteollisuus olisi oma valtionsa, se olisi maailman kolmanneksi suurin saastuttaja. Hiilidioksidilla voidaan kuitenkin kovettaa betonia, tämä nopeuttaa prosessia ja tekee betonista kestävämpää. (Timperley 2018; Putting CO2 to Use 2019, 12.)

## 10 Puhtaan hiilidioksidin loppusijoitus

Vaikka hiilen jatkokäyttö on järkevää, ei sen määrä ilmakehässä vähene kierrättämällä. Edellisessä luvussa mainitut hiilivarastot voivat olla pitkäaikaisia ratkaisuja esimerkiksi rakennusteollisuuden osalta, tässä luvussa keskitytään kuitenkin puhtaan hiilidioksidivirran lopulliseen varastointiin sitä hyödyntämättä.

Loppusijoitusvaihtoehtoja on useita ja niitä tutkitaan koko ajan lisää. Hiilidioksidin varastoiminen meriin on nykyään kielletty Euroopassa tutkimustulosten valossa. Merien pohjakerrostumiin sijoitus riippuu paljon pohjavirtauksista ja muista kohteen ominaisuuksista, uhkana on happamoituminen ja vaikutus merieliöstöön. Silikaattimineraaleilla kiinteiksi karbonaateiksi sitominen on havaittu kannattamattomaksi suuren energiankulutuksen takia. Maanalaiset hiiliesiintymät ovat yksi vaihtoehto loppusijoituspaikaksi, mutta hiilidioksidi aiheuttaa esiintymien paisumista ja vapauttaa metaania. (Teir, Pikkarainen, Kujanpää, Tsupari, Kärki, Arasto, & Aatos 2011b, 41–43.)


Geologinen varastointi on pitkään tutkittu ja käytetty ratkaisu, yli 200 miljoonaa tonnia hiilidioksidia on tälläkin hetkellä varastoituna ympäri maapalloa. Hiilidioksidi tulee varastoida pysyvästi ilmakehästä eristettynä, esimerkiksi vanhoihin öljy- ja kaasukenttiin, kannattamattomiin kivihiihiintymiin tai kriteerit täyttäviin luonnonmuodostumiin. Tällaisia suuren skaalan

varastointimahdollisuuksia ei Suomesta löydy, eli hiilidioksidi on käytettävä tai sidottava muilla tavoilla tai kuljetettava rajojen yli soveltuvaan loppusijoituspaikkaan. Tämä lisää kuluja ja logistisia päästöjä. Suomessa on myös laissa kielletty hiilidioksidin geologinen varastointi, sen tutkimus- ja kehittämistoiminta on kuitenkin mahdollistettu (L 416/2012, 3 §). Esimerkiksi pohjavesiesiintymien suojaaminen on tärkeää. Tekniikka on hioutunut vuosikymmenten saatossa niin geotermisen energian tuotannon kuin öljy- ja kaasuteollisuuden tarpeissa, luoden perustan varastoinnin valvontaan niin määrän kuin laadun osalta. Kenttien geologinen tuntemus ja kerätty data luo varastoinnille hyvät lähtökohdat. Lisäksi hiilidioksidin pumppaaminen syvälle aktiivisiin öljy- tai kaasukenttiin on kustannustehokasta ja helpottaa kenttien tuotantoprosessia, vähentäen tuotteen maan pinnalle nostamiseen vaadittavaa energiaa. Suuria tehostetun öljyntuotannon projekteja on useampi, mutta niitä ei tarvitse monitoroida yhtä tarkasti ja pitkään kun kyse ei ole varsinaisesta CCS-projektista. Hiilidioksidivuotoja tapahtuu kuitenkin vain häiriötilanteissa, eli voidaan puhua vakaasta ja lopullisesta sijoituksesta kunhan taustatyö on suoritettu huolellisesti. (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.; Direct Air Capture + Storage n.d.; Teir ym. 2011b, 41-44, 76.)

Hiiltä on maaperän eri kerroksissa erilaisina karbonaateina ja muina kiinteinä yhdisteinä. Geologinen varastointi perustuukin hiilidioksidin mineralisoitumiseen. Hiili varastoidaan yleensä 800–2500 metrin syvyyteen geologisiin muodostumiin, sedimentti- sekä suolavesikerrostumiin. Muodostumien raot, halkeamat ja onkalot sekä mineraali- tai kiviainesrakeiden huokostila ovat täyttyneet vedellä tai muulla nesteellä. Ruiskutettava hiilidioksidi on ylikriittistä, eli sen paine on yli 80 baaria. Ylikriittinen hiilidioksidi käyttäytyy kuin höyry, vaikka sen tiheys on yhtä korkea kuin nesteellä ja se pääsee tunkeutumaan kaikista pienimpiinkin rakoihin ja huokosiin. Hiilidioksidin varastointiin soveltuvan kiviaineksen tulee siis olla tarpeeksi huokoista sekä läpäisevää (esimerkiksi hiekkakiveä), mutta sen yläpuolella tulee olla läpäisemätön kivi- tai kalliokerros kuten liuskekivimuodostuma. Tämä estää syvyyksiin pumputun hiilen nousemisen takaisin kohti maan pintaa. Ruiskutettu hiilidioksidi voi syrjäyttää kerrostuman nestevaraston nesteen tai sekoittua siihen. Maan kerroksissa virtaa luontaisesti suolaliuosta, jonka sekaan hiilidioksidi voidaan ruiskuttaa. Suolaliuos estää hiilen vapautumisen ylöspäin sen suuremman tiheyden ansiosta, liuokset yhdistyvät toisiinsa ja jäävät varastoon. Pidemmällä aikavälillä hiilidioksidi mineralisoituu karbonaateiksi. Hiilidioksidin maahan vangitsemisessa käytetään siis neljää eri mekanismia: rakenteellinen ja stratigrafinen loukku (structural & stratigraphic trapping), vesipaineen aiheuttama loukku (residual trapping), liuosloukku (solubility trapping) sekä mineralisaatio. (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.; Teir ym. 2011b, 43-45.)

Varastoitavan hiilidioksidin laadun tulee olla tarkkaan valvottua. Sallitut pitoisuudet Northern Lights-projektin osalta on esitetty kuviossa 8. Eri kohteisiin käytettävät tai eri loppusijoituskohteisiin ruiskutettavat hiilidioksidivirrat ovat kuitenkin koostumukseltaan vaihtelevia. Esimerkiksi tehostettuun öljyntuotantoon käytettävässä hiilidioksidissa voivat muun muassa typen ja hiili- sekä rikkivetyjen pitoisuudet vaihdella huomattavasti eri kenttien välillä. (Teir ym. 2011b, 30.) Paineistuksen, lämpötilan ja pitoisuuksien määrät vaihtelevat myös kuljetusmuodon mukaan. Jokainen prosessi on erilainen.

