



HIILIDIOKSIDIN VARASTOINTI MINERALISOIMALLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

Vilma Rantanen

Tarkastaja: Tutkijatohtori Hannu Karjunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT:n energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Vilma Rantanen

Hiilidioksidin varastointi mineralisoimalla

Energiatekniikan kandidaatintyö

2024

32 sivua, 2 kuvaa

Tarkastaja: Tutkijatohtori Hannu Karjunen

Avainsanat: hiilidioksidin mineralisointi, tehostettu rapautuminen, hiilidioksidin varastointi, CCS, CCU

Tässä kandidaatintyössä perehdytään hiilidioksidin mineralisaatioon ja sen kehitysnäkymiin. Kohonneet hiilidioksidipitoisuudet ilmakehässä nostavat maapallon lämpötilaa ja muuttavat ilmastoa. Poistamalla hiilidioksidia ilmakehästä on mahdollista hidastaa ilmastomuutoksen kehitystä.

Hiilidioksidin mineralisaatiota tapahtuu luonnossa itsestään kemiallisen rapautumisen muodossa. Kemiallisessa reaktiossa hiilidioksidi ja metallioksideja sisältävät silikaattimineraalit reagoivat muodostaen pysyviä karbonaatteja ja lämpöä. Luonnollinen reaktio on liian hidas vaikuttaakseen ilmastomuutokseen, mutta sitä on mahdollista nopeuttaa esimerkiksi lisäämällä lämpöä, katalyyttejä tai alentamalla painetta.

Hiilidioksidin mineralisaatioon on eri keinoja. Hiilidioksidia voi syöttää suoraan silikaattimineraaleja sisältävään maaperään tai louhia ja käsitellä mineraalit ensin. Mineralisaatiossa on mahdollista hyödyntää myös teollisuuden sivuvirtoja ja jätteitä. Reaktiotuotteena syntyneitä karbonaatteja on mahdollista käyttää tuotteissa, kuten betonissa. Silikaattimineraalit voi jauhaa hienoksi ja ripotella pelloille, rannoille tai meriin, jossa ne reagoivat ilmakehän ja merien hiilidioksidin kanssa. Tätä metodia kutsutaan tehostetuksi rapautumiseksi.

Hiilidioksidin mineralisaatiolla olisi mahdollista sitoa suuria määriä hiilidioksidia. Tutkimuksella, ohjaavalla lainsäädännöllä ja tukitoimilla menetelmän suosiota saataisiin lisättyä. Tällä hetkellä ongelmana ovat kustannukset ja energian kulutus. Hiilidioksidin mineralisoinnin kehitystä ja tutkimusta on tuettava yhä enenevässä määrin, jos sen halutaan menestyvän.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Vilma Rantanen

Carbon storage through mineralization

Bachelor's thesis

2024

32 pages, 2 figures

Examiner: Post-doctoral researcher Hannu Karjunen

Keywords: mineralization, enhanced weathering, carbon storing, CCS, CCU

In this bachelor's thesis, we explore the mineralization of carbon dioxide and its potential for development. Rising carbon dioxide levels in the atmosphere contribute to global warming and drive climate change. By extracting carbon dioxide from the atmosphere, we can reduce the progression of climate change.

Mineralization occurs naturally through chemical weathering. In this process, carbon dioxide reacts with silicate minerals containing metal oxides producing permanent carbonates and heat. Although the natural reaction is too slow to significantly impact climate change, it can be accelerated through methods such as heating, catalyst addition, or pressure reduction.

There are various approaches for mineralization. One method involves directly injecting carbon dioxide into soil containing silicate minerals, while another involves mining and processing the minerals beforehand. Additionally, industrial byproducts and waste can be utilized in mineralization processes. The resulting carbonates can find applications in products like concrete. Silicate minerals can also be finely ground and dispersed across fields, beaches, and oceans to react with atmospheric and oceanic carbon dioxide. This process is known as enhanced weathering.

Mineralization offers the potential to sequester significant amounts of carbon dioxide. However, widespread adoption of the method depends on further research, legislation, and support measures. The primary obstacles now are cost and energy consumption. Continued investment in the research and development of mineralization is essential for its success.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

BECCS	bioperäisen hiilen talteenotto (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
CaL	kalsiumlooping (Calsium Looping)
CCU	hiilidioksidin talteenotto ja käyttö (Carbon Capture and Utilization)
CCS	hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage)
CLC	kemikaalinen looping (Chemical Looping Combustion)
CO ₂ -EOR	hiilidioksidilla tehostettu öljyntuotanto (CO ₂ Enhanced Oil Recovery)
DAC	ilmaerotus (Direct Air Capture)
EU	Euroopan Unioni
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
NDC	kansallinen päästövähennyssitoumus (Nationally Determined Contribution)

Kemialliset merkinnät

CaCO ₃	kalsiumkarbonaatti
Ca(OH) ₂	kalkki
CaSiO ₃	kalsiumsilikaatti
CO ₂	hiilidioksidi
NO _x	typpioksidi
(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	oliviini
Mg ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	serpentiini
SO _x	rikkioksidi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Hiilen kiertokulku.....	8
2.1	Luonnollinen hiilen kierto	8
2.1.1	Hidas hiilen kierto.....	9
2.1.2	Rapautuminen	10
2.2	Hiilidioksidin käyttö osana hiilen kiertoa.....	10
2.3	Ilmastopolitiikka ohjaa tulevaisuutta	12
3	Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi	14
3.1	Ilmaerotus	14
3.2	Talteenotto savukaasuista	15
3.3	Talteenotto polttoaineena käytettävästä kaasusta	16
3.4	Talteenotto happipoltolla	16
3.5	Looping prosessit.....	17
3.6	Varastointimuodot	17
4	Hiilidioksidin mineralisaatio	19
4.1	Mineralisaatioreaktio	19
4.2	Mineralisaatiotyypit.....	20
4.3	Reaktiotuotteiden hyödyntäminen betonissa	22
4.3.1	Hiilineutraali betoni Suomessa	24
4.3.2	Hiilineutraali betoni maailmalla	24
5	Mineralisaation kehitysnäkymiä.....	26
5.1	Kiviaineksen mineralisaatio.....	26
5.2	Jätteiden hyötykäyttö	27
5.3	Euroopan Unioni.....	27
6	Johtopäätökset	29
	Lähteet	30

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillintä on yksi aikakautemme suurimmista haasteista, jota on pyrittävä ratkaisemaan monin keinoin. Näistä yksi on hiilidioksidin talteenotto ja varastointi erinäisin menetelmin. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (Carbon Capture and Storage, CCS) on nimensä mukaisesti prosessi, jossa hiilidioksidia otetaan talteen ja varastoidaan. Talteenotto voi tapahtua joko pistelähteestä, kuten tehtaasta, tai vaihtoehtoisesti suoraan ilmakehästä. Myös varastointia voidaan tehdä sellaisenaan tai hiilidioksidi voidaan liittää osaksi jotain tuotetta. Hiilidioksidin talteenotolle ja käytölle on myös oma terminsä: CCU (Carbon Capture and Utilization). (Euroopan Komissio, 2024a)

Hiilidioksidia voi varastoida liittämällä se osaksi silikaattimineraaleja. Tätä varastointimuotoa kutsutaan hiilidioksidin mineralisaatioksi. Mineralisaatiossa hiilidioksidi reagoi silikaattimineraalien metallioksidien kanssa muodostaen pysyviä karbonaatteja. Näitä karbonaatteja voidaan varastoida maaperään sellaisenaan tai hyödyntää tuotteissa, kuten betonissa. (Sanna et al., 2014.) Mineralisaation rajaaminen vain CCS:ään tai CCU:hun on haastavaa, sillä sitä voi käyttää pitkäaikaiseen varastointiin (CCS) tai reaktiotuotteista voi valmistaa myytävän tuotteen (CCU).

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi voi toimia avaintekijänä ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Vaikka talteenotto- ja varastointitekniikat ovat kehittyneitä, CCS:ää ei ole otettu käyttöön siinä mittakaavassa kuin vuosikymmen sitten oli tavoitteena. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi nähdään kriittisenä tekijänä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Varsinkin negatiivisiin päästöihin tähtäävät teknologiat voivat mahdollistaa lämpenemisen pysäyttämisen alle kahteen asteeseen. (Bui et al., 2018.) Tällaisia ovat esimerkiksi BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage), missä bioenergian tuotannosta syntyvä hiilidioksidi varastoidaan pysyvästi. (Fajardy and Greenfield, 2023)

IPCC:n eli hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change) näkee hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin toimivan avainroolissa maailmanlaajuisten ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Hiilidioksidin uudelleenkäytöllä tulee olemaan rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä, mutta käytön laajuudesta ei ole vielä tietoa. (Bui et al., 2018)

IPCC 2005 -raportin tutkimuksista havaittiin, ettei ole olemassa yksittäistä keinoa, joka riittäisi päästöjen vähentämiseen, vaan niitä on hyödynnettävä yhdessä (Nationalgrid, 2024). Hiilidioksidin talteenotossa ja varastoinnissa on monia sovelluskohteita, minkä vuoksi se nähdäänkin yhtenä merkittävimmistä keinoista hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä (Teir et al., 2009). CCS:n etuna on, että sillä saadaan poistettua päästöjä sektoreilta, joita on muuten vaikea saada päästöttömiksi (Euroopan Komissio, 2024b.)

Tämä työ keskittyy erityisesti hiilidioksidin mineralisaatioon. Mineralisaatiolla on paljon hyödyntämätöntä potentiaalia ja se on kehittynyt viimeaikoina nopeasti. Mineralisaatiota on alettu soveltaa yhä useammilla aloilla, mikä tekeekin siitä kiinnostavan hiilidioksidin varastointikeinon tulevaisuudessa. Tutkimuksen kriittisyyttä luo erityisesti ilmastonmuutoksen nopea kehittyminen ja siksi aihetta onkin tärkeää tarkastella juuri nyt. Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on avata hiilidioksidin mineralisaatiota varastointimuotona ja sen merkitystä tulevaisuudessa. Työssä tarkastellaan erityisesti hiilen kiertoa, hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia sekä hiilidioksidin mineralisaatiota. Lopuksi pohditaan mineralisaation mahdollista tulevaisuutta osana hiilidioksidin varastointia.

