



## **SUOMEN ILMASTOTAVOITTEET JA TEKNISET HIILINIELUT**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

2025

Olivia Isolauri

Tarkastaja: Tutkijatohtori Laura Kainiemi

Ohjaaja: Nuorempi tutkija Katariina Buure

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Ympäristötekniikka

Olivia Isolauri

### **Suomen ilmastotavoitteet ja tekniset hiilinielut**

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2025

28 sivua, 6 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijatohtori Laura Kainiemi

Ohjaaja: Nuorempi tutkija Katariina Buure

Avainsanat: Tekniset hiilinielut, hiilidioksidin talteenotto, päästövähennystavoitteet, ilmastonmuutos

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan teknisten hiilinielujen roolia Suomen ilmastotavoitteissa sekä niiden merkitystä päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Työn tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta, ja työn teoria sekä tulokset perustuvat aiemmin tehtyihin tutkimuksiin. Teoriaosa käsittelee Suomen ilmastopolitiikkaa ja teknisiä hiilinieluja. Tulos osassa tarkastellaan teknisten hiilinielujen potentiaalia Suomessa ja merkitystä päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa.

Teknologiset ratkaisut, kuten hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS), hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö (CCU) ja bioenergiaan yhdistetty hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (BECCS), tarjoavat mahdollisuuden vähentää hiilidioksidin määrää ilmakehässä ja siten auttaa päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Suomessa on merkittävää potentiaalia erityisesti bioperäisten päästöjen talteenotossa.

Tuloksena havaittiin, että teknisillä hiilinieluilla on merkittävä rooli päästöjen vähentämisessä, mutta niillä ei voida korvata luonnollisia hiilinieluja tai muita päästövähennystoimia. Teknisiä hiilinieluja voidaan pitää enemmänkin täydentävänä toimena muiden toimien rinnalla. Teknisten hiilinielujen laajemman käyttöönoton edistämiseksi tarvitaan taloudellisia kannusteita.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Environmental Technology

Olivia Isolauri

### **Finland's climate targets and technical carbon sinks**

Bachelor's thesis

2025

28 pages, 6 figures and 1 table

Examiner: Post-doctoral researcher Laura Kainiemi

Supervisor: Junior researcher Katariina Buure

Keywords: Technical carbon sinks, carbon dioxide capture, emission-reduction targets, climate change

This bachelor's thesis examines the role of technological carbon sinks in Finland's climate targets and their significance in achieving emission reduction goals. The research method used is literature review, and both the theoretical framework and results are based on previous studies. The theoretical section discusses Finland's climate policy and technological carbon sinks. The results section examines the potential of technological carbon sinks in Finland and their importance in achieving emission reduction targets.

Technological solutions such as Carbon Capture and Storage (CCS), Carbon Capture and Utilization (CCU), and Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) provide an opportunity to reduce the amount of carbon dioxide in the atmosphere and thus contribute to achieving emission reduction goals. Finland has significant potential especially in capturing biogenic emissions.

As a result, it was found that technological carbon sinks play a crucial role in reducing emissions, but they can't replace natural carbon sinks or other emission reduction measures. Instead, they should be considered a complementary measure alongside other actions. To promote the broader adoption of technological carbon sinks, financial incentives are needed.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Symbolit

°C Celsiusaste

### Lyhenteet

BECCS Bioenergian käyttäminen hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin kanssa

CCS Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi

CCU Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen

DAC Suora hiilidioksidin talteenotto ilmasta

IPCC Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli

LULUCF Maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous

OAE Meriveden alkaliniteetin lisääminen

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
1.1	Työn tavoite ja tutkimuskysymykset .....	7
1.2	Tutkimusmenetelmät .....	7
2	Suomen ilmastopolitiikka .....	8
2.1	Suomen ilmastotavoitteet.....	9
2.2	EU-lainsäädäntö ja kansainväliset sitoumukset .....	10
3	Tekniset hiilinielut .....	12
3.1	CCS.....	13
3.2	CCU .....	14
3.3	BECCS.....	15
3.4	Muut.....	16
3.5	Teknisten hiilinielujen kustannukset .....	17
4	Tekniset hiilinielut Suomen ilmastotavoitteissa .....	20
4.1	Teknisten hiilinielujen merkitys tavoitteiden saavuttamisessa .....	20
4.2	Teknisten hiilinielujen potentiaali Suomessa .....	21
5	Johtopäätökset .....	22
	Lähteet .....	23

# 1 Johdanto

Ilmastonmuutos on yksi nykyajan suurimpia haasteita ihmiskunnalle, ja sen torjuntaan tarvitaan sekä kansainvälisiä, että kansallisia toimia. Ilmaston muuttumiseen vaikuttaa ilmaston luonnollinen vaihtelu, joka aiheuttaa muutoksia ilmastossa kaiken aikaa sekä pitkällä että lyhyellä aikavälillä (Wong 2016, 5). Nykyinen ihmisen toiminnan aiheuttama ilmaston lämpeneminen on kuitenkin poikkeuksellisen nopeaa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö, metsien hakkuut ja muu maankäyttö ovat merkittäviä tekijöitä maapallon lämpötilan muutoksessa ja ilmastonmuutoksen kiihtymisessä. Nämä ihmisen toiminnan aiheuttamat päästöt lisäävät luonnollisten kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä ja sen seurauksena nopeuttavat maapallon ilmaston lämpenemistä. (Euroopan komissio 2025)

Hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen pitoisuuksien lisääntymisen ilmakehässä uskotaan johtuvan suurelta osin ihmiskunnan toiminnasta, ja sen katsotaan olevan merkittävä syy ilmastonmuutokseen (Abdullahi et al. 2018). Hiilidioksidi on ihmisen toiminnan aiheuttamista kaasuista merkittävin ilmastonmuutoksen kannalta, sillä se pysyy ilmakehässä pitkään, jopa vuosikymmeniä tai vuosisatoja. Vuoteen 2020 mennessä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli kasvanut 48 prosenttia verrattuna esiteolliseen aikaan. Hiilen, öljyn ja kaasun poltto aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä, ja samalla metsien hakkuut vähentävät hiilen sidontaa ja vapauttavat puihin sitoutuneen hiilen takaisin ilmakehään. (Euroopan komissio 2025)

Vuonna 2018 maankäyttösektori muuttui ensimmäistä kertaa hiilinielusta nettopäästölähteeksi. Metsät ovat olleet sektorin merkittävin nettonielu, mutta puuston kasvun hidastumisen ja korkeiden hakkuiden myötä sektorin päästöt ovat ylittäneet sen poistumat. (Siikavirta et al. 2024, 27)

IPCC:n viimeisimmän raportin mukaan pysyvien päästövähennysten saavuttaminen vaatii nopeita ja laaja-alaisia ratkaisuja kaikilla yhteiskunnan sektoreilla. Tällaisessa muutoksessa teknologiset ratkaisut nähdään keskeisessä roolissa päästöjen vähentämisessä. (IPCC 2023, 28)

## 1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia teknisiä hiilinieluja ja sitä, miten ne näkyvät Suomen ilmastotavoitteissa. Työssä selvitetään myös, ovatko tekniset hiilinielut välttämättömiä tavoitteiden saavuttamiseksi ja voidaanko tavoitteisiin päästä muilla keinoilla, kuten luonnollisilla hiilinieluilla. Suomi on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita ilmastomuutoksen hillinnän suhteen ja näiden tavoitteiden saavuttaminen edellyttää nykyisiä toimia tehokkaampia päästövähennyksiä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022, 12).