Quality specification for liquified CO<sub>2</sub>

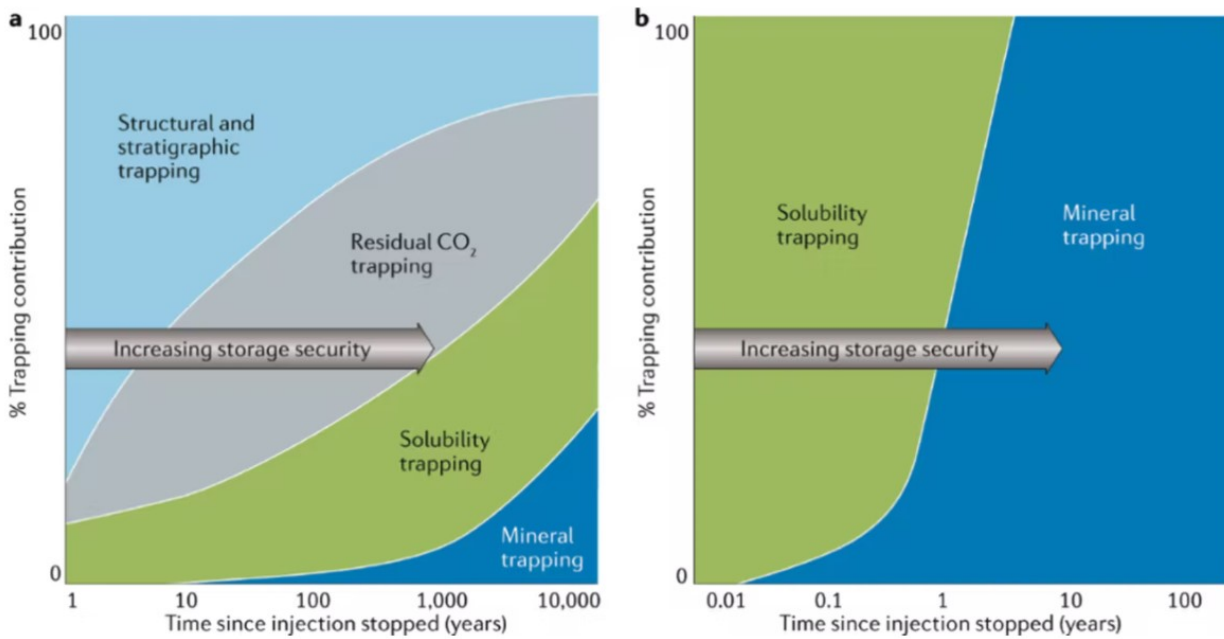



Component	Concentration, ppm (mol)
Water (H <sub>2</sub> O)	≤ 30
Oxygen (O <sub>2</sub> )	≤ 10
Sulphur oxides (SO <sub>x</sub> )	≤ 10
Nitric oxide/Nitrogen dioxide (NO <sub>x</sub> )	≤ 10
Hydrogen sulphide (H <sub>2</sub> S)	≤ 9
Carbon monoxide (CO)	≤ 100
Amine	≤ 10
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	≤ 10
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	≤ 50
Formaldehyde	≤ 20
Acetaldehyde	≤ 20
Mercury (Hg)	≤ 0.03
Cadmium (Cd), Thallium, (Tl)	Sum ≤ 0.03

Non-condensable gases are components that, when pure, will be in gaseous form at 15 barg and -26°C. The content of non-condensable gasses will be limited by the actual solubility of the liquid CO<sub>2</sub> in the interim storage tanks at the capture plants.

Kuvio 8. Northern Lights: Varastoitavan hiilidioksidin laatuvaatimukset (Quality specification for liquified CO<sub>2</sub> n.d.)

Veteen liuotettuna ja optimaalisissa olosuhteissa ruiskutettu hiilidioksidi saadaan vangittua huomattavasti nopeammin (kuvio 9, b), kuin ylikriittinen, puhdas hiilidioksidi kivikerrostumissa (a). Aikajana on suuntaa antava ja riippuu kohteen geologisista ominaisuuksista sekä injektoinnin toteutuksesta (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.)



Kuvio 9. Hiilidioksidin mineralisoituminen (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.)

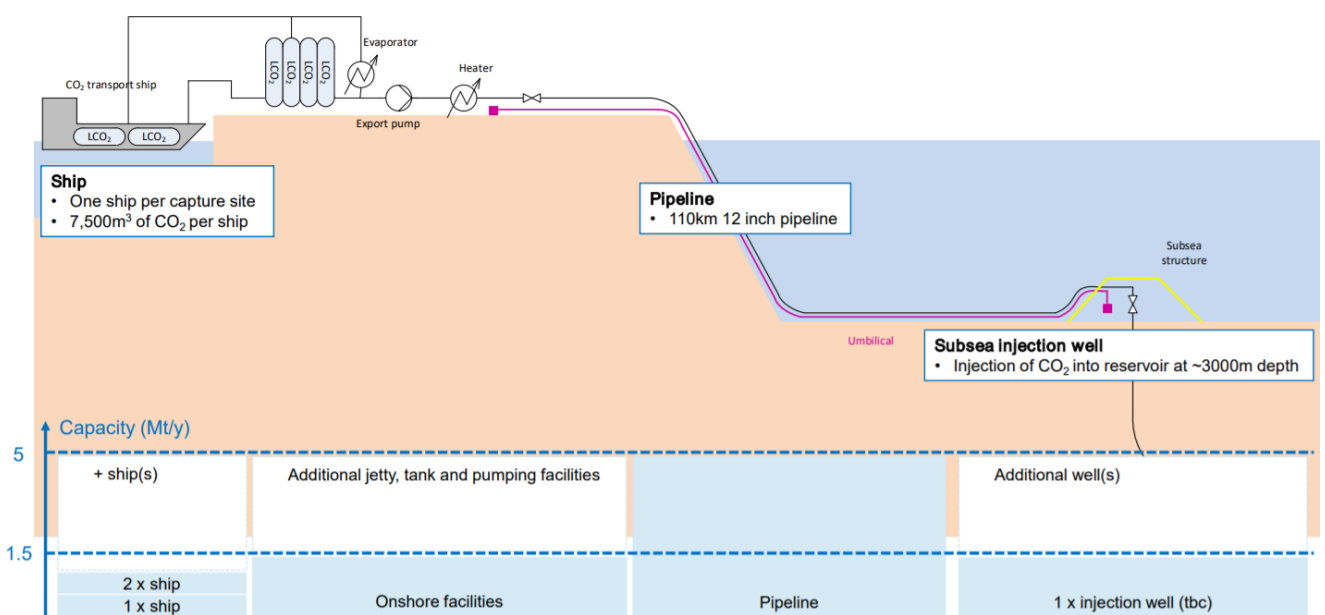
## 10.1 Carbfix

Arctix Foxin ja Orcan kohdalla käytetty Carbfixin injektointimetodi perustuu paikan päällä tapahtuvaan mineralisaatioon ja sen kiihdyttämiseen. Islannin vulkaaninen ja mafinen kiviaines on optimaalista tähän tarkoitukseen. Hiilidioksidi mineralisoituu basaltin sekaan ja muuttuu kiinteäksi, varaston vuotomahdollisuudet periaatteessa eliminoiduvat. Ruiskutusvesi sisältää hiilidioksidin pieninä kuplina, tämän ansiosta Carbfixin tekniikkaa voidaan käyttää muuallakin kuin DAC-laitoksissa (muun muassa kaasunpesutornien pesuvesien sisältämän hiilidioksidin kierrätyksessä). Kaasu liukenee veteen täysin ennen kivihuokosiin päätymistä. (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.)