2 Hiilen kiertokulku

Maapallon 4,5 miljardia kestäneen olemassaolon aikana on koettu erilaisia ilmastoja. Nykyinen aikakausi, holoseeni, on ihmiselle kaikista ihanteellisimman maapallon poikkeuksellisen pyöreän radan ansiosta. Se on mahdollistanut suurten ihmismäärien kukoistuksen ja voisi häiritsemättömänä jatkua vielä 50 000 vuotta. Koska hiilen määrä on lisääntynyt ilmakehässä, on se alkanut lämmetä, mikä suistaa maapallon pois optimaaliselta ilmastoalueelta. Tätä uutta aikakautta kutsutaan antroposeenikaudeksi. Se on ensimmäinen ihmisen toiminnasta aiheutunut kausi, eikä sen olemusta tunneta. (Raworth, 2018)

Lisääntynyt hiilidioksidin määrä voimistaa kasvihuoneilmiötä. Kasvihuoneilmiössä osa auringon lämpösäteilyä sitoutuu maapalloa ympäröiviin kaasuihin lämmittäen sitä. Tämä on ilmiönä elämälle edullinen, mutta hiilidioksidin lisääntyessä maapallo lämpenee liikaa. (Ilmasto-opas.fi, 2022.) Samalla hiilen kierto häiriintyy. Luonnollinen hiilen kierto auttaa säätelemään maapallon lämpötiloja ja tekee elämän mahdolliseksi. (Met Office, n.d.)

2.1 Luonnollinen hiilen kierto

Hiili kiertää luonnossa jatkuvasti. Koska maapallo ja sen ilmakehä muodostavat suljetun systeemin, hiilen määrä tässä kierrossa pysyy vakiona. Suurin osa maapallon hiilestä on sitoutunut kiviin ja sedimentteihin. Loput sijaitsevat merissä, ilmakehässä ja eliöissä. Näitä kutsutaan hiilinieluiksi. Kaikki muutokset, jotka lisäävät hiilen määrää ilmakehässä, lämmittävät maapalloa. (NOAA, 2023)

Kun kasvit yhteyttävät, ne sitovat itseensä ilmakehän hiilidioksidia. Kun eliöt hengittävät ja maatuvat, tämä hiili vapautuu takaisin kiertoon. Merien hiilidioksidi on jatkuvassa vaihdossa pinnan ja ilmakehän välillä. Osa tästä painuu merten pohjaan pitkäaikaiseen varastoon. Yksittäinen hiilidioksidimolekyylillä on ilmakehässä vain noin viisi vuotta. Mutta koska suurin osa meren yläosiin ja kasvipeitteeseen sitoutuneesta hiilestä palautuu suhteellisen nopeasti kiertoon, on hiilidioksidin todellinen vaikutus tätä pidempi. (Ilmasto-opas.fi, n.d.)

Hiilen kierto jakautuu nopeaan ja hitaaseen kiertoon. Nämä syklit ovat vuorovaikutuksessa, mutta tapahtuvat hyvin eri tahdissa. Nopea kierto tapahtuu vuosissa ja vuosikymmenissä ja

se kierrättää hiiltä 1000 kertaa hidasta kiertoa enemmän. Nopeassa kierrossa hiili kulkee elävien organismien läpi. Nopea kierto vaikuttaa ilmakehän hiilipitoisuuteen vahvasti. Tämä on nähtävillä esimerkiksi pohjoisen pallonpuoliskon kevät- ja kesäaikaan, sillä suurin osa maapallon maa-alueista sijaitsee pohjoisessa. Pohjoisen kasvukaudella ilmakehän hiilitasot laskevat. (Met Office, n.d.)

2.1.1 Hidas hiilen kierto

Hidas kierto kestää 100–200 miljoonaa vuotta. Siinä kemialliset reaktiot ja mannerlaattojen liike aiheuttavat hiiliatomien liikkeen maaperän, merien ja ilmakehän välillä. Keskimäärin 10^{13} – 10^{14} grammaa hiiltä liikkuu hitaassa kierrossa vuosittain. Nopeassa kierrossa hiiltä liikkuu vielä enemmän, 10^{16} – 10^{17} grammaa. Ihmisen toiminta aiheuttaa 10^{15} gramman lisäpäästöt. (Riebeek, 2011)

Hidas kierto alkaa sateesta. Ilmakehän hiilidioksidi sitoutuu pisaroihin muodostaen hiilihappoa. Happo liuottaa kiviä irrottaen niistä esimerkiksi kalsium- ja magnesium-ioneja. Tätä prosessia kutsutaan kemialliseksi rapautumiseksi. Ionit kulkeutuvat jokien mukana meriin. Merissä kalsium-ionit yhdistyvät karbonaatti-ionien kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. Suurin osa merien kalsiumkarbonaatista syntyy koralleissa ja planktoneissa. Kun eliöt kuolevat, ne vajoavat pohjaan muodostaen ajan saatossa kerroksia kuoristaan ja sedimentteistä. Kun kerrokset painuvat yhteen, syntyy hiiltä sisältävää kalkkikiveä. Tällä metodilla syntyy 80 % hiiltä sisältävästä kivistä. Loput 20 % muodostuvat eliöiden ja mudan kerrostumista. Miljoonien vuosien saatossa paine ja korkeat lämpötilat synnyttävät sedimenttikiviä, kuten liuskekiveä. Joissain tapauksissa orgaaninen materiaali ei maadu, vaan muodostaa kivihiihtä, öljyä ja maakaasua. (Riebeek, 2011)

Kun mannerlaatat liikkuvat ja sulavat, niiden kiviainekseen sitoutunut hiili vapautuu tulivuorten kautta. Kuumentunut kivi hajoaa jälleen silikaattimineraaleiksi ja hiilidioksidiksi. Tulivuorten purkautuessa kaasut ja mineraalit päätyvät jälleen maanpinnalle ja ilmakehään aloittaen kierron uudestaan. Tulivuoret vapauttavat 130–180 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa. Ihmisten polttamista fossiilisista polttoaineista vapautuu noin 30 biljoonaa tonnia, 100–300-kertainen määrä. (Riebeek, 2011)

Meret lasketaan osaksi hidasta hiilen kiertoa. Ilman ja veden rajapinnalla hiilidioksidi liukenee ja vapautuu jatkuvasti. Vedessä hiilidioksidi reagoi vesimolekyylien kanssa vapauttaen vetyä. Vety taas reagoi edelleen rapautumisesta syntyneen hiilen kanssa, jolloin syntyy vetykarbonaatti-ioneja. (Riebeek, 2011)

2.1.2 Rapautuminen

Yksi osa hiilen hidasta kiertoa on rapautuminen. Rapautuminen tarkoittaa kiviaineen ja mineraalien murenemistä ja rikkoutumista. Rapautuminen voi olla mekaanista tai kemiallista. Mekaanisella rapautumisella tarkoitetaan pinnan rikkoutumista esimerkiksi lämpötilojen vaihtelun vuoksi. Suuret lämpötilaerot saavat kiven lämpölaajenemaan ja kutistumaan. Toistuvat koonvaihtelut rapisuttavat kiveä. Veden jäätyminen kiveen muodostuneisiin railoihin aiheuttaa pakkasrapautumista. Kemiallinen rapautuminen muuttaa kivien molekyyli-rakennetta, mikä saa ne liukenemaan. Biologinen rapautuminen voi olla osa mekaanista tai kemiallista rapautumista. Siinä esimerkiksi kasvien juuret työntyvät kivien rakoihin ja laajentavat niitä kasvaessaan. (National Geographic, 2024)