Tämän kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitä tekniset hiilinielut tarkoittavat?
- Millä tavalla tekniset hiilinielut näkyvät Suomen ilmastotavoitteissa?
- Ovatko ne tarpeellisia ilmastotavoitteiden saavuttamisen kannalta vai olisiko muita keinoja?

## 1.2 Tutkimusmenetelmät

Tämä kandidaatintutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnetään olemassa olevaa tietoa aiheesta. Lähteinä on käytetty tieteellisiä julkaisuja, raportteja ja verkkodokumentteja, joita on löydetty luotettavista lähteistä, kuten Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston tiedekirjaston tietokannasta, LUT Primosta.

Työn teoriaosuudessa käsitellään teknisten hiilinielujen käsitettä ja erilaisia teknologioita hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä. Lisäksi teoriaosuudessa perehdytään poliittisiin toimiin, joilla ilmastomuutosta pyritään hillitsemään Suomessa. Tulos osiossa tarkastellaan miten tekniset hiilinielut näkyvät Suomen ilmastotavoitteissa ja mikä on niiden merkitys tavoitteiden saavuttamisessa.

## 2 Suomen ilmastopolitiikka

Tehokas ilmastonmuutoksen hillintä vaatii poliittista sitoutumista, monitasoista hallintoa sekä institutionaalisia puitteita, lakeja, toimintatapoja ja strategioita. Kyseisten toimien onnistuminen vaatii myös riittävää rahoitusta, selkeitä tavoitteita ja yhteistyötä eri politiikka-alueilla. Monia keinoja ilmastonmuutoksen hillintään ja siihen sopeutumiseen liittyen on jo käytössä onnistuneesti, mutta laajentamalla ja soveltamalla niitä eri maiden omien tarpeiden mukaan, nämä keinot voisivat olla vielä merkittävämpiä päästöjen vähentäjiä ja parantaa varautumista ilmastonmuutokseen. (IPCC 2023, 110)

Ilmastopolitiikan avulla pyritään vähentämään kasvihuonekaasujen pitoisuuden kasvua ilmakehässä ja edistää sopeutumista ilmastonmuutokseen. Nykyisen ilmastopolitiikan keskeisiä keinoja päästövähennyksien saavuttamiseen ovat päästökauppajärjestelmät, päästövähennystavoitteet ja hiiliverot. Jotta ilmastopolitiikka pystytään toteuttamaan mahdollisimman tehokkaasti, päästövähennystoimien tulee perustua selkeisiin tavoitteisiin ja luoda kannustimia päästöjen huomioimiseksi. (Lintunen et al. 2016, 158)

Kansainväliset ilmastosopimukset ja EU:n ilmastopolitiikka ohjaavat Suomen ilmastotoimia. YK:n ilmastopuitesopimus, Pariisin ilmastosopimus, Kioton pöytäkirja sekä EU:n ilmastolaki ovat keskeisiä asiakirjoja globaalissa ilmastopolitiikassa. (Ilmasto-opas 2024)

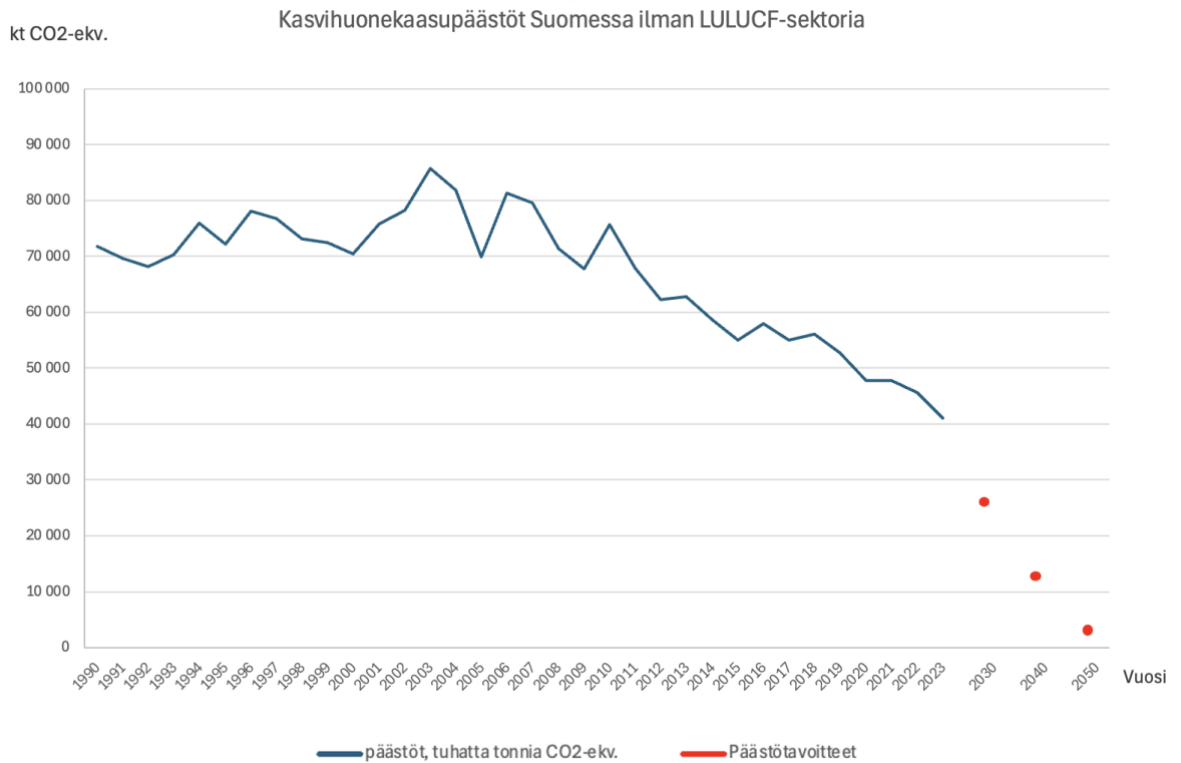
Kansallisella tasolla Suomen ilmastopolitiikkaa ohjaa ilmastolaki, joka asettaa tavoitteet ja suunnitelmat ilmastonmuutoksen hillintään sekä seuraa näiden täytäntöönpanoa. Suomen ensimmäinen ilmastolaki astui voimaan vuonna 2015, mutta heinäkuussa 2022 voimaan astui uudistettu ilmastolaki. Ilmastolain ja sen mukaisen ilmastopolitiikan suunnittelujärjestelmän avulla varmistetaan, että Suomen ilmastotoimet ovat riittäviä ja oikeudenmukaisia. Ympäristöministeriön vuosittain julkaisemassa ilmastovuosikertomuksessa seurataan tavoitteiden saavuttamista ja toimien riittävyyttä. (Ilmastolaki 2022/423)



## 2.1 Suomen ilmastotavoitteet

Ilmastolain mukaan Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali viimeistään vuonna 2035, eli ihmisen toiminnasta aiheutuvat päästöt saavat olla enintään yhtä suuret kuin nielujen aikaansaamat poistumat. (Ilmastolaki 2022/423) Tämän jälkeen nielujen aikaansaamien poistumien on tarkoitus ylittää päästöjen määrä, jolloin Suomi olisi hiilinegatiivinen. Tällä hetkellä Suomen päästöt ovat 2–3 kertaa suuremmat kuin hiilinielut (Suomen ympäristökeskus 2023). Hiilinieluja tulisi siis vahvistaa ja päästöjä vähentää huomattavasti, jotta tavoitteisiin voidaan päästä.