Carbfixin Coda Terminal on tuleva mineraalivarastointikeskus Islannissa. Pilottivaiheen injektoinnit on suunniteltu vuodelle 2023. Vaihe 1 on arvioitu käynnistyväksi vuonna 2025 ja ensimmäisen vaiheen vuosittainen kapasiteetti on 300 000 tonnia. Kymmenen vuoden toiminta-aikana kapasiteetin on määrä kasvaa kolmeen miljoonaan tonniin. Rajojen yli laivattu hiilidioksidi tuodaan terminaaliin, jossa se sekoitetaan veteen ja pumpataan basalttiin. (Coda Terminal n.d.)

## 10.2 Northern Lights

Northern Lights on eurooppalainen, yli valtiorajojen ulottuva verkosto hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin. Se on osa Norjan hallituksen CCS-projektia, Longshipia, jonka tarkoituksena on talteenottaa ja varastoida hiilidioksidia Norcem Breivikin sementtitehtaalta sekä Fortum Oslo Varme-jätteenpolttolaitokselta. Oslon jätteenpolttolaitoksen talteenoton pilottivaihe käynnistyi vuonna 2019 (Jemtland 2019.) Northern Lights -hankkeessa on mukana Equinor (Sleipner ja Snøhvit), Shell ja Total, lisäksi Longshipissa on partnerina Gassnova. Kuviossa 12 yksinkertaistettuna kuinka neste-mäinen hiilidioksidi kuljetetaan laivoilla Norjan länsirannikolla sijaitsevaan terminaaliin, josta se pumpataan Pohjanmeren merenpohjaan varastointikompleksi Auroraan (What we do n.d.) Projektin ensimmäinen, vuonna 2024 toteutuvaksi suunniteltu vaihe on varastointikapasiteetiltaan 1,5 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa. Kapasiteettia voidaan nostaa tarpeen mukaan jopa 5 miljoonaan tonniin. (Northern Lights n.d.)

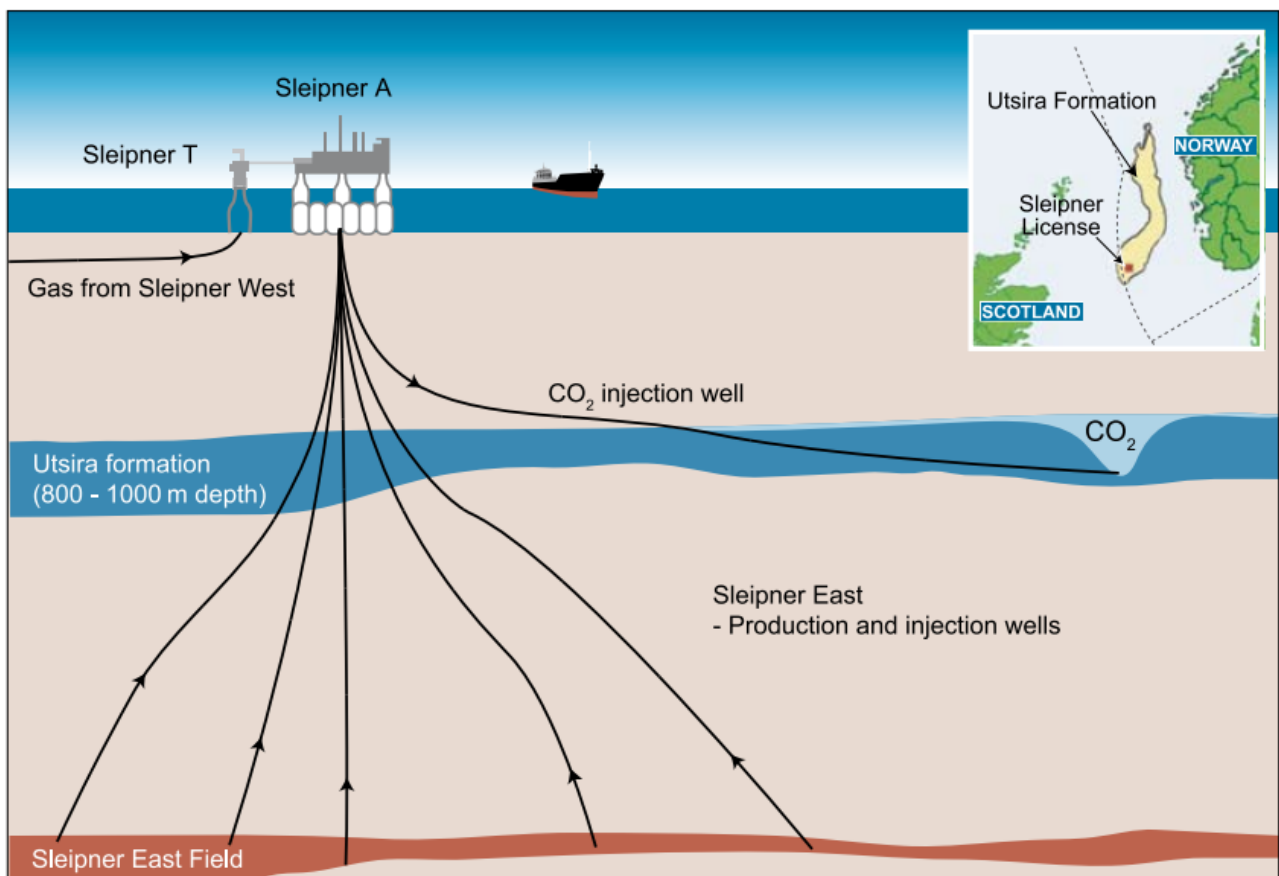


Kuvio 10. Northern Lights (Ringrose 2019, 5.)

## 10.3 Project Sleipner

Länsi-Norjalainen Project Sleipner on toiminut Pohjanmerellä vuodesta 1996. Se ruiskuttaa maa-kaasun tuotannossa erotettua hiilidioksidia miljoonan tonnin vuosivauhtia hiekkakivestä ja suolavedestä muodostuvaan muodostumaan, joka sijaitsee noin kilometrin merenpohjan alapuolella.

Porauslautan sijaitessa merellä, oli erotustekniikan suunnittelussa lisähaasteena luoda tarpeeksi kompakti laitos offshore-käyttöön. Käytössä on yksi injektiokaivo, joka ruiskuttaa hiilidioksidia noin 200 m paksuun kerrokseen (kuvio 10). Utsiran suolavesimuodostumassa hiilidioksidi levittyy laajalle alueelle, suolavesiliuoksella kyllästyneen hiekkakiven ollessa sopivan huokoista. Muodostuma on 400 km pitkä, jonka ansiosta sen varastointikapasiteetiksi on laskettu 30 gigatonnia. Sleipnerin suunnitelmissa on kuitenkin ruiskuttaa Utsiraan vain 20 megatonnia. (CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change n.d.; Teir ym. 2011b, 55, 77.)