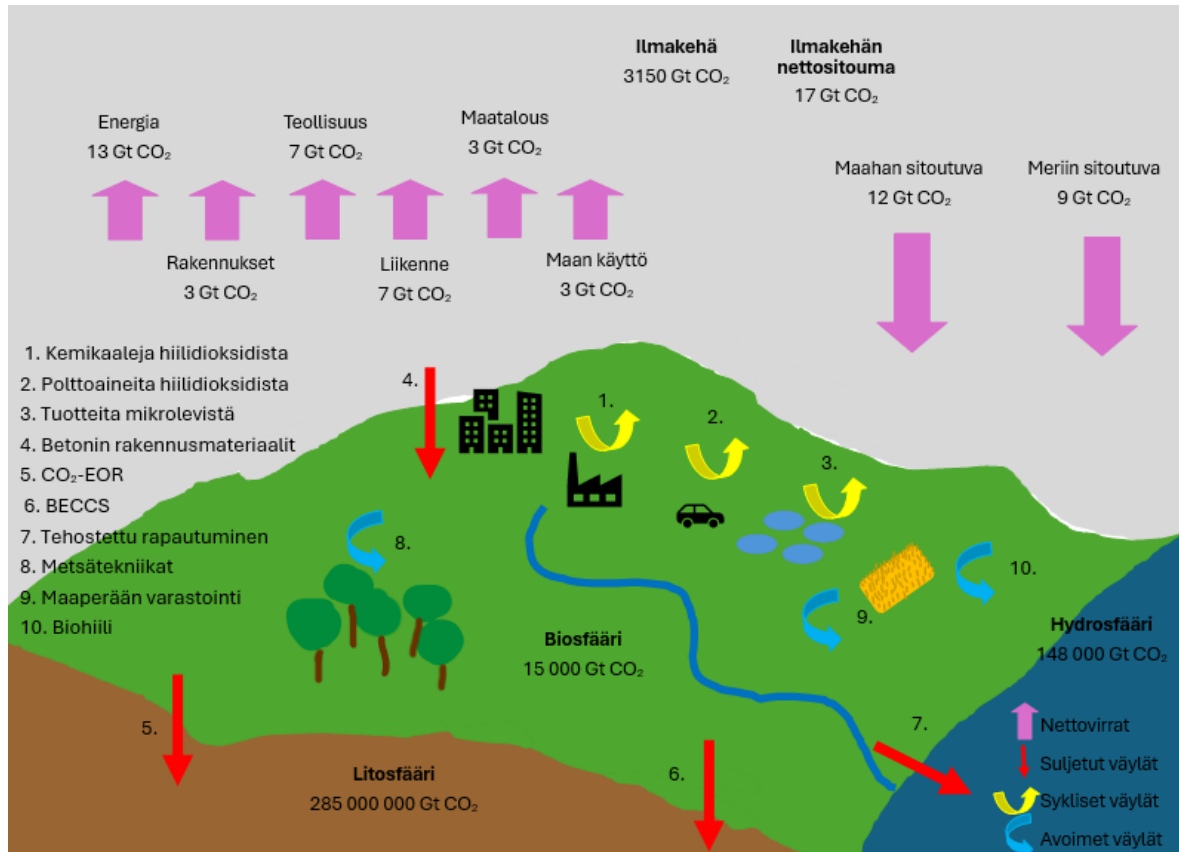
Vaikka rapautuminen poistaa ja varastoi hiilidioksidia ilmakehästä, prosessi on sellaisenaan liian hidaskäyttämään merkittävää eroa ilmastonmuutoksen etenemiseen. Tehostetun rapautumisen avulla hiilidioksidia olisi mahdollista poistaa huomattavasti nopeammin. Yksi keino tälle on jauhaa kiveä, esimerkiksi oliviiniä, hienoksi ja levittää sitä rannoille tai mereen, jolloin se reagoi suurella pinta-alalla hiilidioksidin kanssa. Tällöin rapautumisesta tulisi yksi hiilidioksidin varastointinkeinoista. (Jagoutz and Krol, 2023)

2.2 Hiilidioksidin käyttö osana hiilen kiertoa

Hiilidioksidia voidaan varastoida ja käyttää ihmisten toimesta. Tällä tavoin on mahdollista tasapainottaa hiilen kiertoa kohti sille luonnollista tilaa ja hidastaa samalla ilmaston lämpenemistä.

Kiinnostus CCU:n eli hiilen talteenoton ja käytön ympärillä lisääntyy. Tämä johtuu osittain ilmastonmuutoksesta ja osittain mahdollisuudesta halvempien ja puhtaampien tuotteiden tuottamiselle. CCU saattaa alentaa päästöjen vähentämisen ja hiilidioksidin poistamisen kustannuksia tuotteiden tuoman lisäarvon vuoksi. Hiilidioksidin käytölle on olemassa erilaisia

väyliä, joita on havainnollistettu kuvassa 1. On laskettu, että jokaisella väylällä on mahdollistaa hyödyntää keskimäärin 0,5 Gt hiilidioksidia vuosittain. Teknologian haasteet ovat kuitenkin huomattavia, eikä kaikkien väylien yhtäaikaiseen käyttöön ole resursseja. (Hepburn et al., 2019)



Kuva 1. Hiilidioksidivirrat ja mahdolliset käyttöväylät (arvio vuosilta 2008–2017) (Hepburn et al., 2019)

Tyypillisiä väyliä hiilidioksidin käytölle ovat kemikaalit, polttoaineet, mikrolevät, rakennusmateriaalit ja hiilidioksidilla tehostettu öljyntuotanto (CO₂-EOR, Enhanced Oil Recovery). On myös arvioitu, että jokaisella tyypillisellä väylällä on mahdollisuus poistaa 0,2–3,2 Gt hiilidioksidia vuosittain. Vuosien 1930–2013 aikana 16 Gt hiilidioksidia varastoitettiin mineralisoimalla sementtiin. Tämän hetken näkymä on, että vuotuinen tahti nousee yhdellä gigatonnilla. Varaston pysyvyys vaihtelee suuresti eri varastointimenetelmien välillä. Hiilidioksidia voidaan varastoida päivistä vuosituhansiin. Mineralisaatiolla saavutetaan tuhansia vuosia kestäviä varastoja, joiden suurin uhka on happamat olosuhteet. (Hepburn et al., 2019)

Epätyypillisiä hiilidioksidin hyödyntämistä väyliä ovat BECCS, tehostettu rapautuminen, metsä- ja maankäyttötekniikat sekä biohiili. Eri epätyypillisten väylien vuotuinen

hiilidioksidin sitomispotentiaali vaihtelee suuresti, 0,2–5,3 Gt:n välillä. Tulevaisuuden näkymät ovat epävarmoja, ja monien epätyypillisten väylien odote onkin alle yksi gigatonni hiilidioksidia vuodessa. (Hepburn et al., 2019)

On vaikea määrittää, missä kokoluokassa CCU tulee tulevaisuudessa ilmentymään. Vaikka markkinoille siirtyminen onkin tärkeä tekijä, ei ole takeita siitä, että halvin CCU-muoto muodostuisi merkittävimmäksi. On tärkeää huomata, että CCU:n kasvattaminen ei välttämättä ole ratkaisu ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi. Tärkeämpää onkin keskittyä päästöjen vähentämiseen ja hiilidioksidin poistamiseen. Tämän myötä myös hiilidioksidin vähentämiseksi edullinen CCU-teknologia kehittyy. (Hepburn et al., 2019)

2.3 Ilmastopolitiikka ohjaa tulevaisuutta

Poliittiset päätökset määrittävät tulevaisuuden elinolosuhteet. IPCC on kehittänyt vuodesta 1990 ilmastonmuutosraportteja. Raportit kootaan jo julkaistusta tieteellisestä aineistosta, eikä IPCC itse tee uutta ilmastotutkimusta. Raportit käsittelevät ilmastonmuutosta, sopeutumista siihen, sen vaikutusta ja hillitsemismahdollisuuksia. IPCC ei ehdota mitään tiettyä suuntaan, vaan esittelee kaikki vaihtoehdot neutraalisti. (Ilmatieteen laitos, n.d.)

Maapallon lämpötila on noussut keskimäärin 0,06°C vuosikymmenessä vuodesta 1850 lähtien. Tahti on kiihtynyt vuoden 1982 jälkeen kolminkertaiseksi ja nyt planeetta lämpiää 0,2°C vuosikymmenessä. Vuosi 2023 oli mittaushistorian lämpimin laajempien mittausten alettua vuonna 1850. Myöskin kymmenen lämpimintä vuotta ovat tapahtuneet viimeisen kymmenen vuoden aikana. (Lindsey and Dahlman, 2024.) Silti yhä edelleen tavoitellaan jatkuvaa talouskasvua ja kulutuksen lisääntymistä, vaikkei se ole planeetan asettamissa rajoissa mahdollista. (Raworth, 2018)

Ilmaston lämpenemiselle on asetettu tarkkoja rajoja kuten 1,5°C, 2°C, 3°C tai 4°C. Näitä arvoja verrataan esiteollisen ajan maapallon keskilämpötiloihin eli vuosiin 1850–1900. (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023.) On hyvin todennäköistä, että kasvihuonekaasupäästöjen kasvu jatkuu vielä. Mitä pidempään tätä kuitenkin tapahtuu, sitä suurempia vähennysten on oltava. Maailman maiden päivitettyillä kansallisilla päästövähennys-sitoumuksilla eli NDC:illä (Nationally Determined Contribution) ei ole ollut toivottuja

vaikutuksia, eivätkä ne riitä 1,5°C nousun rajaan, sillä NDC:t eivät ole riittävän kunnianhimoisia. Ne pienentävät päästöjä ainoastaan 7,5 % vuoteen 2030 mennessä aiempiin sitoumuksiin verrattuna, vaikka päästöjä tulisi vähentää 30 % 2°C rajaan ja 55 % 1,5°C rajaan päästäksemme. (UNEP, 2021)

On todennäköistä, että vaikka ilmastonmuutos saataisiinkin pysäytettyä, tietyt tekijät jatkavat muuttumistaan vuosisatojen ajan. Esimerkiksi biosfääri, kryosfääri ja valtamerten syvimät osat muuttuvat paljon pintalämpötiloja hitaammin ja vaikkapa meren pinta tulee nousemaan vielä pitkään. Riippuen siitä millaisiin toimiin nyt ryhdytään, vuonna 2300 voidaan kokea lämpötasoja, joita ei ole koettu miljooniin vuosiin. (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023.) Jos halutaan sitouta 2°C nousuun, mikään tekniikka yksinään ei riitä. Jo kehitettyjä tekniikoita on parannettava ja uusia luotava. Koska hiilidioksidipäästöjen määrä ilmakehässä on suuri eikä loppua näy, on sen talteenotto ja varastointi elintärkeää. (Teir et al., 2011)

3 Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

Osa mineralisaatiomuodoista vaatii hiilidioksidin erillistä varastointia. Tässä luvussa esitellään tyypillisimpiä talteenottokeinoja sekä vaihtoehtoisia varastointitapoja. Hiilidioksidin talteenotossa energiantuotannosta on tällä hetkellä käytössä seuraavat tekniikat: talteenotto savukaasuista, talteenotto polttoaineesta sekä happipolton avulla. Näitä on hyödynnetty jo ennen CCS:ää muun muassa kemianteollisuudessa, josta ne on liitetty osaksi varastointiprosessia. (Teir et al., 2009.) Myös hiilidioksidin erotusta suoraan ilmasta kehitetään ja erilaiset looping prosessit ovat mahdollisia pistelähteissä. Osa hiiltä sitovista prosesseista tapahtuu ilman erillistä talteenottoa. Tästä hyvänä esimerkkinä aiemmin sivuttu tehostettu rapautuminen.