Suomi tavoittelee ihmisen toiminnasta johtuvien taakanjako- ja päästökaupparektorin yhteenlaskettujen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä siten, että vuoteen 2030 mennessä ne ovat pienentyneet vähintään 60 prosenttia ja vuoteen 2040 mennessä 80 prosenttia, kun verrataan vuoteen 1990. Vuoteen 2050 mennessä päästöjen tulisi olla 90–95 prosenttia pienemmät. (Ilmastolaki 2022/423) Petteri Orpon hallitusohjelmaan on kirjattu, että Suomi sitoutuu ilmastolain tavoitteisiin ja teknisten hiilinielujen käyttöönottoa edistetään osana päästövähennystoimia (Valtioneuvosto 2023). Kuvassa 1 esitetään toteutuneet päästöt edellisiltä vuosilta sekä tavoitteet tuleville vuosille.



**Kuva 1.** Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuosina 1990–2023 ja päästövähennystavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050. (Tilastokeskus 2025)

Vuonna 2023 Suomen kasvihuonekaasupäästöt ilman LULUCF-sektoria, eli maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätaloussektoria olivat ennakkotietojen mukaan 40,9 Mt CO<sub>2</sub>e. Vuoden 2005 jälkeen kokonaispäästöt ilman LULUCF-sektoria ovat vähentyneet 42 %, eli keskimäärin 2 % vuodessa (Ympäristöministeriö 2024). 2 % vähennykset vuosittain eivät kuitenkaan riitä päästövähennystavoitteiden saavuttamiseen.

## 2.2 EU-lainsäädäntö ja kansainväliset sitoumukset

Suomen ilmastopolitiikka on vahvasti sitoutunut EU:n lainsäädäntöön ja kansainvälisiin sitoumuksiin, jotka ohjaavat jäsenvaltioiden toimia. Yhdistyneet kansakunnat (YK) on kansainvälisellä tasolla merkittävin ilmastopolitiikan määrittäjä. YK:n ilmastomuutosta koskeva puitesopimus on kansainvälisen ilmastopolitiikan perusta ja sen avulla pyritään tuomaan ihmiskunnan aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt turvalliselle tasolle. Suomi on yksi 197 osapuolesta, joka on sitoutunut puitesopimukseen. (Ympäristöministeriö 2025)

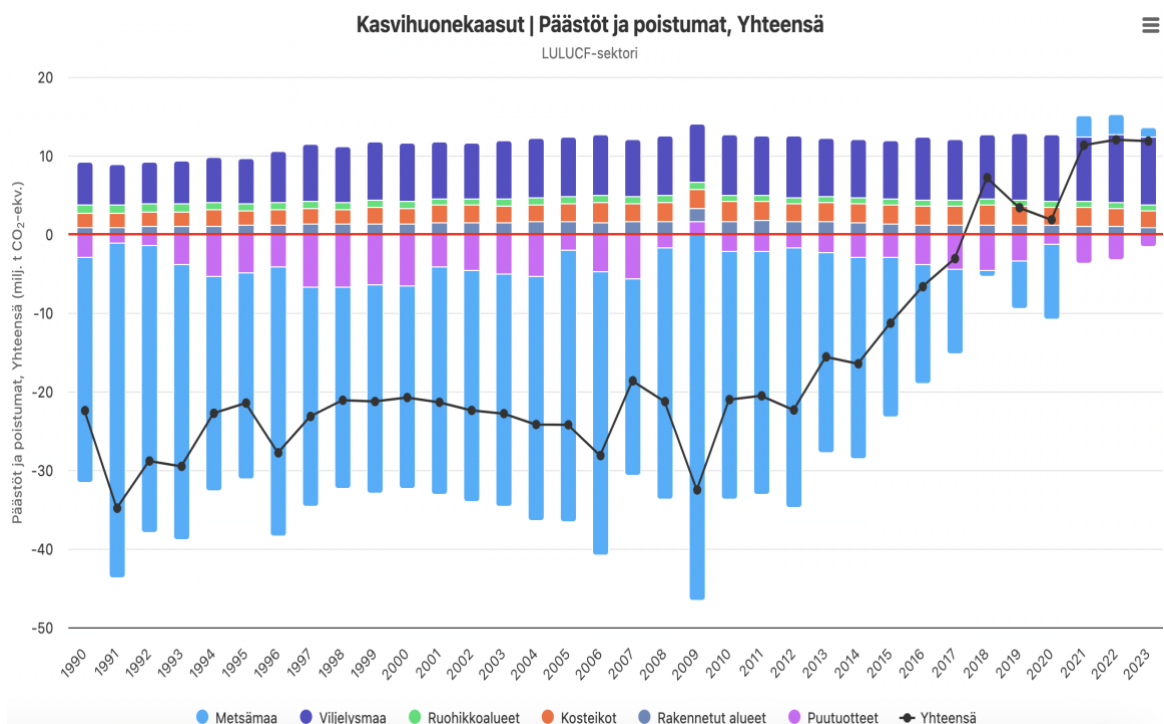
Sopimus ei aseta sitovia päästövähennystavoitteita, mutta se luo yleisiä puitteita, joiden pohjalta solmitaan kansainvälisiä ilmastopimuksia. Sopimuksen mukaan osapuolten tulisi raportoida ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä sekä nielujen aikaansaamista poistumista käyttäen vertailukelpoisia menetelmiä. Lisäksi on laadittava toimia, joilla heikennetään ilmastomuutosta sekä edistetään nielujen ja varstojen hoitoa. (FINLEX 61/1994)

EU:n ilmastopolitiikalla pyritään saavuttamaan ilmastoneutraalius EU-tasolla vuoteen 2050 mennessä ja tämän jälkeen tavoittelemaan negatiivisia päästöjä. Päästökauppasektorin päästöjä tulisi vähentää 62 prosenttia ja EU-tasolla taakanjakosektorin päästöjä 40 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. Suomelle määritelty taakanjakosektorin päästövähennysvelvoite on vähintään 50 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. Suomi on kuitenkin asettanut itselleen kunnianhimoisempia päästövähennystavoitteita. (Siikavirta et al. 2024, 18)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (2018/841) LULUCF-sektoria, eli maankäyttöä, maankäytön muutosta ja metsätaloussektoria koskien sitoo EU:n jäsenmaita päästövähennyksiin ja hiilinielujen vahvistamiseen LULUCF-sektorilla. EU:n jäsenmaat vastaavat siitä, että LULUCF-sektorilla ei synny nettopäästöjä, tai jos niitä syntyy, tulisi ne kompensoida muilla toimilla. Jäsenvaltioiden tulee myös raportoida säännöllisesti, jotta tavoitteiden toteutumista voidaan seurata. (EU 2018/841)