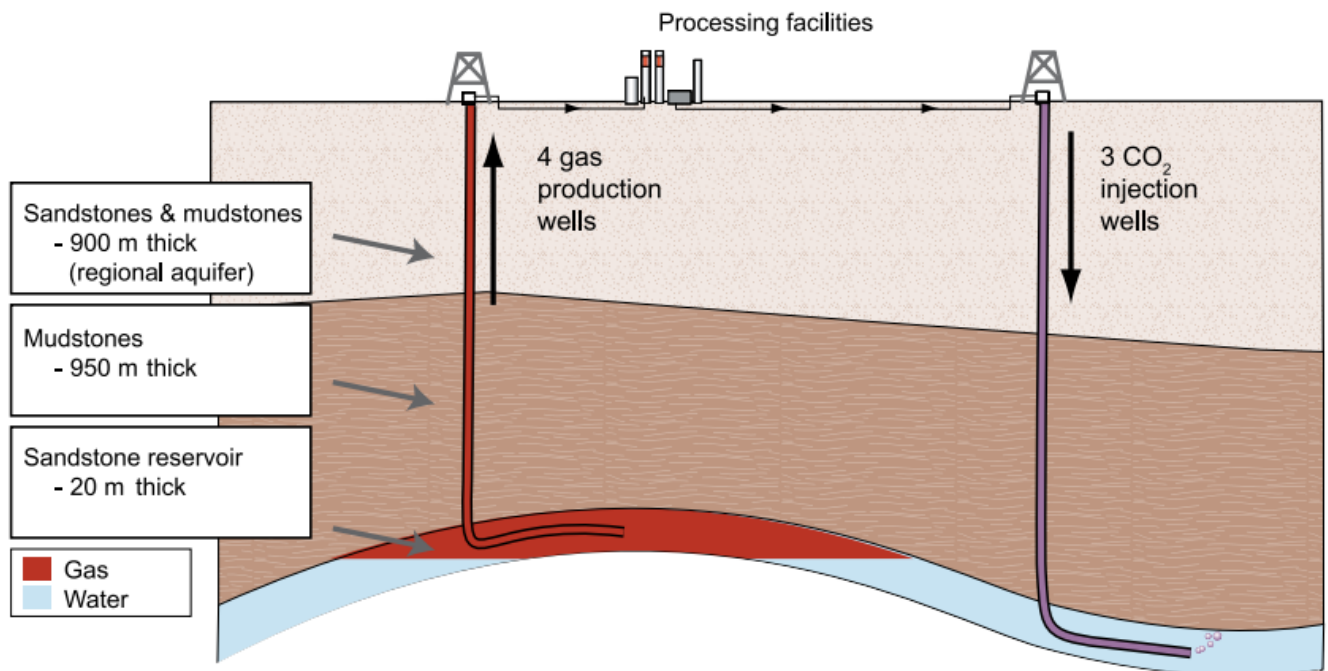


Kuvio 11. Project Sleipner (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 202.)

## 10.4 In Salah

Sleipnerin injektoidessa hiilidioksidia kaasukentän yläpuolelle, Algeriassa sijaitsevassa In Salah -projektissa hiilidioksidia ruiskutettiin varsinaiseen kaasukenttään. Kaasukenttä otettiin käyttöön vuonna 2004. Käytössä oli kolme hiilidioksidikaivoa, joilla sitä pumpattiin noin 20 m paksuun kerrokseen (kuvio 11). Vaakasuurissa putkissa oli suuttimia kilometrin välein. Projekti ei koskaan

noussut kannattavaksi ja se lopetettiin vuonna 2011, noin 4 miljoonan tonnin injektointimäärän jälkeen. Kyseessä oli suunnittelun ja valmisteluitten riittämättömyys. Hiilidioksidia pumpattiin maahan, eikä syntynyttä ylipainetta otettu huomioon esimerkiksi vettä poistamalla. Vuonna 2010 asia otettiin huomioon mutta oli jo liian myöhäistä. Paine vahingoitti kiviainesta ja mahdollisti vuoden vaaran syntymisen, myös maanpinta on kohonnut kentän alueella. (Teir ym. 2011b, 55; The struggles to make CCS work 2021.)



Kuvio 12. In Salah Project (IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage 2005, 203.)

## 11 Ympäristökeskustelu

On hyvä ymmärtää, miten ja miksi erilaisiin ratkaisuihin on päädytty ja millaista ongelmaa hiilidioksidin talteenotolla yritetään ratkaista tai helpottaa. Ilmasto- ja hiilidioksidikysymykset ja niiden luomat haasteet ovat osana suurempaa ympäristökriisiä, josta on uutisoitu pitkään ja hartaasti. Kysymyksiä tuntuu olevan enemmän kuin vastauksia, ja asiantuntijoita ja kantoja riittää kaikkia meitä koskevan aiheen äärellä.

Luonto tuottaa vain tietyn määrän luonnonvaroja ja sitoo tietyn määrän jätteitä ja päästöjä vuodessa, ihmiskunnan ekologinen jalanjälki ylitti maapallon kantokyvyn jo 1980-luvun alussa (Väisänen 2014). Pallo on kuitenkin suuri ja käytännöt, tarpeet sekä lait vaihtelevat. Resurssien, ekosysteemien, kulttuurien, elintason ja lukuisten muitten osasten vaikuttaessa on globaalinen kokonaiskuvan saaminen, saati yhden ja yhtenäisen linjan luominen epätoivoista. Ilmastopolitiikassa tai sen julkisessa tiedotuksessa hiilineutraalius ja päästöasiat on usein pakattu yhdeksi, yhteiseksi tavoitteeksi, jossa ei ole välttämättä tavallisen kansalaisen korvaan huomioitu tarpeeksi maitten ja kansojen yksilöllisiä tarpeita ja ominaisuuksia. Hiilidioksidia ilmasta talteen ottavat yritykset ja projektit toimivat rajojen yli, ja yhteisiä suurempia projekteja on kehitetty. Tämä voisi olla ratkaisu esimerkiksi kylmien maitten luonnollisesti suuremman energiantarpeen kompensointiin ja Euroopan Unionin asettamaan vuoden 2050 hiilineutraaliustavoitteeseen pääsemiseen ”perinteisemmän” hiilidioksidin talteenoton lisäksi. Jo hiilidioksidin ajattelemisen ja käyttämisen sivuvirtana ja arvokkaana resurssina pelkän ilmastoja tuhoavan päästön sijaan edistää asioita huomattavasti. (Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? 2019.)

### **11.1 Energiamurros**

Energiasektori on voimakkaan muutoksen alla, kun fossiilisista polttoaineista pyritään eroon mahdollisimman nopeasti. Kärjistetysti energiamurros tarkoittaa energiasektorilla käynnissä olevaa kaiken kattavaa siirtymää, jonka aikana harpataan uuteen järjestelmään ja energian tuotantotapaan. Entisistä energian kuluttajista saattaa tulla energian tuottajia, esimerkiksi kotien katoille asennettujen aurinkopaneelien tai pihapiiriin rakennettujen pienen skaalan tuulivoimaloiden mahdollistamana. Energiamurroksella tarkoitetaan myös muun muassa energian toimitus- ja huoltovarmuuden parantamista. (Mikä ihmeen energiamurros? N.d.)