Tällä hetkellä talteenoton suurin ongelma on perinteisen CCS:n tuomat lisäkustannukset. CCS:n myötä laitoksen polttoaineen kulutus kasvaa 10–40 % ja sähköntuotannon kustannukset 20–90 % (Metz and Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005). Biomassalle on mahdollista hyödyntää samoja tekniikoita kuin fossiilisillekin polttoaineille. Mutta koska biomassalaitokset ovat verrattain pieniä, olisi CCS:n käyttö kallista. CCS on realistisempaa suuremman kokoluokan seospolttolaitoksissa. (Teir et al., 2009)

3.1 Ilmaerotus

Hiilidioksidia voi erottaa suoraan ilmakehästä. Tätä kutsutaan ilmaerotukseksi eli DAC:ksi (Direct Air Capture). Perinteinen keino vastaavalle toiminnalle on metsittäminen ja maanparannus. DAC:llä on kuitenkin monia etuja näihin verrattuna: tekniikka ei kilpaile ruoantuotannon kanssa, maa-alaa kuluu vähemmän ja sidonta pysyy vakiona. DAC-prosesseilla erotettu lähes puhdas hiilidioksidi on mahdollista varastoida tai liittää osaksi tuotteita. Teknologiat perustuvat tällä hetkellä pääosin kiinteisiin talteenottomateriaaleihin ja emäksisiin liuottimiin. (Elfvig, 2022)

Sveitsiläinen Climeworks työittää laitteistoa, jossa ilma ohjataan tuulettimen läpi keräimeen. Keräimessä se kulkee suodattimen kautta, joka erottaa hiilidioksidin muista kaasuista. Kun suodatin on täynnä hiilidioksidia, se kuumennetaan, vapauttaen hiilidioksidin lopullista

keräystä varten. (Climeworks, 2024.) Tätä laitteistoa käytetään myös maailman suurimmassa ilmaerotusta hyödyntävässä laitoksessa, Orcassa. Tämä laitos sijaitsee Islannissa ja koostuu kahdeksasta yksiköstä, joista jokainen sitoo 500 tonnia hiilidioksidia vuodessa. (Climeworks, n.d.a.) Myös kanadalainen Carbon Engineering varastoi hiilidioksidia. Prosessissa hiilidioksidi erotetaan sarjalla kemiallisia reaktioita, jonka jälkeen ilma palautuu ympäristöön. (Carbon Engineering, n.d.) Soletair Power -yrityksen luoma järjestelmä yhdistetään rakennusten olemassa oleviin lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmiin. Ilman hiilidioksidi varastoidaan niiden avulla ja mineralisoidaan osaksi betonia. (Soletair Power, n.d.)

3.2 Talteenotto savukaasuista

Talteenotossa savukaasuista (post-combustion capture) hiilidioksidi otetaan talteen matalassa paineessa hiiltä sisältävän polttoaineen savukaasuista. Ennen erotusta savukaasut on puhdistettava eli niistä poistetaan hiukkaset sekä hapot (usein NO_x ja SO_x). Tämän jälkeen kaasut jäädytetään ja ohjataan pesurikoloniin, jossa liuotin absorboi hiilidioksidin. Haihdutuskolonnissa hiilidioksidi erotetaan liottimesta muuttamalla painetta, korottamalla lämpötilaa tai molemmilla. Valmis hiilidioksidi paineistetaan tämän jälkeen kuljetusta varten ja liotin pääsee uudelleen kiertoon. (Teir et al., 2009)

Savukaasuista talteenotto on pitkälti sovellettavissa olemassa oleviin voimalaitoksiin. Talteenottoa on mahdollista tehdä mm. luottimella, adsorptiolla, kylmäteknikalla ja kalvoerotuksella. (Gkotsis et al., 2023.) Liuotin irrottaa hiilidioksidin kemiallisesti. Tällä hetkellä käytössä olevan liuottimen irrotus vaatii myös suuresti energiaa, mikä tekee prosessista kalliin. Kyseinen tekniikka on ollut käytössä vuosikymmeniä pienemmän kokoluokan prosesseissa, mutta vaatii kehitystä, jotta sitä voidaan soveltaa energiantuotannon mittakaavassa suurille savukaasumäärille. (Teir et al., 2009)

Kalvoerotuksessa hiilidioksidille herkät kalvot erottavat hiilidioksidin savukaasuista. Kalvoerotusta on helppo laajentaa ja sen käyttökustannukset ovat matalat. Adsorbaatiossa adsorboiva aine tartuttaa hiilidioksidin pintaansa, josta se sitten erotetaan, useimmiten lisäämällä lämpöä tai laskemalla painetta. Kylmäteknikassa eli kyrogeenisessä erotuksessa hiilidioksidi erotetaan kondensaatiolla tai härmistymispisteestä. (Gkotsis et al., 2023)

3.3 Talteenotto polttoaineena käytettävästä kaasusta

Toinen tapa hiilidioksidin talteenotolle on sen erottaminen jo ennen polttoa polttoaineesta (pre-combustion capture). Tätä menetelmää on mahdollista hyödyntää kaasutettujen polttoaineiden sekä maakaasun kanssa. Polttokaasuseoksesta, joka koostuu pääosin vedystä, hiilimonoksidista ja hiilidioksidista, irrotetaan ensiksi ympäristölle haitalliset yhdisteet, kuten ammoniakki ja rikki. Seuraava askel on kaasun käsittely höyryllä siten, että siitä syntyy lähinnä vedyn ja hiilidioksidin seos. Koska hiilidioksidin osuus on suhteellisen suuri, voidaan se erottaa joko fysikaalisella tai seosabsorptiolla. Molemmat näistä ovat kaupallisessa käytössä. Ennen kuljetusta hiilidioksidi kuivataan sekä kompressoidaan. (Teir et al., 2009)

Polttoaineen käsittely on savukaasuerotukseen verrattuna kalliimpaa, mutta itse hiilidioksidin erotus halvempaa, sillä sen pitoisuus on suurempi. Tämänkin tekniikan leviämisen esteenä on kallis hinta ja korkea teknisyys. (Teir et al., 2009)

3.4 Talteenotto happipoltolla

Viimeinen yleisemmin käytössä oleva hiilidioksidin talteenottotekniikka on happipolttolito. Siinä polttoaine poltetaan lähes puhtaan hapen ja kierrätetyn savukaasuseoksen avulla. Tämä mahdollistaa suuren hiilidioksidipitoisuuden (n. 80–95 %), jolloin erottaminen on energiatehokkaampaa ja yksinkertaisempaa. Hiilidioksidi puhdistetaan polton jälkeen käsittely-yksikössä, jossa hiukkaset ja happoyhdisteet poistetaan ja tuote jäädytetään ja paineistetaan. (Teir et al., 2009)

Käsittely-yksikkö ja happitehdas heikentävät laitoksen hyötysuhdetta, johon voi vaikuttaa erityisesti tehokkaammalla hapen tuotannolla. Suuren happimäärän vuoksi kattilakokoa on mahdollista pienentää, mikä tuo säästöjä. Happipolttotekniikka oli vuonna 2009 demonstrativaiheessa, mutta kokeilujen perusteella kilpailukykyinen muihin talteenottomenetelmiin verrattuna. Happipolton pitäisi olla sovellettavissa myös kierto-oleijupolttotekniikkaan. (Teir et al., 2009)

3.5 Looping prosessit

Looping prosesseihin lukeutuvat kalsiumlooping (CaL) ja kemikaalinen looping (CLC). Ne voidaan luokitella omaksi talteenottoaluokakseen. Looping prosessit ovat vasta kehitteillä, eivätkä ne ole laajassa käytössä. Niissä voi kuitenkin piillä ratkaisu nykyisten tekniikoiden ongelmiin. CaL on regeneratiivinen prosessi, jossa kalsiumoksidipohjaisilla sitovilla aineilla otetaan hiilidioksidi savukaasuista talteen. Tekniikka vaikuttaa erityisen kiinnostavalta sementtilaitosten kannalta, sillä niissä syntyy kalsiumoksidia. (Romano et al., 2013)

CLC on lupaava hiilidioksidin taltiointimenetelmä. CLC hyödyntää metallioksideja hapenkantajina välttääkseen seostumista typen ja sen oksidien kanssa, mikä pienentää erotuskustannuksia. CLC on tutkimusasteella ja sen tekniikkaan liittyykin vielä epäselvyyksiä. (Alalwan and Alminshid, 2021)

3.6 Varastointimuodot

Edellä esitellyillä menetelmillä varastoitu hiilidioksidi varastoidaan tai hyödynnetään tuotteissa. Hiilidioksidia on mahdollista varastoida muun muassa suoraan maaperään, kuten johonkin valmiiseen onkaloon. Tätä kutsutaan geologiseksi varastoinniksi. Menetelmää hyödynnetään maailmalla, mutta Suomesta ei löydy helposti hyödynnettäviä kohteita kyseiseen varastointiin. (Teir et al., 2011.) Hiilidioksidia on varastoitu maankuoreen vuodesta 1996. Maailmalta löytyy tällä hetkellä useampia kaupallisen kokoluokan varastoja ja yli sataa kehitetään. Huokoinen kiviaines on varastoinnille suotuisa, sillä sen mineraalirakeiden väliin jäävät aukot täyttyvät hyvin hiilidioksidilla. (IEA, 2022)

Meret sitovat itseensä luonnostaan hiilidioksidia. Hiilidioksidin varastoimista syvempiin meren kerroksiin ruiskuttamalla on tutkittu, mutta varasto ei olisi pysyvä. Vuosisatojen kuluessa hiilidioksidi sekoittuisi meriveteen ja sieltä ilmakehään. Tämä olisi myös haitallista meren eliöille. (Metz and Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005)