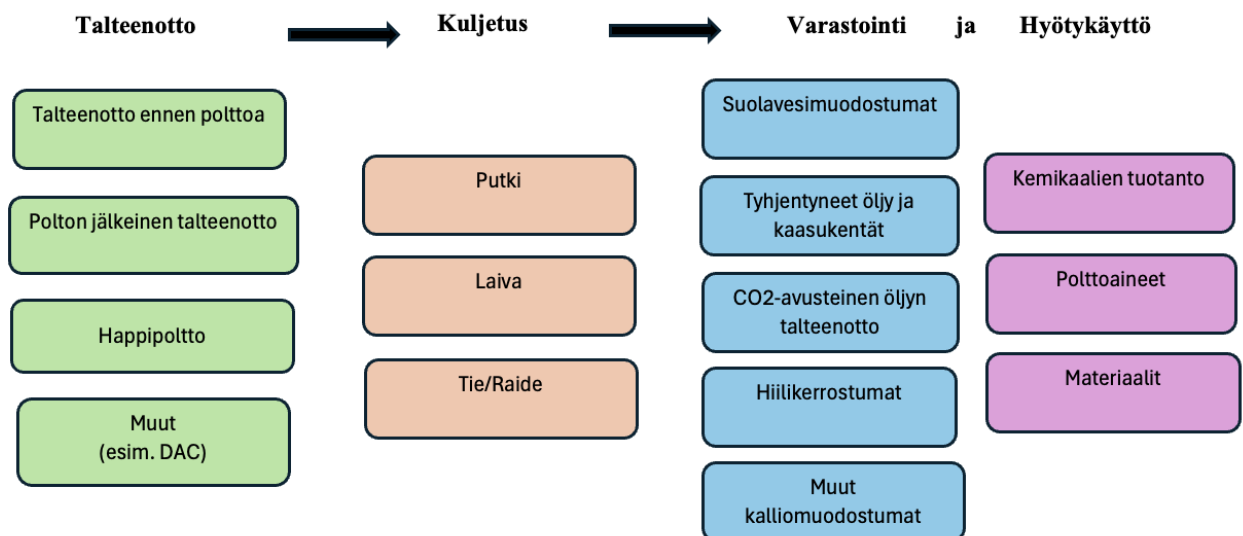
### 3 Tekniset hiilinielut

Ilmastonmuutosta vastaan taistelu vaati päästövähennysten lisäksi myös muita toimia. Hiilidioksidia on pystyttävä poistamaan ilmakehästä suuria määriä, jotta ilmaston lämpeneminen saadaan pysymään alle 2 °C. (VTT 2025) Suomessa metsät ovat ylivoimaisesti tärkein hiilinielu, mutta niiden kyky sitoa hiilidioksidia on heikentynyt jo vuosien ajan. Hiilensidonnan heikentyminen on seurausta korkeista hakkuumääristä, ongelmallisista hakkuutavoista sekä puuston alentuneesta kasvusta. Kuvasta 2 nähdään, että vuonna 2018 LULUCF-sektori oli ensimmäistä kertaa nettonielun sijaan nettopäästölähde ja vuonna 2021 metsät siirtyivät nettonielusta päästölähteeksi. Ilmastopolitiikan suunnittelussa on kuitenkin oletettu maankäyttösektorin nettonielun olevan noin -21 Mt CO<sub>2</sub>e vuonna 2035. Tämä tarkoittaisi, että Suomen kokonaispäästöt voisivat olla enintään 21 Mt CO<sub>2</sub>e



**Kuva 2.** LULUCF-sektorin kasvihuonekaasupäästöt ja poistumat (Luonnonvarakeskus 2025)

Teknisillä hiilinieluilla tarkoitetaan ihmisten kehittämiä teknologioita, joiden avulla hiilidioksidia poistetaan ilmakehästä ja varastoidaan pysyvästi tai käytetään hyödyksi erilaisiin tuotteisiin. (Suomen ilmastopaneeli 2023) Hiilinielut ovat keskeinen tekijä ilmastonmuutoksen torjumisessa, mutta ne eivät kuitenkaan korvaa päästöjen vähennystoimia. Päästöjen vähennystoimilla ennaltaehkäistään ilmastonmuutoksen etenemistä ja hiilinieluilla poistetaan ylimääräistä hiilidioksidia ilmakehästä. Teknisten hiilinielujen merkitys on kasvanut ja kasvaa edelleen jatkuvasti, koska uusia nieluja tarvitaan ilmastonmuutoksen torjumiseksi. (Leinonen, 2023) Teknisten hiilinielujen kehitys on vielä alkuvaiheessa ja ne ovat toistaiseksi vähän käytettyjä. Yleisimpiä teknologisia hiilinieluratkaisuja ovat hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS) sekä hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö (CCU). CCS ja CCU teknologioiden vaiheet on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3.** CCS ja CCU teknologiat. (Ringrose 2020)

### 3.1 CCS

Hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla eli CCS-tekniikoilla (eng. Carbon Capture and Storage) tarkoitetaan erilaisia menetelmiä teollisuuden aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ja varastoinniseksi. (Bandyopadhyay 2014) Hiilidioksidin talteenotolla

viitataan pääasiassa päästöjen poistamiseen voimalaitoksista ja muista teollisuuslaitoksista, jotka toimivat kaasupäästöjen pistelähteinä. Hiilidioksidia voidaan sitoa myös muista lähteistä kuten ajoneuvoista tai suoraan ilmakehästä, mutta toistaiseksi näillä keinoilla vältetyt päästöt eivät ole kovin merkittäviä. (Ringrose 2020, 7) Kuvassa 3 on esitetty CCS-tekniologioiden kolme päävaihetta, jotka ovat talteenotto, kuljetus ja varastointi.

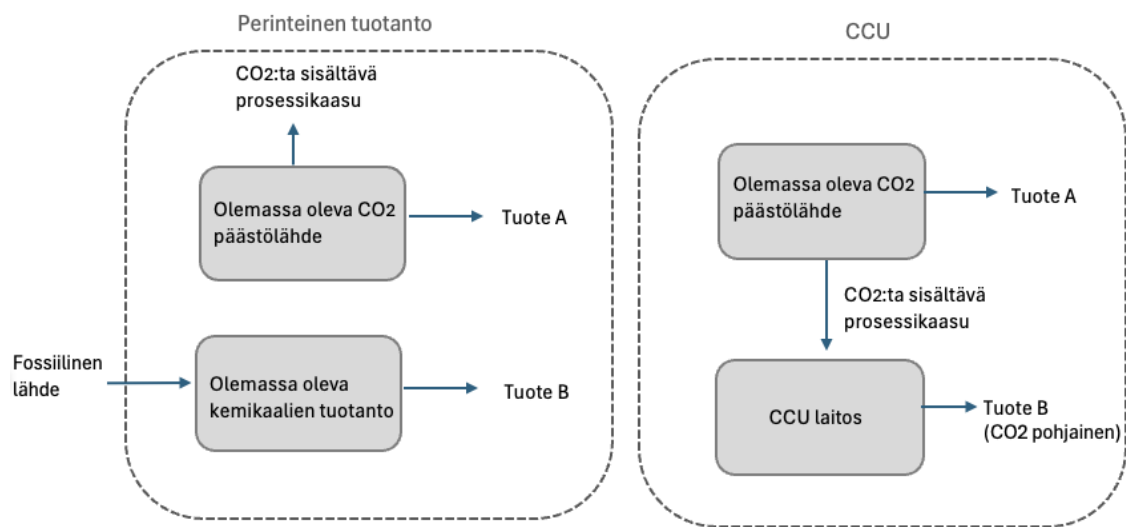
Talteenottotekniikat voidaan jakaa kolmeen pääryhmään, jotka ovat talteenotto ennen polttoa, polton jälkeinen talteenotto ja happipolttu. Talteenotossa ennen polttoa hiilidioksidia poistetaan kaasuseoksista, missä on suuri CO<sub>2</sub>-pitoisuus, esimerkiksi lannoiteteollisuuden prosesseissa syntyvistä sivutuotteista. Polton jälkeinen talteenotto viittaa hiilidioksidin poistamiseen palamiskaasuista. Happipolttu perustuu typen poistamiseen ennen polttoa, jolloin saadaan puhtaampaa hiilidioksidia. (Ringrose 2020, 7-8)