Energiasektorin kokonaiskuvaa on hankala ymmärtää edes vakaammassa tilanteessa sen monialaisuuden vuoksi, saati käsittää sitä koskevien päätösten aiheuttamia suoria ja epäsuoria vaikutuksia. Ylipäättään ympäristöpäästöjen sekä niiden vaikutusten ympärillä käytävä keskustelu on kiihkeää ja tulevaisuuden visiot sekä käsitys nykytilanteesta vaihtelevat niin yksilöiden kuin organisaatioiden mukaan. Tiedon määrä on suuri ja tulkintoja on lähes yhtä paljon kuin tulkitsijoita. Ympäristö- ja ilmastokeskustelu on myös osaltaan ajautunut pisteeseen, jossa ideologiat ja kapea-alaiset katsantokannat saavat tuulta siipiensä alle etenkin internetin ja sosiaalisen median maailmassa. Meneekö agenda järjen edelle, entä pyhittääkö tarkoitus keinot? Missä ovat realistiset vaihtoehdot

fossiilisille polttoaineille ja eikö niitä jo käytettäisi, jos niitä ylipäätään olisi? Informaatiotulva sokaisee tietoa etsivän ja jos nykytilannettakin on hankala hahmottaa, niin miten voisi lainkaan yrittää ennustaa tulevaa? Tulisi muistaa, että voimakas tahallinen vastakkainasettelu halvaannuttaa kehittävä keskustelun. Kyseenalaistaa saa ja pitää.

Tilannetta sekoittamassa on ollut pitkään jatkunut pandemia ja kirsikkana kakun päällä suurimpiin energiantuottajamaihin kuuluvan valtion aloittama sota ja tästä johtuvat pakotteet. Energian hinnan heilahtelu vaikuttaa kaikkeen tekemiseen ja voi olla, että osa projekteista jäädytetään odottamaan vakaampia aikoja. Toisaalta pakotteet vähentävät fossiilisten polttoaineitten ostoa ja käyttöä ja voivat sysätä energiamurrosta voimakkaastikin. Energiaomavaraisuuden tärkeys korostuu ja hajautettu, paikallinen tuotanto saa lisäarvostusta. Rauli Partanen (Puheenaihe 2022) muistuttaa kuitenkin pohtimaan sitä, kuinka pitkälle omavaraisuuden tavoittelu kannattaa viedä, jotta paikalliset vaikutukset eivät kasvaisi holtittomasti. Hän tuo esiin termin energian netto-omavaraisuus, joka mahdollistaa paikallisten resurssien käytön joustavammin ja kestävämmiin, pitäen silti yllä tärkeitä kauppasuhteita rajojen yli.

Rauli Partanen käsittelee myös energian resurssikysymystä uusiutuvien ja fossiilisten energialähteitten vastakkainasettelun kautta. Uusiutuvia energiamuotoja kuten tuuli- ja aurinkoenergia mainostetaan ilmaisina; että ne eivät kuluta polttoainetta ja jopa että energiaa saadaan ilmasta. Kun ylös kaivetaan tai pumpataan kivihiihtä, öljyä tai kaasua, niin onko puolivälissä matkaa vastassa maankuoren peikkoja käsi ojennettuna, rahaa vaatien? Fossiilisten polttoaineitten hankinnassa maksaa sen kaivaminen ja poraaminen, laitteisto, luvat ja henkilöstö ynnä muut kulut, öljy itsessään on ilmaista kuten tuuli ja auringon säteily. Uusiutuvan energian kohdalla kustannukset kertyvät aivan samalla tavalla materiaaleista ja työstä. Mineraaleja louhitaan ja jalostetaan, erilaisia aineita valmistetaan ennen kuin päästään edes rakennusvaiheeseen. Materiaalinen jalanjälki syntyy molemmilla, mutta miten näitä pystyisi vertaamaan suhteessa saatuun energiaan ja käytön aikaisiin sekä jälkeisiin vaikutuksiin? Mineraalien esiintyminen maapallolla ei ole sen ihmeellisempää kuin fossiilisten polttoaineiden, niitä ei synny hetkessä. Pyhittäkö tarkoitus keinot? Mietitään esimerkkitalanne. Kaksi erillistä toimijaa haluaa kajota maaperään eri hyödykkeiden toivossa. Toinen haluaa porata reiän öljylle. Toinen haluaa kaivaa suurelta alalta mineraaleja akkuteollisuuteen. Tarkoitukset ovat ympäristön kannalta pitkässä juoksussa erilaiset, mutta niin ovat paikalliset vaikutuksetkin. (Ihmisiä, siis eläimiä 2020.)

## 11.2 Hiilineutraalius

Hiilineutraalius on nimensä mukaisesti hiilineton nollassa, eli päästöjen määrä on sama kuin sidotun hiilen määrä. Hiilineutraalius ja -negatiivisuus edellyttävät päästöjen vähentämistä ja niiden kompensoimista. NykYTEKNIKALLA EI PYSTYÄ OTTAMAAN TALTEEN TARPEEKSI HIILIDIOKSIDIA PÄÄSTÖIHIN NÄHDEN, KUN PUHUTAAN GLOBAALISTA MITTAKAAVASTA. Metsien hakkuut, soitten kuivatus ja suuret metsäpalot vapauttavat hiiltä luonnonvarastoista huimaa tahtia, tähän lisätään teollisuuden ja kuluttajien päästöt. Landströmin (2020) nyrkkisääntönä onkin päästöjen vähentäminen minimiin ja loppujen kompensoiminen. Ikmetsän ostamisella, uuden metsän istuttamisella tai soiden ennallistamisella on tuskin ainakaan huonoja ympäristövaikutuksia. Uusiutuviin energiantuotantomuotoihin sijoittaminen ja prosessien energiatehokkuuden parantaminen ovat myös hiilikompensoivaa toimintaa. Päästöjen neutralisointi vaikuttaa olevan monen yrityksen ja miksei kuluttajankin realistisin ensiaskel energiamurroksessa. Fossiilisen energian käyttöä ei voida lopettaa kuin seinään, mutta jo hiilinielujen kasvattaminen muualla antaa kuluttajille käsityksen siitä, että asialle edes yritetään tehdä jotain. (Landström 2020.)

Asia ei kuitenkaan ole niin ruusuinen kuin media voi antaa ymmärtää. Landström (2020) käsittelee kompensoinnin ympärillä vellovia väitteitä rahastuksesta ja standardisoinnin luotettavuuden haasteista. Kompensointia on syytetty anekapaksi, yritykset eivät siis edes yrittäisi vähentää päästöjään vaan ostaisivat itsensä hiilineutraaliksi sijoittamalla muualle. Päästövähennyksen on oltava ”todellinen, mitattavissa, pysyvä ja lisäinen”. Todellisuudella tarkoitetaan muun muassa mahdollisia hiilivuotoja; jos vahingot vain vaihtavat paikkaa, ei se ole kompensatiota. Pysyvyyteen vaikuttavat esimerkiksi mahdolliset metsäpalot tai muut ympäristöä muokkaavat tapahtumat, jotka joko vähentävät tai lopettavat päästöjen sitomisen tai pahimmassa tapauksessa kumoavat sen kokonaan. Lisäisellä tarkoitetaan kompensoinnin todellista hyötyä, eli päästöjen sitoutumista vain kyseisen projektin mahdollistamana. Tämän todentaminen on hankalaa, sillä kukaan ei pysty ennustamaan mitä olisi tapahtunut ilman jo tehtyjä toimenpiteitä. (Landström 2020.)