Talteen otettua hiilidioksidia voi käyttää myös tuotteissa (CCU). Jos tuotteet ovat lyhytikäisiä, kuten hiilihapotetut juomat, elintarvikepakkaukset tai laserkaasut, ei voida puhua varastoinnista. Jotta CCU auttaisi ilmastonmuutoksen hidastamisessa, tuotteiden eliniän olisi

oltava pitkä ja suurin osa varastoidusta hiilidioksidista olisi otettava talteen tuhansiksi vuosiksi. (Teir et al., 2011)

Hiilidioksidia on myös mahdollista yhdistää mineraaleihin, jolloin syntyy pysyviä reaktiotuotteita. Näitä voidaan sitten jatkojalostaa käyttöön tai varastoida maaperään. Tätä varastointitapaa tarkastellaan seuraavaksi perusteellisemmin. (Teir et al., 2011)

4 Hiilidioksidin mineralisaatio

Yksi jatkuvasti kehittyvä hiilidioksidin varastointimuoto on mineralisointi. Mineralisoinnissa hiilidioksidi kiinnittyy silikaatteihin eli metallioksideja sisältäviin mineraaleihin muodostaen pysyviä karbonaatteja. Hiilidioksidin mineralisaatio ja mineraalinen karbonointi ovatkin synonyymeja. Varastointimuotoa voi kutsua myös tietyissä tilanteissa tehostetuksi rapautumiseksi. Hyöty geologiseen varastointiin verrattuna on, että hiilidioksidin vapautuminen ilmakehään on hyvin epätodennäköistä. Tämän vuoksi varastoja ei tarvitsi valvoa ja seurata juuri ollenkaan. Myös reaktiotuotteita on mahdollista käyttää hyödyksi toisin kuin geologisessa varastoinnissa.

Hiilidioksidin mineralisaation kemiallisia reaktioita tapahtuu luonnossa itsestään (rapautuminen), mutta prosessi on hidas. Sitä on mahdollista nopeuttaa yhdistämällä korkeapitoista hiilidioksidia ja silikaatteja, kuten oliviinia ((Mg,Fe)₂SiO₄), kalsiumsilikaattia (CaSiO₃) tai serpentiiniä (Mg₂Si₂O₅(OH)₄). Mineralisaatioreaktiossa syntyneitä karbonaatteja voidaan säilöä riskittä pitkiä aikoja tai käyttää hyödyksi erilaisissa kohteissa, mikä tekee niistä toivottavia reaktiotuotteita. (Juhász and Halász, 2010)

4.1 Mineralisaatioreaktio

Hiilidioksidin mineralisaatio perustuu karbonaatioreaktioon. Karbonaatioreaktiota havainnollistaa yhtälö 1. Siinä metalli-oksidi ja hiilidioksidi reagoivat synnyttäen metallikarbonaatteja ja lämpöä. (Sanna et al., 2014)



Lähtöainetta eli silikaatteja löytyy maailmasta paljon. Pelkästään magnesiumsilikaateilla saataisiin sidottua kaikki fossiilisten polttoaineiden tuottama hiilidioksidi ja Suomen omat varat riittäisivät 200–300 vuodeksi nykyisellä kulutuksella. Hiilidioksidin sitomiseen sopii myös teollisuuden jätteet ja sivutuotteet. Teollisuuden sivutuotteista on mahdollista hyödyntää tuhkaa sekä teräksen, raudan ja sementin tuotannon sivutuotteita ja jätteitä. Ongelma on, että kaasun ja kiinteän aineen välinen reaktio on normaaleissa oloissa hidas ja sille otollisen ympäristön luominen vaatii energiaa. Reaktiota saadaan nopeutettua esimerkiksi nostamalla

painetta tai lämpötilaa sekä katalyyteillä. (Ilmasto-opas.fi, n.d.) Tehokas prosessi saavutetaan hyödyntämällä reaktiossa vapautuvaa lämpöä (Neeraj and Yadav, 2020). Nopeutetut mineralisaatioprosessit voivat kestää tunneista vuosiin. Kestoon vaikuttavat esimerkiksi mineraalien koostumus, lämpötila, kosteus ja hiilidioksidin sekä mineraalien alkuperä. (Riedl et al., 2023)

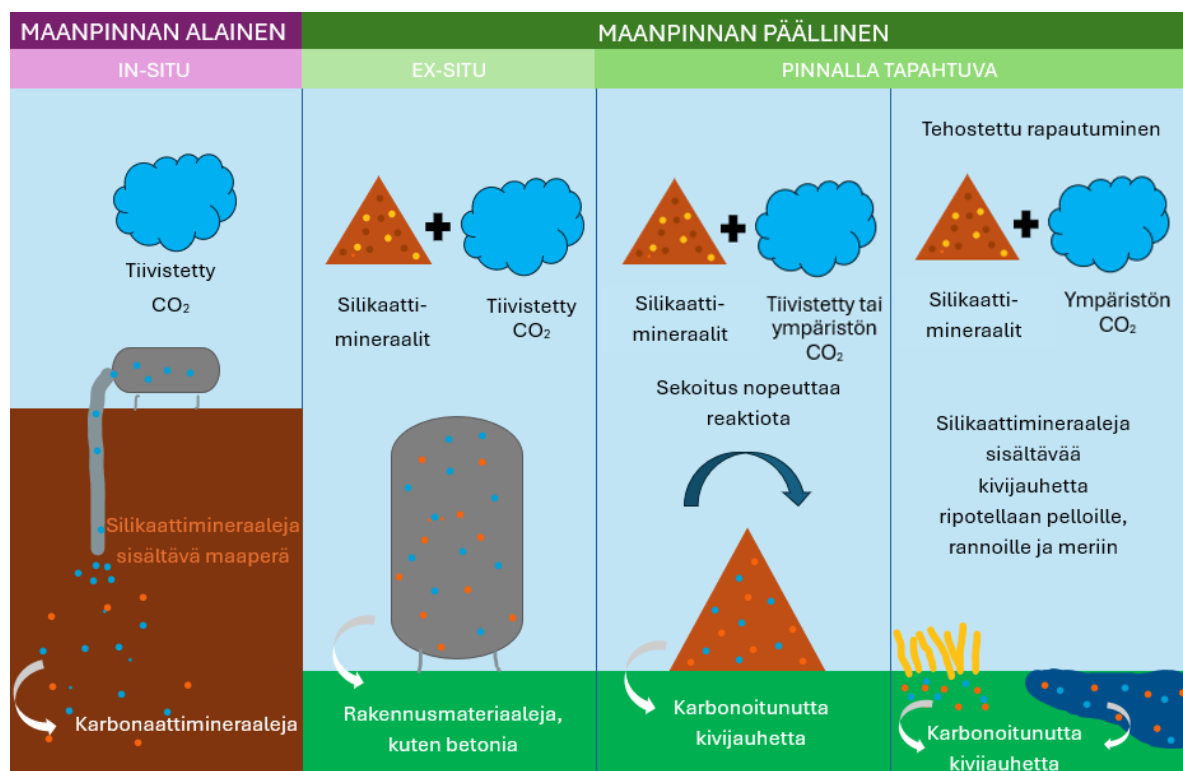
Tuotetut aineet, kuten kalsiumkarbonaatti, ovat myös itsessään arvokkaita (Olajire, 2013). Kalsiumkarbonaatteja on mahdollista hyödyntää raaka-aineena esimerkiksi kemian- ja metalliteollisuudessa sekä maataloudessa ja teiden rakentamisessa. Magnesiumkarbonaatit soveltuvat esim. tiilien tuotantoon. Ratkaiseva tekijä hyödyntämiskohteen vallinnassa on tuotteen sisältämät haitta-aineet ja niiden liukoisuus. Suomessa ratkaisut tehdään tapauskohtaisesti. (Ilmasto-opas.fi, n.d.)

4.2 Mineralisaatiotyypit

Mineralisaatio voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: maan alla tapahtuvaan (in-situ) ja maanpinnan yläpuolella tapahtuvaan (ex-situ). Maanalaista mineralisaatiota harjoitetaan monin tavoin. Yksi tavoista on yhdistää tiivistetty hiilidioksidi veteen ja ruiskuttaa seos kaivosten kautta silikaatteja sisältävään maahan. Maaperässä silikaatit ja hiilidioksidi muodostavat karbonaatteja varastoiden hiilidioksidin. Hiilidioksidin vapauttanut vesi palaa maanpinnalle. Toinen keino on puristaa hiilidioksidi vettä muistuttavaan tiheyteen ja ruiskuttaa se sellaisenaan maaperään. Tämä metodi kuluttaa huomattavasti vähemmän vettä, mutta hiilidioksidin puristaminen vie energiaa. (Hepburn et al., 2019.) Maanalaisessa mineralisaatiossa ei ole tarvetta kiviaineen kaivamiselle. Myös kuljettamisesta syntyvät välivaiheet poistuvat. Maailmalta löytyy paljon tällaiseen karbonointiin soveltuvia kohteita. Esimerkiksi tulvabasaltti nähdään huokoisuutensa vuoksi toimivana vaihtoehtona. (Juhász and Halász, 2010)

Maanpinnan päällistä mineralisaatiota tapahtuu, kun kaivetut silikaattimineraalit ja kaivosten tai teollisuuden sivuvirrat ovat kosketuksissa ympäristön tai puristetun hiilidioksidin kanssa. Puristetulla hiilidioksidilla mineralisaatio on nopeampaa hiilidioksidin suuremman pitoisuuden vuoksi. Myös silikaattien muoto vaikuttaa reaktionopeuteen. Mitä hienommaksi ne on murskattu, sitä enemmän reaktiopinta-alaa niillä on. Tämä kiihdyttää reaktiota. (Hepburn et al., 2019)