Hiilidioksidin varastoinnilla tarkoitetaan pitkäaikaista säilömistä, jolloin hiilidioksidi pysyy pois ilmakehästä tuhansien vuosien ajan. Hiilidioksidin varastoinnilla ei yksin pystytä ratkaisemaan ongelmaa, mutta sen avulla voidaan hidastaa ilmaston lämpenemistä. Varastointitapoja on useita, mutta yleisimpiä ovat suolavesimuodostumat, tyhjentyneet öljy- ja kaasukentät, CO<sub>2</sub>-avusteinen öljyn talteenotto ja kalliomuodostumat. (Ringrose 2020, 7) Suomessa ei ole sopivaa geologiaa hiilidioksidin pysyvään varastointiin, joten lupaavimmat varastointikohteet ovat Pohjanmerellä (Kujanpää et al. 2023b, 14). Hiilidioksidin varastoinnissa on edistytty viimeisten vuosien aikana, mutta haasteena ovat edelleen esimerkiksi vuotojen havaitseminen sekä varastoinnin seuranta ja varmennus (Bui et al. 2018, 1147).

### 3.2 CCU

CCU-tekniikoilla eli hiilidioksidin talteenotolla ja hyödyntämisellä tarkoitetaan hiilidioksidipäästöjen vähentämistä ottamalla ilmasta talteen hiilidioksidia ja hyödyntämällä sitä uudelleen erilaisissa tuotteissa. (Goel & Sudhakar 2017, 14–15) CCS-tekniikoiden tavoin myös CCU jaetaan kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäinen on talteenotto, toinen kuljetus ja kolmas vaihe hyödyntäminen. Talteenotto voi tapahtua esimerkiksi suoraan ilmasta DAC (Direct Air Capture) -tekniologialla tai teollisuuslaitosten päästölähteistä. Kuva 3 havainnollistaa CCS-tekniikoiden lisäksi CCU-tekniikan eri vaiheet.

Yleisimmät hiilidioksidin hyötykäyttökohteet ovat kemikaalien, materiaalien ja polttoaineiden tuotanto. Kuvassa 4 on vertailtu perinteistä tuotantotapaa ja CCU-tuotantotapaa. CCU-tuotannossa hiilidioksidi, joka normaalisti päästettäisiin ilmakehään, hyödynnetään CCU-laitoksen raaka-aineena. Hiilidioksidista valmistettavat tuotteet voivat olla esimerkiksi polttoaineita, kemikaaleja tai rakennusmateriaaleja.



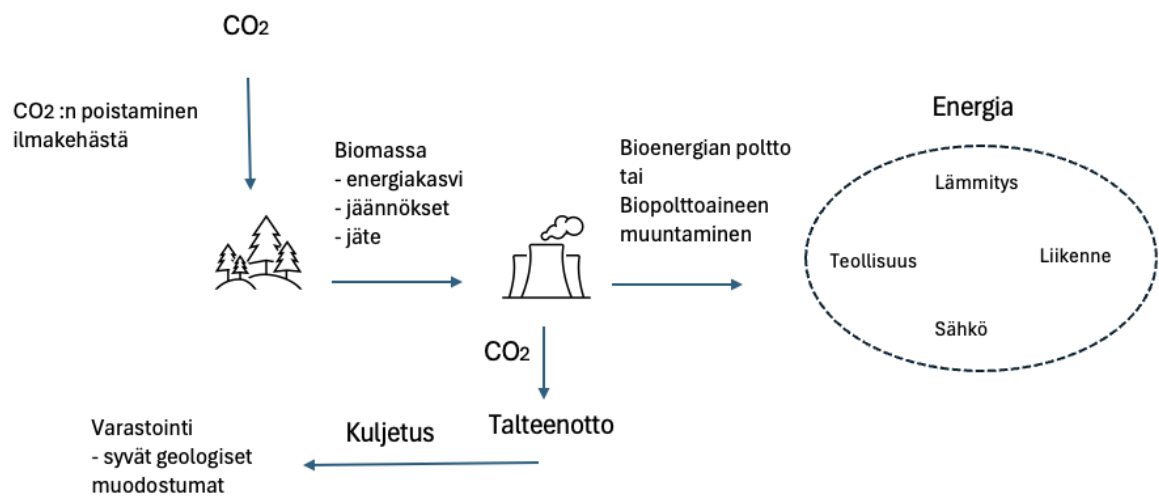
**Kuva 4.** Perinteisen ja CCU-tuotannon vertailu (Garcia-Garcia et al. 2021, 1000)

CCU:n potentiaalia hiilidioksidipäästöjen vähentäjänä pidetään hyvin rajallisena, kun verrataan CCS-tekniikoihin. Garcia-Garcia et al. (2021) mukaan CCU-tekniologian käyttöön liittyy haasteita, koska prosessi voi aiheuttaa muita ympäristövaikutuksia, kuten happamoitumista. Lisäksi prosessi vaatii suuren määrän energiaa hiilidioksidin talteenottoon ja lopputuotteen valmistukseen. CCU kuitenkin mahdollistaa hiilidioksidin kierrättämisen uusien tuotteiden avulla ja samalla vähentää fossiilisten resurssien käyttöä, kun verrataan perinteisiin tuotantomenetelmiin. (Garcia-Garcia et al. 2021, 996–1000)

### 3.3 BECCS

BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi bioenergian tuotannossa on hiilidioksidin poistomenetelmä, missä hiilidioksidia

otetaan talteen ja varastoidaan pysyvästi. Prosessissa biomassasta tuotetaan energiaa ja vapautunut hiilidioksidi otetaan talteen, kuljetetaan ja varastoidaan geologisesti. Prosessissa käytettävä biomass, kuten puut ovat sitoneet kasvaessaan hiilidioksidia ilmakehästä, joten lopputuloksena voidaan saada negatiivisia päästöjä. (Rosa et al. 2021; Consoli 2019) Kuva 5 havainnollistaa prosessin.



**Kuva 5.** BECCS kaavio (Consoli 2019).

BECCS-tekniikan rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä on merkittävä, koska sen avulla pystytään edistämään hiilinegatiivisuutta samalla kun tuotetaan bioenergiaa, joka voi korvata fossiilisista polttoaineista saatavaa energiaa. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) mukaan vuoteen 2100 mennessä BECCS-tekniikan avulla voisi poistaa ilmakehästä 3,3 gigatonnia hiilidioksidia vuodessa. (Consoli 2019)

### 3.4 Muut

Edellä mainittujen teknologioiden lisäksi on olemassa myös muita teknisiä hiilinieluja, jotka poistavat hiilidioksidia ilmakehästä eri tavoilla. Näitä ovat esimerkiksi biohiili, tehostettu rapautuminen ja meriveden alkaliniteetin lisääminen. Nämä perustuvat luonnollisiin prosesseihin, joita tehostetaan, jotta hiilidioksidia sitoutuu enemmän.