Miten päästöjä ja jätevirtoja sitten vähennetään ja panostetaan tehokkuuteen, riippuu täysin kehitettävästä prosessista. Niin kutsuttu teollinen ekologia on prosessin kehittämisen lähestymistapa, jossa pyritään aine- ja energiavirtojen järjestämiseen niin, että jäljitellään biologista ekosysteemiä. Tavoitteena on jätevirtojen minimointi tai eliminointi; luonnon ekosysteemissä ei ole jätettä. (Väi-

sänen 2014.) Resurssien ja jäte- sekä sivuvirtojen tehokas käyttö on tärkeää. Myös dematerialisatio on yksi ase hiili- ja ekologisen jalanjäljen pienentämiseen. Materiaalittomat palvelut ja jo tuotettujen hyödykkeiden järkevä käyttö vähentää uusien tuotannon tarvetta. Päästökauppa ja hiilitullit ovat EU:n tapa pitää kirjaa ja jarrutella omia jäsenmaitaan, pelkkä EU:n painostus ei silti meidän palloamme pelasta. (Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? 2019.) Tuotannon lisääntyessä suuren asukasluvun maissa, nostaa työn lisääntyminen yksilön elintaso ja samalla kulutusta ja päästöjä. Vain aika näyttää, kuinka pitkälle tilanne etenee.

## 12 Luotettavuus

Materiaalin luotettavuus riippuu suurelta osin luotettavista lähteistä. Lähteen luotettavuuden mittari ei ole yksiselitteinen, puolueellistakin lähdetä ja dataa voidaan käyttää, kunhan siihen suhtaudutaan sopivalla kriittisyydellä. Työni aikana tuotti harmaita hiuksia se, ettei mielestäni tarpeeksi neutraalia tietoa meinannut aina löytyä. Yritysten omat sivustot ovat suuressa osassa työni lähdeperustaa. Toisaalta raa’asta datastakin voidaan tehdä keskenään täysin päinvastaisia päätelmiä, tulkitsijasta riippuen.

Työn toimeksiantajan ollessa oppilaitos, mietin paljon sitä, onko lähdeperustani tarpeeksi laaja ja moniulotteinen. Tarkoituksena oli etsiä montaa eri lajia lähdeaineistoa, mutta aineiston piti olla silti sellaista, johon pääsee helposti käsiksi kotikoneelta tai viimeistään koulun kirjastosta. Yksinkertaistetun ja helposti lähestyttävän teknologiakatsauksen lisäksi halusin sisällyttää lähteisiin myös kyseenalaistavampaa ja omaa ajattelua herättelevää tekstiä sekä puhetta. Podcastit ovat matalan kynnyksen aineistoa, ja Rauli Partasen kaltaiset tutkijat ovat nykylobbauksen ravistelijoina. Suomen Ekomodernistit ry (SEM) on tutustumisen arvoinen liike, jos tiedemyönteisyys ympäristötekojen lähtökohtana kiinnostaa. SEM toimii monipuolisena keskusteluverkostona ilman ratkaisujen periaatteellista vastustamista. (Ekomodernismi 2016: mitä se on, mitä se ei ole 2015.) Yksipuolisen aineiston kerääminen ja toimittaminen oppilaitokselle olisi tuntunut karhunpalvelukselta.

Löytyi myös hyviä ja kattavia lähteitä kuten IPCC:n erikoisraportti, VTT:n raportit, IEA: Putting CO<sub>2</sub> to Use, An assessment of CCS costs, barriers and potential sekä Negative emissions — Part 2: Costs, potentials and side effects, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda ja Energian aika. Lähteiden ajantasaisuus ei ole silti toivotulla tasolla. Vuodet

2018–2019 tuntuvat olevan kuuma kausi jolle monet julkaisut sijoittuvat, VTT:n helposti lähestyttävät ja Suomen näkökulmasta tarkastelevat raportit ovat jo yli vuosikymmenen takaisia. Nämä laajat raportit silloisine tulevaisuudennäkymineen luovat kuitenkin loistavaa vertailukohtaa uudelle tiedolle.

### **13 Tulokset ja yhteenveto**

Hiilidioksidin talteenotto tulee varmasti yleistymään, niin polttoaineista kuin suoraan ilmasta. Bioenergian osalta nykyinen päästökauppajärjestelmä voi hidastaa laitteistoinvestointeja. Venäjän tilanne tulee vaikuttamaan energiasektoriin rajusti, joten vain aika näyttää mitkä projektit tulevat pärjäämään.

Työn ollessa kirjallisuuskatsaus, toimii se työkaluna niin oppilaitokselle kuin opiskelijoille. Ammatti- ja korkeakoulutasolla erilaiset näkökulmat ja suuren kuvan ymmärtämisen opettelu ovat suuressa asemassa, mutta monipuolisen tietoperustan kerääminen vaatii paljon aikaa. Kurssin materiaaleja päivittäessä voi työstä olla apua varsinaisen tiedonkeruun lisäksi nykyisten käsitysten laaja-alaisuuteen. Ajansäästön lisäksi opintojakson vetäjä saa toivottavasti myös kipinää nykykeskustelun ravisteluun, tulevaisuuden ammattilaisten eduksi. Opinnäytetyö on saavuttanut tarkoituksensa, jos kerätty ja viitattu lähdemateriaali herättää kiinnostuksen paneutua asiaan lisää.

Tutkimuskysymykset toteutuivat vain osittain. Olemassa olevat sekä kehitteillä olevat teknologiat oli pakko jättää pintaraapaisuksi, tai työ olisi paisunut holtittomasti. Vertailukelpoisia esimerkkilaitoksia kaikista talteenottotyypeistä ei löytynyt. Ilmastopolitiikan osalta päädyttiin poliittisten päätösten sijaan puimaan enemmänkin niiden ympärillä käytävää keskustelua. Tavoitteet ovat selviä, niihin pääseminen alati muuttuvassa maailmassa ei.

## Lähteet

AIR TO FUELS™. N.d. Carbon Engineeringin verkkosivut. Viitattu 16.1.2022. <https://carbonengineering.com/air-to-fuels/>.

Arctic Fox. N.d. Climeworksin verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://climeworks.com/road-map/arctic-fox>.

BECCS and negative emissions. N.d. Draxin verkkosivut. Viitattu 2.2.2022. <https://www.drax.com/about-us/our-projects/bioenergy-carbon-capture-use-and-storage-beccs/#our-beccs-projects-and-partnerships>.