Maanpinnan päällistä mineralisaatiota voidaan tehdä teollisuusympäristössä, silikaattikaivoksessa tai luonnossa. Teollisessa ympäristössä esiintyvä maanpinnan päällinen mineralisaatio toteutetaan reaktoreissa korkeassa paineessa ja/tai lämpötilassa. Tämä on muihin mineralisaatiomuotoihin verrattuna energiaa vievää ja kallista, minkä vuoksi reaktiotuotteista pyritään usein valmistamaan myytäviä rakennusmateriaaleja. Mineraalien voi antaa reagoida ympäristön hiilidioksidin kanssa tai lisätä siihen tiivistettyä hiilidioksidia. Myös tehostettu rapautuminen kuuluu maanpinnan päällisiin mineralisaatiomuotoihin. Kuva 2 havainnollistaa mineralisoitumismuotojen jakautumista. (Hepburn et al., 2019)



Kuva 2. Mineralisaatiomuodot (Hepburn et al., 2019)

Mineralisaatiolla voi olla hiilidioksidin varastoinnin lisäksi myös muita etuja. Sillä voisi muun muassa vähentää terveysriskejä kaivoksissa. Esimerkiksi asbesti muodostaa vaarattomia mineraaleja reagoidessaan hiilidioksidin kanssa. Menetelmää on kuitenkin tutkittava lisää. Mineralisaation toinen potentiaalinen lisäetu on mineraalien käyttö merten happamuuden vähentämiseksi. Happamoittavaa hiilidioksidia saataisiin sidottua, ripottelemalla jauhettuja silikaattimineraaleja mereen (tehostettu rapautuminen). Tämäkin vaati kuitenkin lisätutkimuksia hyötyjen maksimoimiseksi ja haittojen minimoimiseksi. (Riedl et al., 2023.) Mineralisoinnin etuna on tuotetut karbonaatit, mutta uhkakuvana niiden liikatuotanto. Luonnon

mineraaleja löytyy huomattavasti enemmän kuin teollisuuden sivutuotteita, ja ne ovatkin tämän vuoksi potentiaalisempi lähtöaine suuressa mittakaavassa. (Ilmasto-opas.fi, n.d.)

Etujen lisäksi myös mahdollisia haittoja on. Osa mineralisaatiomuodoista voi esimerkiksi lisätä haitallisia metalleja kuten nikkeliä ja kromia ympäristöön. Myös louhittujen mineraalien varastointi altaissa voi saastuttaa ympäröiviä pinta- ja pohjavesiä. Tätä voidaan ehkäistä poistamalla raskasmetallit esikäsitteilyllä. Toinen ongelma on ruiskutusmetodien suuri veden kulutus. Tuhatta kiloa varastoitua hiilidioksidia kohden voi kulua noin 25 tuhatta tonnia vettä. Kun hiilidioksidia ruiskutetaan maaperään, pitää myös maanjäristysriski ottaa huomioon. (Riedl et al., 2023.) Suurimpana ongelmana nähdään kuitenkin runsas energiankulutus. Tämä johtuu erityisesti reaktion nopeuttamiseen kuluvaista energiasta. (Ilmasto-opas.fi, n.d.)

Vaikka mineraalinen karbonointi tunnetaan prosessina hyvin, sen toteuttamisessa laajassa mittakaavassa on haasteita. Koska tonnia hiilidioksidia kohden kuluu arviolta 1,6–3,7 tonnia silikaatteja, tarvitaan mineraaleja valtaisia määriä. Kun hiilidioksidi ja silikaatit reagoivat, syntyy myös alkuperäistä 50–100 % enemmän kiveä. Tämän vuoksi karbonaatteja ei voi kokonaisuudessaan palauttaa alkuperäisten mineraalien louhokseen, jos niitä ei halua hyödyntää. (Juhász and Halász, 2010)

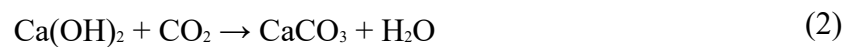
Mineralisoimalla olisi mahdollista poistaa merkittäviä määriä hiilidioksidia. Vielä on kuitenkin epäselvää, mikä mineralisaatiomuoto olisi tehokkain. Eri mineralisaatiomuodot ovat myös eri kehitysasteilla. Maanpinnan alla tapahtuvaa varastointia on jo esimerkiksi Islannissa ja Yhdysvalloissa. Myös pinnan yläpuolella tapahtuvaa mineralisaatiota on löydetty kaupallisilta markkinoilta. Jotta hiilidioksidin mineralisaatio saataisiin merkittäväksi osaksi hiilidioksidin varastointia, pitää siihen liittyvät riskit ja epävarmuuden ratkaista. (Riedl et al., 2023)

4.3 Reaktiotuotteiden hyödyntäminen betonissa

Betoni on nykyisen rakentamisen tärkein elementti ja sitä käytetään vuosittain noin 10 miljardia kuutiometriä. Tämän vuoksi betonin päästöjen pienentämisellä olisi suuri vaikutus myös ilmastonmuutoksen hidastamisessa. (Betoni, n.d.)

Betonin pääraaka-aine on sementti, jota kuluu kuutioon betonia noin 200–400 kg. Samalla sen valmistus tuottaa 50–90 % betonin hiilidioksidipäästöistä. Kun sementti ja vesi

reagoivat, syntyy kestävä mineraali, niin kutsuttu sementtikivi. Kun sementtikiveen lisätään muuta kiveä, saadaan betonia. Sementti koostuu pääosin kalkkikivestä, joka jauhetaan yhdessä muiden raaka-aineiden kanssa. Seosta kuumennettaessa mineraalit sulavat ja reagoivat vapauttaen hiilidioksidia. Reaktiota kutsutaan kalsinoinniksi. Reaktiotuotteena syntyy erityisesti klinkkerimineraaleja sisältävä massa, josta sementti hienonnetaan. Kalsinointi ei ole kuitenkaan pysyvää. Hydratoitunut eli veden kanssa kosketuksissa ollut sementti karbonoituu käänteisessä reaktiossa (yhtälö 2). Reaktiossa sammutettu kalkki ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ja ilmakehän hiilidioksidi (CO_2) reagoivat muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). (Betoni, n.d.)



Yksi ratkaisu betonin päästöjen pienentämiseen on sementin osittainen korvaus jollakin toisella sideaineella. Tällaisia pienipäästöisiä sideaineita ovat esimerkiksi masuunikuona ja lentotuhka. Toinen vaihtoehto on betonin korvaaminen kokonaan toisella tuotteella, kuten betonin kaltaisilla geopolymeereillä, joissa ei ole sementtiä ollenkaan. Geopolymeereissä sideaineena toimii teollisuuden sivuvirrat tai esimerkiksi kaoliinisavi. Tuote on kuitenkin vasta kehitysvaiheessa. (Betoni, n.d.)

Tavoitteena on luoda myös täysin päästötöntä sementtiä hiilidioksidin talteenoton avulla. Ympäri Eurooppaa onkin käynnissä sementinvalmistajien luotsaamia pilot- ja koelaitoksia, joissa sementin valmistuksessa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan mineraaleihin tai maaperään. Koska betonirakenteet sitovat itseensä ilman hiilidioksidia karbonatisoitumalla, tulee niistä hiilinegatiivista, jos betoni on valmiiksi hiilineutraalia. (Betoni, n.d.)

Kalsinointi tuottaa n. 70 % kaikista sementin valmistuksen päästöistä eli 500 kg CO_2 /tonni. Sementti on kykeneväinen sitomaan n. 85 % tästä määrästä takaisin itseensä, mikäli se jatkokäsitellään hyvin. Karbonaatio on suurinta tuoreessa betonissa ja hidastuu voimakkaasti ajan myötä. Jos betoni murskataan purkuvaiheessa, uusi karbonatisoitumaton pinta mahdollistaa 85 % hiilidioksidin sidonnan. (Betoni, n.d.) Betonisten rakennusmateriaalien uskotaankin poistavan, käyttävän ja varastoivan 0,1–1,4 Gt hiilidioksidia vuodessa pitkällä aikavälillä. Varastot ovat myös itse rakennuksia pitkäikäisempiä. (Hepburn et al., 2019)

Koska rakennusmateriaaleja sitovat monet säädökset, voi kestää vuosikymmeniä ennen kuin hiilidioksidia sisältävät tuotteet saadaan kunnolla markkinoille. Ihmiskunnan nopean kaupungistumisen myötä rakentaminen lisääntyy, minkä vuoksi nyt olisi hyvä aika uusien kestävämpien rakennusmateriaalien lanseeraamiselle. (Hepburn et al., 2019)

4.3.1 Hiilineutraali betoni Suomessa

Hiilidioksidin luontainen taipumus sitoutua betoniin on nähty haittana, sillä se aiheuttaa raudotteiden ruostumista. Tämä ongelma on kuitenkin käännetty uuden teknologian pohjaksi Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) projektissa. (VTT beyond the obvious, 2022)

Normaalisti betonin hiilijalanjälki on 250–300 kg/CO₂ kuutiota kohti, mutta uudella Carbonaide-menetelmällä on saavutettu negatiivisia päästöjä, -60 kg/CO₂ kuutiota kohden. Kun hiilidioksidi syötetään betoniin kovettumisen aikana, muodostuu karbonaattimineraaleja. Niiden ja kalsiumoksidin avulla syntyy hiilinegatiivinen sideaine, jota voidaan hyödyntää sementin sijasta. Carbonaiden betonin valmistusmenetelmä ei sovellu kohteessa valamiseen, mutta elementtirakentamisen suosion vuoksi käyttökohteita löytyy silti. VTT:n projektista itsenäiseksi kehittynyt Carbonaide-yritys pitää mahdollisena, että vuoteen 2050 mennessä heidän toimestaan sidottaisiin 500 megatonnia hiilidioksidia vuositasolla. (VTT beyond the obvious, 2022)

Carbonaiden teknologia pohjautuu hiilidioksidin kivettämiseen automatisoidulla järjestelmällä. Järjestelmä toimii ilmanpaineessa, mikä mahdollistaa sen helpon liittämisen betonitehtaiden yhteyteen. Prosessissa hiilidioksidi yhdistetään betoniin kovetuskammiossa, jolloin sementin tarve vähenee. Jo aikaisessa tutkimusvaiheessa teknologia mahdollisti yli sadan hiilidioksidin kilon sitomisen betonikuutiota kohti. Käytettävän hiilidioksidin ei ole tarvetta olla äärimmäisen puhdasta, kunhan rikkiyhdisteitä ei esiinny suurina pitoisuuksina. Tällä hetkellä hyödynnettävä hiilidioksidi on pulloitettua, mutta savukaasun käyttöä sellaisenaan selvitetään. (Tuohiniitty, 2023)

4.3.2 Hiilineutraali betoni maailmalla

Tällä hetkellä markkinoilta löytyy vain vähän hiilidioksidia sisältäviä rakennusmateriaaleja, mutta yksi esimerkki näistä on isobritannialainen Carbon8 (Olfe-Kräutlein et al., 2021). Carbon8 tuottaa erilaisia rakennusmateriaaleja pistelähteistä varastoidusta hiilidioksidista ja teollisuuden sivuvirroista. Näihin tuotteisiin lukeutuvat esimerkiksi betonielementit, teiden täyteaineet ja betonisekoitteet. (Carbon8, n.d.)