Biohiiltä tuotetaan pyrolyysillä, missä orgaaninen biomassa hajoaa korkeassa lämpötilassa hapettomissa oloissa. Biohiilen hidas hajoaminen, pinta-ala, huokoisuus, funktionaalinen ryhmä ja mineraalipitoisuus tekevät siitä tehokkaan hiilen sitojan ja kasvihuonekaasujen vähentäjän. Biohiiltä voidaan hyödyntää hiilinieluna erityisesti maaperässä, missä se säilyy pitkäaikaisesti ja estää biomassan hajoamisesta vapautuvan hiilidioksidin pääsyn ilmakehään. (Chhimwal et al. 2022, 3–11) Biohiiltä voidaan hyödyntää myös rakennusmateriaaleissa, kuten betonissa, mikä auttaa rakennusten hiilensidontaa ja samalla vähentää niiden ympäristövaikutuksia, koska rakennusmateriaaleja tarvitaan vähemmän (Pandey et al. 2022, 304).

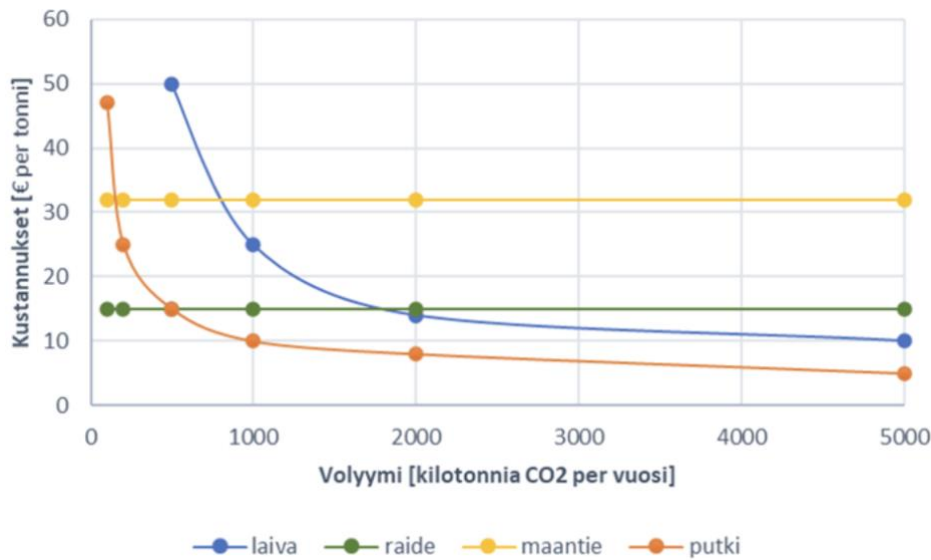
Tehostettu rapautuminen on hiilidioksidin poistostrategia, missä hienoksi jauhettua silikaattimineraalia levitetään esimerkiksi pelloille tai metsäalueille, jossa se reagoi ilmakehän hiilidioksidin kanssa muuttaen sen vesiliukoiseksi bikarbonaatti- tai karbonaatti-ioneiksi. (Knapp et al. 2023)

Meret ovat lupaavia geokemiallisia varastoja hiilidioksidille, ja meriveden alkaliniteetin lisäämistä (OAE) pidetään lupaavana hiilidioksidin poistomenetelmänä, koska merivesi pystyy varastoimaan hiilidioksidia pitkiksi ajoiksi. OAE-menetelmät toimivat joko lisäämällä alkaliniteettia suoraan meriveteen tai kiihdyttämällä mineraalien rapautumista. (Wang et al. 2022, 2)

### 3.5 Teknisten hiilinielujen kustannukset

Teknisten hiilinielujen kustannukset vaihtelevat käytössä olevan teknologian, hiilidioksidin määrän ja sijainnin mukaan. Hiilidioksidin talteenottovaiheessa kustannukset syntyvät hiilidioksidin erottamiseen tarvittavien laitteiden hankinta- ja käyttökustannuksista sekä energian käytöstä. Laitoksen kokoluokka ja hiilidioksidin osapaine vaikuttavat merkittävästi talteenoton kustannuksiin ja kustannukset ovat suuria erityisesti silloin, kun hiilidioksidipitoisuus päästölähteessä on matala. (Kujanpää et al. 2023b, 11–12)

Hiilidioksidin kuljetuskustannukset riippuvat kuljetustavasta, etäisyydestä ja kuljetettavan hiilidioksidin määrästä. Kuvassa 6 on vertailtu eri kuljetusmuotojen kustannuksia volyymin suhteen 200 km kuljetusetäisyydellä.



**Kuva 6.** Kuljetuskustannukset volyymin suhteen 200 km etäisyydellä (Saarijärvi 2023)

Putkikuljetus on yksi lupaavimmista tavoista kuljettaa hiilidioksidia ja sen arvioidaan olevan sekä kustannustehokas, että ympäristöystävällinen, kun kuljetettava määrä on suuri. Kuten kuvasta 6 nähdään, putkikuljetuksen kustannukset ovat alhaisimmat volyymin ollessa vähintään 500 kilotonnia hiilidioksidia per vuosi. Myös laivakuljetuksen on arvioitu olevan lupaava vaihtoehto, kun kuljetettava hiilidioksidimäärä on suuri. Maantie- ja raidekuljetuksessa volyymi ei vaikuta juurikaan kustannuksiin. (Saarijärvi 2023)

Suomen ilmastopaneelin raportissa tarkasteltiin kustannuksia hiilidioksidin geologiseen varastointiin perustuvilla teknologisilla hiilinieluilta Suomen teollisissa päästölähteissä. Kujanpään tarkastelu toteutettiin kolmessa eri skenaariossa sen perusteella, mistä laitoksen hiilidioksidipäästöt ovat peräisin. CASE 1 sisältää kaikki teollisuuslaitokset hiilidioksidipäästöjen alkuperästä riippumatta, CASE 2 sisältää bioperäisiä päästöjä tuottavat laitokset sekä laitokset, jotka tuottavat bioperäisten päästöjen lisäksi myös fossiilisia päästöjä ja CASE 3 sisältää vain bioperäisiä päästöjä tuottavat laitokset ja fossiiliset päästöt on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Taulukossa 1 on esitetty eri skenaarioiden arvioituja yksikkökustannuksia sisältäen hiilidioksidin talteenoton, paineistuksen, kuljetuksen ja varastoinnin. (Kujanpää et al. 2023b, 16)

**Taulukko 1.** Teknologisten hiilinielujen yksikkökustannus Suomen teollisissa päästölähteissä. (Kujanpää et al. 2023b, 20)

	CASE 1: Kaikki laitokset		CASE 2: Bioperäistä CO <sub>2</sub> :a päästävät laitokset		CASE 3: Vain bio-CO <sub>2</sub>	
	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka	Ei jaettua logistiikkaa	Jaettu logistiikka
Vaihteluväli	119–230 €/tCO <sub>2</sub>	117–172 €/tCO <sub>2</sub>	119–230 €/tCO <sub>2</sub>	117–172 €/tCO <sub>2</sub>	119–237 €/tCO <sub>2</sub>	117–178 €/tCO <sub>2</sub>
Laitoskohtainen keskiarvo	154 €/tCO <sub>2</sub>	142 €/tCO <sub>2</sub>	157 €/tCO <sub>2</sub>	144 €/tCO <sub>2</sub>	161 €/tCO <sub>2</sub>	149 €/tCO <sub>2</sub>
Painotettu keskiarvo	139 €/tCO <sub>2</sub>	132 €/tCO <sub>2</sub>	141 €/tCO <sub>2</sub>	133 €/tCO <sub>2</sub>	141 €/tCO <sub>2</sub>	134 €/tCO <sub>2</sub>

Kuten taulukosta 1 nähdään, kustannukset vaihtelevat 117–237 €/tCO<sub>2</sub> välillä. CASE 3 kustannukset ovat hieman suuremmat kuin CASE 1 ja CASE 2, mikä viittaa siihen, että fossiilisten päästöjen jättäminen pois nostaa yksikkökustannuksia. Logistiikan osalta jaetun logistiikan kustannukset ovat matalammat kuin ei jaetun logistiikan. Luonnollisten ja teknisten nielujen kustannukset eroavat selvästi toisistaan. EU:n ilmastopaneeli on arvioinut maankäyttösektorin nielujen kustannusten vaihtelevan 10–50 €/tCO<sub>2</sub> välillä, mikä on selvästi vähemmän kuin teknologisten nielujen kustannukset (Suomen ilmastopaneeli 2025).