Biokaasun tuotanto maatilalla. 2013. Motivan opas. Viitattu 23.2.2022. [https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf).

Biometanointi. N.d. Q Powerin verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://qpower.fi/fi/teknologia/biometanointi/>.

Budinis, S., Krevor, S., Dowell, N., Brandon, N. & Hawkes, A. 2018. An assessment of CCS costs, barriers and potential. Energy Strategy Reviews, Volume 22. Viitattu 6.5.2022. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>.

Capricorn. N.d. Climeworksin verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://climeworks.com/road-map/capricorn>.

Carbon capture and the future of coal power. N.d. Petra Novasta kertova artikkeli nrg-sivustolla. Viitattu 16.1.2022. <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html>.

CO<sub>2</sub> storage: a solution to reverse climate change. N.d. Climeworksin verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://climeworks.com/co2-storage-solutions>.

Coda Terminal. N.d. Carbfixin verkkosivut. Viitattu 17.1.2022. <https://www.carbfix.com/codaterminal>.

DAC 1. N.d. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/dac-1>.

DAC 1 Launch Release. N.d. Tiedote/julkistus yhteisprojektista Oxyyn kanssa 1PointFive verkkosivuilla. Viitattu 16.1.2022. <https://www.1pointfive.com/launch-release>.

Direct Air Capture [1]. 2021. Raportti Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) verkkosivuilla. Viitattu 23.3.2022. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>.

Direct Air Capture [2]. N.d. Carbfixin verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://www.carbfix.com/direct-air-capture>.

Direct Air Capture + Storage. N.d. Carbon Engineeringin verkkosivut. Viitattu 16.1.2022. <https://carbonengineering.com/direct-air-capture-and-storage/>.

Drax BECCS. N.d. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) verkkosivut. Viitattu 2.2.2022. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/drax-beccs>.

Ekomodernismi 2016: mitä se on, mitä se ei ole. 2015. Suomen Ekomodernistit ry:n hallitus. SEM:n verkkosivut. Viitattu 6.5.2022. <https://ekomodernismi.fi/ekomodernismi-2016-mita-se-on-mita-se-ei-ole/>.

Fisher, M. 2017. Environmental Biology. Luku 3.2: Biogeochemical cycles. Viitattu 10.11.2021. <https://openoregon.pressbooks.pub/envirobiology/chapter/3-2-biogeochemical-cycles/>.

Fuss, S., Lamb, W., Callaghan, M., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J., Wilcox, J., Dominguez, M. & Minx, J. 2018. Negative emissions — Part 2: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters. Viitattu 6.5.2022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.

Globaalit nielut. N.d. Artikkelit Ilmasto-opas-sivustolla. Viitattu 10.11.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/641247b5-5ed8-453b-b277-28a23532f64f/globaalit-nielut.html>.

Global status of CCS 2021. 2021. Global CCS Institutien raportti. Viitattu 6.3.2022. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/11/Global-Status-of-CCS-2021-Global-CCS-Institute-1121.pdf>.

Heilers, G. 2019. Coca-Cola bottler experiments with turning emissions into effervescence. GreenBiz-verkkosivut. <https://www.greenbiz.com/article/coca-cola-bottler-experiments-turning-emissions-effervescence>.

Hiilenkierto. 2017. Ekosysteemipalveluitten verkkosivut. Viitattu 10.11.2021. <https://www.luonnontila.fi/ekosysteemipalvelut/ekosysteemipalvelut/saatelypalvelut/hiilenkierto/>.

Hiili alkuaineena. N.d. Hiilitieto-verkkosivusto. Viitattu 9.11.2021. <https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/perustietoa-hiilesta/hiili-alkuaineena/>.

Hiilidioksidi CO<sub>2</sub>. N.d. Woikosken verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://www.woikoski.fi/teollisuus-ja-elintarviketeollisuus/kaasut/erikoiskaasut/hiilidioksidi.html>.

Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. N.d. Artikkelit Ilmasto-opas-sivustolla. Viitattu 10.11.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbc/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>.

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. N.d. Artikkelit Ilmasto-opas-sivustolla. Viitattu 10.11.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/fd626ba3-8099-40e4-af75-94124d1f5c7f/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi.html>.

Hiilinieluista huolehtiminen. N.d. Artikkelin Ilmasto-opas-sivustolla. Viitattu 10.11.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/7c821f90-9605-4f9d-827b-894301c1e009/hiilinieluista-huolehtiminen.html>.

Hiilivarannot. N.d. Hiilitieto-verkkosivusto. Viitattu 9.11.2021. <https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/perustietoa-hiilesta/hiilivarannot/>.

Ihmisiä, siis eläimiä. 2020. Jakso 48: Ydinvoima ja ydinvoimaloiden sarjatuotanto. Öljyriippuvuus. Ympäristötuho. Podcast-ohjelma, julkaistu 28.12.2020. Youtube-videopalvelu. Toimittajana Henry Soinnunmaa ja haastateltavana Rauli Partanen. Viitattu 18.3.2021. [https://www.youtube.com/watch?v=BUmy8LVAaLs&ab\\_channel=Ihmisi%C3%A4%2Csiisel%C3%A4imi%C3%A4](https://www.youtube.com/watch?v=BUmy8LVAaLs&ab_channel=Ihmisi%C3%A4%2Csiisel%C3%A4imi%C3%A4).

IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. 2005. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group III. Muokannut Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L. Viitattu 12.4.2022. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf).

Jemtland, T. 2019. Positive test results from the carbon capture and storage pilot in Oslo. Fortumin verkkosivut. Viitattu 17.1.2022. <https://www.fortum.com/about-us/blog-podcast/forthedoers-blog/positive-test-results-carbon-capture-and-storage-pilot-oslo>.

Kaikki mitä olet halunnut tietää hiilidioksidista – ja vähän enemmänkin. 2020. Helen-lehden toimitus. Helenin kotisivut. Viitattu 12.11.2021. <https://www.helen.fi/asiakaspalvelu/ajankohtaista/ajassa/ilmi%C3%B6t/hiilidioksidi>.

Korppi, S. 2019. Hiilidioksidin talteenottolaitteisto. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, prosessitekniikka. Prosessitekniikan opinnäytetyö, AMK. Viitattu 25.4.2022. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201903253738>.

Kousa, M. 2009. Ennen polttoa tapahtuva hiilidioksidin talteenotto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, energiatekniikka. Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Viitattu 8.3.2022. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/46539/nbnfi-fe200907031674.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Kuivajää. N.d. Woikosken verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://www.woikoski.fi/teollisuus-ja-elintarviketeollisuus/kaasut/kuivajaa/kuivajaa.html>.

Kuivajääpuhallus. N.d. Jamitecin verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://jamitec.fi/palvelut/kuivajaa/kuivajaa>.

L 416/2012. Laki hiilidioksidin talteenottamisesta ja varastoinnista. Viitattu 8.3.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2012/20120416>.

Laaksonen, P. 2019. Sellutehtaat jalostamaan hiilidioksidia polttoaineiksi. Artikkelin Finnpulpin verkkosivuilla. Viitattu 23.2.2022. <https://www.finnpulp.fi/2019/12/19/sellutehtaat-jalostamaan-hiilidioksidia-polttoaineiksi/>.