Kalifornialainen yritys Blue Planet valmistaa synteettistä kalkkikiveä hiilidioksidista. Hiilidioksidi erotetaan teollisuuden savukaasuista, jonka jälkeen siitä tehdään hiilihapotettu liuos. Liuos muodostaa yhdessä kiviaineksen ja metalli-ionien kanssa synteettisiä kalkkikivikerroksia. Tällöin kalkkikiven massasta 44 % on hiilidioksidia. San Franciscon lentokentällä on yksi tällaisesta kalkkikivestä valmistettu kiitotie. (Hirvelä, 2020)

Kanadalainen CarbonCure ruiskuttaa nestemäistä hiilidioksidia suoraan märkään betoniin, jolloin syntyy pieniä kalsiumkarbonaattimineraaleja. Tämä tekee betonista tavallista lujempaa ja vähentää sementin tarvetta. Tekniikka on noin 150 yrityksen käytössä Kaakkois-Aasiassa ja Pohjois-Amerikassa. (Hirvelä, 2020)

5 Mineralisaation kehitysnäkymiä

Kiinnostus hiilidioksidin mineralisaation ympärillä on kasvussa ja menetelmällä voikin olla valoisa tulevaisuus. Jotta hiilidioksidin mineralisaatiota voidaan edistää tehokkaasti, tarvitaan ohjaavaa lainsäädäntöä ja teknologiaa.

5.1 Kiviaineksen mineralisaatio

Vaikka monet hiilidioksidin mineralisaatiotekniikoista ovat teoriassa toimivia, ei niitä ole otettu suuressa määrin käyttöön. Mineralisaatiotuotteiden mahdollisesti korkeammat markkinahinnat tekevätkin tuet ja poliittiset linjaukset tarpeellisiksi. Toisaalta hiilidioksidin varastointi materiaaleihin saattaa tehdä niistä myös tavallista parempia ja täten luoda tuotteille lisäarvoa. Mineralisointiin vaikuttavat varastointiin ja mineralisointiin käytetyt menetelmät sekä monet muut muuttujat, joten lopputulosta on vaikea ennustaa. Tämän vuoksi tuotteita on valvottava ja testattava erikseen. (Olfe-Kräutlein et al., 2021)

Joitain mineralisaatiotekniikoita on jo käytössä, mutta monia olisi mahdollista laajentaa. Tutkimukset osoittavat, että hiilidioksidin mineralisoinnin kehitystä ja tutkimusta on tuettava yhä enenevässä määrin, jos sen halutaan menestyvän. Tärkeimpiä tukikeinoja ovat päästökaupat ja luotettavien päästömittareiden kehitys elinkaarten tutkimista varten. Teknologian kehitystä tukevia kannustimia löytyy jo, mutta niiden volyyymiä ja tarkkuutta tulee kasvattaa. Markkinoihin vaikuttavat linjaukset taas nähdään tärkeimpänä ratkaisuna hintaeron poistossa. (Olfe-Kräutlein et al., 2021)

Hiilidioksidin mineralisoimisen hyödyntämiseen laajassa mittakaavassa vaaditaan neljää asiaa: kiinteää raaka-ainetta, hiilidioksidin lähde, vähähiilistä energiaa ja markkinat valmistetulle tuotteelle. Yleensä nämä kaikki eivät löydy samasta paikasta. Tämän vuoksi laajamuotoinen toiminta vaatii uusia toimitusketjuja. Tällä hetkellä ei ole myöskään tietämystä ja osaamista laajamittaisesta mineralisaatiosta tai siihen vaadittavista tuotantoketjuista. Ensimmäinen askel olisikin niiden kartoitus. (Ostovari et al., 2022)

On tutkittu, että hiilidioksidin sitominen mineralisoimalla voisi vähentää teollisuuden päästöjä 130 Mt CO₂ vuodessa ja vuoteen 2040 mennessä sillä voitaisiin luoda 136 Mt

negatiivisia hiilidioksidipäästöjä vuodessa. Tämä voitaisiin saavuttaa laajentamalla nykyistä mineralisaatioinfrastruktuuria viidellä prosentilla tai rakentamalla kokonaan uusi järjestelmä. Jotta täysinmittainen mineralisaatio olisi mahdollista, tarvitaan myös suuria mineralisointilaitoksia ja -kaivoksia. (Ostovari et al., 2022)

5.2 Jätteiden hyötykäyttö

Teollisuuden sivuvirtoina syntyneen mineraalijätteen hyödyntäminen hiilidioksidin varastoinnissa on kiinnostava mahdollisuus. Syntyvillä mineraalijätteillä olisi mahdollista sitoa gigatonni hiilidioksidia vuosittain. Tällä hetkellä tuotantokustannukset ovat korkeat, mutta niiden nähdään laskevan tekniikan ja infrastruktuurin kehittyessä. Jätteen mineralisoimiseksi on jo olemassa kaupallisia tekniikoita. Usein mineraalijätettä ja hiilidioksidia syntyy samassa paikassa, mikä helpottaa mineralisaation hyödyntämistä. Kiinteät prosesijätteet sisältävät myös luonnostaan paljon reaktiolle edullisia silikaatteja. (Hills et al., 2020)

Jätteiden hyödyntämistä tuotteissa hidastaa kuitenkin ihmisten vastustus ja lainsäädäntö. Teollisuuden sivuvirtoja, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa, käytetään jo laajasti. Niille on kuitenkin myönnetty sivutuotteen asema jätteen sijaan, mikä mahdollistaa laajemman käytön. Koska monen jätteen kanssa näin ei ole, ei niitä hyödynnetä samalla tavoin jatkojalostuksessa. Ratkaisuna tähän on joko määritelmän tai asenteiden muutos. Jätteiden käyttöä hiilidioksidin mineralisointiin voisi perustella monin syin. Näitä ovat esimerkiksi sidottu hiilidioksidi, uuden tuotteen käyttöarvo tai neitseellisten raaka-aineiden säästäminen. (Hills et al., 2020)

Rakentamiseen kuluu vuosittain 50 Gt kiviainesta ja markkinoiden uskotaan kehittyvän entisestään. Tämä luo myös suuren markkinaraon parannelluille hiilidioksidia sisältäville mineraaleille. Oikeilla kannustumilla kestäväillä mineralisoiduilla rakennusmateriaaleilla voi olla tulvaisuudessa suuri merkitys kiertotalousorientuneissa yhteiskunnissa, kuten Aasiassa ja Euroopassa. (Hills et al., 2020)

5.3 Euroopan Unioni

Euroopan Unioni on kehittämässä hiilidioksidin varastointia ja käyttöä edistävää lainsäädäntöä. Uudet säädökset liittyvät EU:n päätavoitteeseen: kasvihuonekaasujen nopeaan

vähentämiseen. EU:n tavoite onkin olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Ilmasto-
neutraalius tarkoittaa, että tuotetut päästöt ovat yhtä suuret tai pienemmät kuin luonto pystyy
sitomaan. Koska osa nyt tuotetuista päästöistä on vaikea muuttaa hiilineutraaleiksi, pitää
niiden poistamiseksi luoda keinoja. EU aloitti hiilidioksidinpoistojärjestelmien luomisen
vuonna 2022. Tällöin tehtiin ehdotus koko EU:n laajuisesta asetuksesta korkeatasoisten jär-
jestelmien sertifiointiksi. Ehdotus asettaa selkeät ja luotettavat EU-tason säännöt hiilidi-
oksidin poistamisen määrittämiselle, seurannalle ja todentamiselle. (Euroopan Komissio,
2024b)

Kaksi vuotta myöhemmin, vuoden 2024 helmikuussa, Euroopan parlamentti ja komissio saa-
vuttivat alustavan yhteisymmärryksen asetuksesta. Asetus sisältää kehotuksen pysyvälle hii-
lidioksidin poistolle, hiilidioksidin viljelylle ja hiilidioksidin varastoinnille tuotteisiin. Hiili-
dioksidin viljelyllä tarkoitetaan maatalouden menetelmiä, joilla lisätään hiilidioksidin imey-
tymistä ja varastointia maaperään. Asetuksen on määrä nopeuttaa ja helpottaa hiilidioksidin
poistoa ja maaperän sitovuutta EU:ssa. (Euroopan Komissio, 2024b)

6 Johtopäätökset

Ilmastonmuutos uhkaa ihmiskuntaa. Ilmakehän kohonneet hiilidioksidipitoisuudet nostavat maapallon lämpötilaa ja samalla aiheuttavat ilmaston muuttumisen. Ilmastonmuutosta on mahdollista hidastaa vähentämällä hiilidioksidipäästöjä ja poistamalla hiilidioksidia ilmakehästä. Poistettu hiilidioksidi on mahdollista varastoida monin keinoin, joista yksi on hiilidioksidin mineralisointi. Mineralisaatiota tapahtuu luonnossa sellaisenaan, mutta erittäin hitaasti. Hiilidioksidin varastointi mineralisaatiolla on pysyvää, mikä tekee siitä luotettavan pitkäaikaisvaraston. Reaktiotuotteina syntyneitä karbonaatteja on myös varastoinnin sijasta mahdollista hyödyntää tuotteissa, kuten sorassa ja betonissa.