## 4 Tekniset hiilinielut Suomen ilmastotavoitteissa

Ilmastolaissa asetettujen päästövähennystavoitteiden ja hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi on tärkeää, että hiilinielut ovat oletetulla tasolla, jotta tiedetään kuinka paljon päästöjä tulisi vähentää (Ilmastovuosikertomus 2024, 30). Suomen ilmastolaki ei erikseen aseta velvoitteita teknisten hiilinielujen käytölle, mutta esimerkiksi hallitusohjelmassa ja energia- ja ilmastostrategiassa teknisten hiilinielujen kehittämistä tuetaan. Petteri Orpon hallitusohjelmassa on asetettu tavoite teknisten hiilinielujen laajamittaiselle käytölle jo 2020-luvun aikana. Lisäksi puunpoltossa syntyvien päästöjen talteenoton ja hyötykäytön hyväksymistä EU:n säätelyssä halutaan helpottaa, jotta se voitaisiin huomioida muiden päästövähennystoimien tavoin ilmastopolitiikassa. Osana teknisten hiilinielujen laajemman käyttöönoton tavoitetta hallitus ottaa käyttöön ohjauskeinot, joiden avulla teollisuudesta ilmakehään päätyvät hiilidioksidipäästöt saadaan loppumaan 2030-luvun puoleenväliin mennessä. Hallitus valmistautuu myös riittäviin kannusteisiin, jotta investoinnit etenevät. Negatiivisten päästöjen huutokauppa tai vastaava mekanismi otetaan käyttöön tavoitteiden tukemiseksi. Hallitusohjelmassa myös todetaan, että Suomen omat sekä EU:ssa sovitut tavoitteet perustuvat tarpeeksi suuriin metsämaan hiilinieluihin, mikä korostaa luonnollisten hiilinielujen merkitystä. (Valtioneuvosto 2023)

### 4.1 Teknisten hiilinielujen merkitys tavoitteiden saavuttamisessa

Viime vuosien aikana luonnollisten hiilinielujen, kuten metsien ja maaperän kyky sitoa hiiltä on heikentynyt, mikä on lisännyt teknisten hiilinielujen merkitystä ilmastopolitiikassa. Teknologiset ratkaisut, kuten CCS, CCU ja BECCS tarjoavat mahdollisuuden estää hiilidioksidin pääsyn ilmakehään sekä luoda negatiivisia päästöjä, mikä on erityisen tärkeää hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamisen kannalta. Ensisijaisena tavoitteena on edelleen vähentää päästöjä, mutta teknisten hiilinielujen avulla voidaan vähentää ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin määrää ja siten estää sen haitallisia vaikutuksia pitkällä aikavälillä. Teknisiä hiilinieluja voidaan pitää siis täydentävänä toimenä luonnollisten nielujen ja muiden ilmastotoimien rinnalla. Suomen ilmastopaneelin (2025) mukaan ilmakehään jo

päässeitä kasvihuonekaasuja on poistettava ja varastoitava pysyvästi, jotta hiilinegatiivisuus voidaan saavuttaa ja tämä voitaisiin toteuttaa teknisillä hiilinieluilla.

#### 4.2 Teknisten hiilinielujen potentiaali Suomessa

Suomessa on merkittävää potentiaalia teknisten hiilinielujen hyödyntämiselle erityisesti bioperäisen hiilidioksidin talteenoton osalta. Pelkästään suurimpien bioperäisiä päästöjä tuottavien sellu-, paperi- ja biotuotelaitosten potentiaali hiilidioksidin talteenottoon vuosittain on yli 20 megatonnia hiilidioksidia. Tämän hiilidioksidimäärän varastointi kompensoisi siis vastaavan määrän fossiilisista polttoaineista aiheutuvia päästöjä. (Leinonen & Lehto 2024) Suomessa ei ole sopivaa geologiaa hiilidioksidin varastointiin, joten varastoitava hiilidioksidi pitäisi kuljettaa laivalla varastoalueille. Tämän vuoksi kustannusten kannalta parhaimmat talteenottolaitokset sijaitsevat rannikoilla. (Suomen ilmastopaneeli 2023) Suomessa on kuitenkin potentiaalia hiilidioksidin pysyvään varastointiin mineraaleihin, joiden arvioidaan varastoivan 2000–3000 megatonnia hiilidioksidia (Kujanpää et al. 2023a, 35).

Luonnollisia hiilinieluja lisäävät toimet esimerkiksi maankäyttösektorilla ovat edullisia verrattuna teknisten hiilinielujen kustannuksiin. Teknisille hiilinieluille ei ole suoria taloudellisia kannusteita, mikä vaikeuttaa niiden laajamittaista käyttöönottoa Suomessa. Ainoana kannustavana mekanismina toimii vapaaehtoiset päästömarkkinat. (Kujanpää et al. 2023b, 39)

## 5 Johtopäätökset

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin, miten tekniset hiilinielut näkyvät Suomen ilmastotavoitteissa ja millainen merkitys niillä on päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa on käsitelty Suomen ilmastopoliittikkaa ja erilaisia teknisiä ratkaisuja hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä. Työssä kävi ilmi, että tekniset hiilinielut ovat keskeisiä keinoja päästövähennys- ja hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamisessa, mutta ne eivät korvaa luonnollisia hiilinieluja tai muita päästövähennystoimia.

Fossiilisten polttoaineiden käyttö ja maankäytön muutokset ovat merkittäviä tekijöitä ilmastomuutoksen kiihtymisessä ja tämän ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan toimia. CCS, CCU ja BECCS ovat yleisimpiä teknisiä ratkaisuja, jotka mahdollistavat hiilidioksidipäästöjen vähentämisen ilmakehästä. Nämä teknologiat mahdollistavat hiilidioksidin talteenoton suurista päästölähteistä, sekä sen uudelleenkäytön ja pysyvän varastoinnin.

Luonnollisten hiilinielujen kasvattaminen ja päästövähennystoimet ovat ensisijaisia toimia ilmastopoliitikassa, mutta teknisillä hiilinieluilla voidaan täydentää niitä. Metsiä ja muita luonnollisia hiilinieluja pidetään siis keskeisessä roolissa ilmastomuutoksen hillinnässä, mutta niiden heikentymisen myötä tarvitaan lisätoimia. Teknisten hiilinielujen mahdollisuus poistaa jo ilmakehään kertyneitä päästöjä antaa mahdollisuuden lieventää kasvihuonekaasupäästöjen pitkäaikaisia vaikutuksia ilmakehässä, mikä tukee Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamista. Erityisesti bioperäisten päästöjen talteenottoa pidetään potentiaalisena ratkaisuna Suomessa. Haasteena ovat kuitenkin teknisten hiilinielujen korkeat kustannukset, taloudellisten kannustimien vähäisyys ja varastointipaikkojen puute.