Landström, M. 2020. Onko päästöjen kompensointi rahastusta? Sitran verkkosivut. Viitattu 13.5.2021. <https://www.sitra.fi/blogit/onko-paastojen-kompensointi-rahastusta/>.

Linnanen, T. 2018. Hiilidioksidin käytön mahdollisuudet metsäteollisuudessa. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu XAMK. Viitattu 23.2.2022. [https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2018/09/LINNANEN\\_XAMK.pdf](https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2018/09/LINNANEN_XAMK.pdf).

Lund, K. N.d. Hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (CCU ja CCS). Teknologian tutkimuskeskus VTT:n verkkosivut. Viitattu 23.3.2022. <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/hiilidioksidin-talteenotto-kaytto-ja-varastointi-ccu-ja-ccs>.

Metaani. N.d. Artikkelit Ilmasto-opas-sivustolla. Viitattu 10.11.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastomuutos/ilmio/-/artikkeli/dec264e2-6350-418c-a1bc-3ef7c80676aa/metaani.html>.

Mikä ihmeen energiamurros? N.d. Fortumin verkkosivut. Viitattu 7.3.2022. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutishuone/tietopakettit-medialle/mika-ihmeen-energiaturros>.

Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? 2019. Artikkelit Euroopan parlamentin verkkosivuilla. Päivitetty 25.6.2021. Viitattu 7.3.2022. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>.

Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. 2019. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The National Academies Press. Viitattu 24.4.2022. <https://doi.org/10.17226/25259>.

Northern Lights. N.d. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) verkkosivut. Viitattu 17.1.2022. <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/northern-lights>.

Our Story. N.d. Carbon Engineeringin verkkosivut. Viitattu 16.1.2022. <https://carbonengineering.com/our-story/>.

Our Technology. N.d. Carbon Engineeringin verkkosivut. Viitattu 29.12.2021. <https://carbonengineering.com/our-technology/>.

Petra Nova - W.A. Parish Project. N.d. Office of Fossil Energy and Carbon Management. Viitattu 16.1.2022. <https://www.energy.gov/fecm/petra-nova-wa-parish-project>.

Pre-combustion. N.d. National Energy Technology Laboratoryn verkkosivut. Viitattu 8.3.2022. <https://netl.doe.gov/coal/carbon-capture/pre-combustion>.

Products. N.d. Soletairin verkkosivut. Viitattu 24.4.2022. <https://www.soletairpower.fi/products/>.

Puheenaihe. 2022. Jakso 228: Energia: Turve, ydinvoima, vihreä siirtymä ja omavaraisuus (Rauli Partanen). Podcast-ohjelma, nauhoitettu 12.3.2022 ja julkaistu 25.3.2022 Spotifyssa. Juontajana Rami Kurimo ja haastateltavana Rauli Partanen. Viitattu 28.3.2022. <https://open.spotify.com/episode/352VuhKPE9eYWieYGezkM0?si=6430094349184933>.

Putting CO<sub>2</sub> to Use. 2019. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) julkaisu. Viitattu 23.2.2022. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting\\_CO2\\_to\\_Use.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf).

Quality specification for liquified CO<sub>2</sub>. N.d. Northern Lightsin verkkosivut. Viitattu 17.1.2022. <https://northernlightsccs.com/wp-content/uploads/2021/12/Quality-specification-for-liquified-c02.pdf>.

Ringrose, P. 2019. Northern Lights. Esitys Pittsburghin NETL Meetingissä 29.8.2019. Viitattu 17.1.2022. <https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/RINGROSE-International-Panel-Northern-Lights-Project.pdf>.

Suokko, A. & Partanen, R. 2017. Energian aika. Avain talouskasvuun, hyvinvointiin ja ilmastonmuutokseen. Helsinki: WSOY.

Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. 2022. Tilastokeskuksen verkkosivut. Viitattu 23.3. [https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2022-03-17\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2022-03-17_kat_001_fi.html).

Supercritical Carbon Dioxide Power Systems. N.d. Southwest Research Institututen verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://www.swri.org/supercritical-carbon-dioxide-power-systems>.

Synteettisten polttoaineiden P2X-tuotantolaitos Joutsenossa olisi harppaus kohti päästötöntä liikennettä. 2021. LUT-yliopiston verkkosivut. Viitattu 6.5.2022. [https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/synteettisten-polttoaineiden-p2x-tuotantolaitos-joutsenossa-olisi-harppaus-kohti-paastotonta-liikennetta](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/synteettisten-polttoaineiden-p2x-tuotantolaitos-joutsenossa-olisi-harppaus-kohti-paastotonta-liikennetta).

Teir, S., Arasto, A., Tsupari, E., Koljonen, T., Kärki, J., Kujanpää, L., Lehtilä, A., Nieminen, M. & Aatos, S. 2011a. Hiilidioksidintalteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa. Teknologian tutkimuskeskus VTT. Viitattu 2.4.2022. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2011/T2576.pdf>.

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. 2011b. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Teknologian tutkimuskeskus VTT. Viitattu 2.1.2022. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf>.

Tervonen, T. 2021. Kasvihuonekaasu metaani voi lämmittää maapalloa rysäyksellä: talteenotto antaisi ihmiskunnalle lisääikää. Helsingin Sanomat 19.8.2021. Viitattu 10.11.2021. <https://www.hs.fi/tiede/art-2000008188310.html>.

The Causes of Climate Change. N.d. NASA:n Global Climate Change -verkkosivut. Viitattu 06.03.2022. <https://climate.nasa.gov/causes/>.

The science behind our sustainable protein. N.d. Solar Foodsin verkkosivut. Viitattu 23.3.2022. <https://solarfoods.fi/science/>.

The struggles to make CCS work. 2021. Carbon Commentary. Viitattu 12.4.2022. <https://www.carboncommentary.com/blog/2021/7/30/the-struggles-to-make-ccs-work>.

The West Ranch CO<sub>2</sub>-EOR Project. N.d. nrg. Viitattu 16.1.2022. <https://www.law.uh.edu/faculty/thester/courses/Environmental%20Law%202015/pla-2014-west-ranch-fact-sheet.pdf>.

Timperley, J. 2018. Q&A: Why cement emissions matter for climate change. CarbonBriefin verkkosivut. Viitattu 13.4.2022. <https://www.carbonbrief.org/ga-why-cement-emissionsmatter-for-climate-change>.

Vedenkäsittely. N.d. Air Liquidin verkkosivut. Viitattu 23.2.2022. <https://fi.airliquide.com/ratkaisut/vedenkasittely#phjustering>.

Väisänen, V. 2014. Teema 7: Teollinen ekologia. Prosessi- ja ympäristötekniikan perusta 1 -kurssi. Viitattu 7.3.2022. <https://www.oulu.fi/sites/default/files/content/PYP%20I%202014%20Teema%207.pdf>.

What we do. N.d. Northern Lightsin verkkosivut. Viitattu 17.1.2022. <https://northernlight-sccs.com/what-we-do/>.