Mineralisaation eri muodoilla on suuri hiilidioksidinsitomis- ja varastointipotentiali. Vaikka monet mineralisaatiotekniikoista ovat teoriassa toimivia ja prosessi tunnetaan hyvin, ei niitä ole otettu suuressa määrin käyttöön. Hiilidioksidia sisältävät tuotteet ovat myös usein kalliimpia. Toisaalta on mahdollista, että hiilidioksidi tekee tuotteista parempia luoden niille lisäarvoa. Mineralisaatio on kehittynyt viime aikoina nopeasti. Jotta varastointimuoto kehittyisi täysin mittoihinsa, tarvitaan ohjaavaa lainsäädäntöä, päästökauppoja, tukia ja tutkimusta. Mineralisaation tulevaisuus tullaan määrittelemään poliittisilla päätöksillä. Tällä hetkellä suurimmat ongelmakohteet ovat suuret kustannukset ja energian kulutus. Kannustimia on jo olemassa, mutta niiden volyyymiä on kasvatettava.

Tiedetään, että mineralisoimalla olisi mahdollista poistaa suuria määriä hiilidioksidia. On kuitenkin epäselvää, mikä mineralisaatiomuodoista on toimivin ja tehokkain. Tällä hetkellä eri mineralisaatiomuodot ovat myös eri kehitysasteilla. Jotta hiilidioksidin mineralisaatio saataisiin vartenotettavaksi osaksi hiilidioksidin varastointia, on siihen liittyvät riskit ja epävarmuuden ratkaistava. Ilmastonmuutoksen nopea kehittyminen ja sen aiheuttamat muutokset tekevät hiilidioksidin varastoinnin ja mineralisaation tutkimisesta ajankohtaista.

Lähteet

- Alalwan, H.A., Alminshid, A.H., 2021. CO₂ capturing methods: Chemical looping combustion (CLC) as a promising technique. *Sci. Total Environ.* 788, 147850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147850>
- Betoni, n.d. . Tietoa Betonista. URL <https://betoni.com/tietoa-betonista/> (Viitattu 2.6.24).
- Bui, M., Adjiman, C.S., Bardow, A., Anthony, E.J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P.S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L.A., Hallett, J.P., Herzog, H.J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G.C., Matuszewski, M., Metcalfe, I.S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D.M., Rubin, E.S., Scott, S.A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J.P.M., Webley, P., Wilcox, J., Mac Dowell, N., 2018. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy Environ. Sci.* 11, 1062–1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Carbon Engineering, n.d. Our Technology [Verkkoaineisto]. URL <https://carbonengineering.com/our-technology/> (Viitattu 3.9.24).
- Carbon8, n.d. Carbon8 [Verkkoaineisto]. URL <https://www.carbon8.co.uk/about> (Viitattu 7.2.24).
- Climeworks, 2024. Direct air capture: our technology to capture CO₂ [Verkkoaineisto]. URL <https://climeworks.com/direct-air-capture> (Viitattu 3.9.24).
- Climeworks, n.d.a. Orca: the first large-scale plant [Verkkoaineisto]. URL <https://climeworks.com/plant-orca> (Viitattu 1.10.24).
- Elfving, J., 2022. Hiilidioksidin kaappaus ilmasta - lupaava teknologia, joka vaatii kehitystyötä [Verkkoaineisto]. URL <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/hiilidioksidin-kaappaus-ilmasta-lupaava-teknologia-joka-vaatii-kehitystyota> (Viitattu 3.9.24).
- Euroopan Komissio, 2024a. Carbon capture, storage and utilisation [Verkkoaineisto]. URL https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/carbon-capture-storage-and-utilisation_en (Viitattu 3.5.24).
- Euroopan Komissio, 2024b. Climate action: Council and Parliament agree to establish an EU carbon removals certification framework.
- Fajardy, M., Greenfield, C., 2023. Bioenergy with Carbon Capture and Storage [Verkkoaineisto]. URL <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage> (Viitattu 3.5.23).
- Gkotsis, P., Peleka, E., Zouboulis, A., 2023. Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials. *Membranes* 13, 898. <https://doi.org/10.3390/membranes13120898>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J.C., Smith, P., Williams, C.K., 2019. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* 575, 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
- Hills, C.D., Tripathi, N., Carey, P.J., 2020. Mineralization Technology for Carbon Capture, Utilization, and Storage. *Front. Energy Res.* 8, 142. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00142>
- Hirvelä, J., 2020. Betonin hiilineutraali tulevaisuus [Verkkoaineisto]. URL <https://lujabetoni.fi/2020/05/15/betonin-hiilineutraali-tulevaisuus/> (Viitattu 1.22.24).

- IEA, 2022. CO2 storage resources and their development [Verkkoaineisto]. URL <https://www.iea.org/reports/co2-storage-resources-and-their-development> (Viitattu 3.9.24).
- Ilmasto-opas.fi, 2022. Mitä ilmastonmuutos on? [Verkkoaineisto]. URL 1. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/maailman-kasvihuonekaasupaastot-kasvavat-yha> (Viitattu 2.24.24).
- Ilmasto-opas.fi, n.d. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku [Verkkoaineisto]. URL <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku> (Viitattu 3.7.23a).
- Ilmasto-opas.fi, n.d. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi.
- Ilmatieteen laitos, n.d. IPCC tukee ilmastopoliittista päätöksentekoa [Verkkoaineisto]. URL <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ipcc-ilmastopaneeli> (Viitattu 2.25.24).
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jagoutz, O., Krol, A., 2023. Enhanced Rock Weathering [Verkkoaineisto]. URL <https://climate.mit.edu/explainers/enhanced-rock-weathering>
- Juhász, I., Halász, G. (Eds.), 2010. Carbon capture and greenhouse gases, Climate change and its causes, effects and prediction series. Nova Science Publishers, New York.
- Lindsey, R., Dahlman, L., 2024. Climate Change: Global Temperature [Verkkoaineisto]. URL <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Met Office, n.d. Carbon cycle [Verkkoaineisto]. URL <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate/climate-explained/carbon-cycle> (Viitattu 3.8.24).
- Metz, B., Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, 1. publ. ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- National Geographic, 2024. Weathering [Verkkoaineisto]. URL <https://education.national-geographic.org/resource/weathering/> (Viitattu 3.8.24).
- Nationalgrid, 2024. What is carbon capture and storage? [Verkkoaineisto]. URL <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-ccs-how-does-it-work> (Viitattu 2.7.24).
- Neeraj, Yadav, S., 2020. Carbon storage by mineral carbonation and industrial applications of CO2. Mater. Sci. Energy Technol. 3, 494–500. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.03.005>
- NOAA, 2023. What is the carbon cycle? [Verkkoaineisto]. URL <https://oceanservice.noaa.gov/facts/carbon-cycle.html#transcript> (Viitattu 3.8.23).
- Olajire, A.A., 2013. A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO2. J. Pet. Sci. Eng. 109, 364–392. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>
- Olfe-Kräutlein, B., Strunge, T., Chanin, A., 2021. Push or Pull? Policy Barriers and Incentives to the Development and Deployment of CO2 Utilization, in Particular CO2 Mineralization. Front. Energy Res. 9, 742709. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.742709>
- Ostovari et al., 2022. A climate-optimal supply chain for CO2 capture, utilization, and storage by mineralization.
- Raworth, K., 2018. Donitsitaloustiede : seitsemän tapaa ajatella kuin 2000-luvun taloustieteilijä. Terra Cognita, Helsinki.

- Riebeek, H., 2011. The Carbon Cycle [Verkkoaineisto]. URL <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle> (Viitattu 3.8.24).
- Riedl, D., Byrum, Z., Li, S., Pilorgé, H., Psarras, P., Liebling, K., 2023. 5 Things to Know About Carbon Mineralization As a Carbon Removal Strategy.
- Romano, M.C., Spinelli, M., Campanari, S., Consonni, S., Cinti, G., Marchi, M., Borgarello, E., 2013. The Calcium Looping Process for Low CO₂ Emission Cement and Power. *Energy Procedia* 37, 7091–7099.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.645>
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., Maroto-Valer, M.M., 2014. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chem Soc Rev* 43, 8049–8080.
<https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>
- Soletair Power, n.d. Turning Buildings into Carbon Sinks [Verkkoaineisto]. URL <https://www.soletairpower.fi/> (Viitattu 3.9.24).
- Teir, S., Arasto, A., Tsupari, E., Koljonen, T., Kärki, J., Kujanpää, L., Lehtilä, A., Nieminen, M., 2011. Hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin (CCS:n) soveltaminen Suomen olosuhteissa.
- Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Arasto, A., Tourunen, A., Kärki, J., Nieminen, M., Aatos, S., 2009. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS).
- Tuohiniitty, H., 2023. Hiilidioksidista sementin korvaaja [Verkkoaineisto]. URL <https://bioenergialehti.fi/2023/03/29/hiilidioksidista-sementin-korvaaja/> (Viitattu 1.22.24).
- UNEP, 2021. Emissions Gap Report 2021 [Verkkoaineisto]. URL <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021> (Viitattu 2.24.24).
- VTT beyond the obvious, 2022. Carbonaide tähtää hiilinegatiiviseen betoniteknologiaan [Verkkoaineisto]. URL <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/carbonaide-tahtaa-hiilinegatiiviseen-betoniteknologiaan>