## Lähteet

Abdullahi, A.C., Siwar, C., Shaharudin, M.I. & Anizan, I. 2018. Carbon Sequestration in Soils: The Opportunities and Challenges. [Viitattu 11.2.2025] DOI: 10.5772/intechopen.79347

Bandyopadhyay, A. 2014. Carbon Capture and Storage: CO<sub>2</sub> Management Technologies. Apple Academic Press. [Viitattu 19.2.2025]. ISBN 978-1-4822-5061-9. DOI: 10.1201/b16845.

Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., Hackett, L. A., Hallett, J. P., Herzog, H. J., Jackson, G., Kemper, J., Krevor, S., Maitland, G. C., Matuszewski, M., Metcalfe, I. S., Petit, C., Puxty, G., Reimer, J., Reiner, D. M., Rubin, E. S., Scott, S. A., Shah, N., Smit, B., Trusler, J. P. M., Webley, P., Wilcox, J., & Mac Dowell, N. 2018. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, 11, 1062-1176. [Viitattu 24.2.2025]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>

Chhimwal, M., Pandey, D. & Srivastava, R.K., 2022. Pristine biochar and engineered biochar: differences and application. In: Ramola, S., Mohan, D., Maske, O., Méndez, A., Tsubota, T. 2022. Engineered Biochar: fundamentals, preparation, characterization and applications. [Viitattu 4.3.2025]. DOI: 10.1007/978-981-19-2488-0\_1.

Consoli, C. 2019. Bioenergy and Carbon Capture and Storage. Global CCS Institute. [Viitattu 28.2.2025]. Saatavissa: [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE\\_Perspective\\_New-Template.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE_Perspective_New-Template.pdf)

EU 2018/841. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 30.5.2018 maankäytöstä, maankäytön muutoksesta ja metsätaloudesta aiheutuvien kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistumien sisällyttämisestä vuoteen 2030 ulottuviin ilmasto- ja energiapolitiikan puitteisiin sekä asetuksen (EU) N:o 525/2013 ja päätöksen N:o 529/2013/EU muuttamisesta. Official Journal of the European Union L156/1, 19.6.2018.

Euroopan komissio. 2025. Ilmastonmuutoksen syyt. [verkkosivu]. [Viitattu 22.1.2025]  
Saatavissa: [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_fi](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_fi)

Garcia-Garcia, G., Cruz Fernandez, M., Armstrong, K., Woolass, S. & Styring, P. 2021. Analytical Review of Life-Cycle Environmental Impacts of Carbon Capture and Utilization Technologies. *ChemSusChem*, 14, 995-1015. [Viitattu 24.2.2025]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/cssc.202002126>

Goel, M. & Sudhakar, M. 2017. Carbon Utilization Applications for the Energy Industry. Springer Singapore. [Viitattu 20.2.2025]. ISBN 978-981-10-3352-0.

Ilmastolaki 2022/423 [Viitattu 3.2.2025]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423>

Ilmastonmuutosta koskeva Yhdistyneiden Kansakuntien PUITESOPIMUS 61/1994. [Viitattu 11.2.2025]. Saatavissa: [https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1994/19940061/19940061\\_2](https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1994/19940061/19940061_2)

Ilmasto-opas. 2024. Suomen ilmastopolitiikalla pyritään saavuttamaan ilmastotavoitteet. [verkkosivu]. [Viitattu 11.2.2025]. Saatavissa: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/suomen-ilmastopolitiikalla-pyrita-an-saavuttamaan-ilmastotavoitteet>

Ilmasto-opas n.d. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi. [Viitattu 18.2.2025] Saatavissa: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidin-talteenotto-ja-varastointi>

IPCC 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. [Viitattu 3.2.2025]. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Kujanpää L., Reznichenko A., Saastamoinen H., Mäkikouri S., Soimakallio S., Tynkkynen O., Lehtonen J., Wirtanen T., Linjala O., Similä L., Keränen J., Salo E., Elfving J. & Koponen K. 2023a. Carbon dioxide use and removal – prospects and policies. [Viitattu 27.3.2025]. ISBN:978-952-383-197-1.

Kujanpää, L., Koponen, K., Linjala, O., Mäkikouri, S. & Arasto, A. 2023b. Teknologisten hiilinielujen mahdollisuudet ja niiden edistäminen Suomessa. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2023. [Viitattu 13.3.2025]. ISBN 978-952-7457-28-3.



Knapp, W.J., Stevenson, E.I., Renforth, P., Ascough, P.L., Knight, A.C.G., Bridgestock, L., Bickle, M.J., Lin, Y., Riley, A.L., Mayes, W.M. & Tipper, E.T., 2023. Quantifying CO<sub>2</sub> removal at enhanced weathering sites: a multiproxy approach. *Environmental Science & Technology*, 57(14), pp. 9854–9864. [Viitattu 4.3.2025]. DOI: 10.1021/acs.est.3c02273.

Leinonen, I. 2023. Hiilinielut - mitä ne ovat ja miksi niitä tarvitaan? Luonnonvarakeskus. [verkkosivu]. [Viitattu 19.2.2025]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/blogit/hiilinielut-mita-ne-ovat-ja-miksi-niita-tarvitaan>

Leinonen, I. & Lehto, J. 2024. Geologinen nettonolla tavoitteeksi kansallisessa ilmastopolitiikassa. Luonnonvarakeskus. [verkkosivu]. [Viitattu 24.3.2025]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/blogit/geologinen-nettonolla-tavoitteeksi-kansallisessa-ilmastopolitiikassa>

Lintunen, J., Uusivuori, J., Laturi, J., Pohjola, J., Rautiainen, A. 2016. Metsät ja hiilivirtoja ohjaava ilmastopolitiikka. Metsätieteen aikakauskirja. Vol. 2016 (3–4). [Viitattu 5.2.2025] Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/ma.5706>

Luonnonvarakeskus. 2025. Kasvihuonekaasuinventaario. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.2.2025]. Saatavissa: <https://luonnonvaratieto.luke.fi/numerotieto/raportit?panel=kasvihuonekaasuinventaario&lang=fi>

Pandey, D., Chhimwal, M. & Srivastava, R.K. 2022. Engineered Biochar as Construction Material. In: Ramola, S., Mohan, D., Maske, O., Méndez, A., Tsubota, T. 2022. Engineered Biochar: fundamentals, preparation, characterization and applications. 1st ed. Singapore: Springer. [Viitattu 4.3.2025]. ISBN 978-981-19-2487-3. DOI: 10.1007/978-981-19-2488-0.

Ringrose, Philip. 2020. How to store CO<sub>2</sub> underground: Insights from early-mover CCS projects. Springerbriefs in earth sciences, 2191-5369. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer. [Viitattu 19.2.2025]. ISBN 978-3-030-33112-2. DOI: 10.1007/978-3-030-33113-9.

Rosa, L., Sanchez, D.L. & Mazzotti, M. 2021. Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe, *Energy & Environmental Science*, 14, pp. 3086–3101. [Viitattu 28.2.2025]. Saatavissa: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2021/ee/d1ee00642h>

Saarijärvi, R. 2023. Kustannustehokkailla CO2-logistiikkaratkaisuilla kohti hiilineutraaliutta. LAB Pro. [Viitattu 12.3.2025]. Saatavissa: <https://www.labopen.fi/lab-pro/kustannustehokkailla-co2-logistiikkaratkaisuilla-kohti-hiilineutraaliutta/>

Siikavirta, H., Cederlöf, M., Skoglund, K. & Ruponen, V. 2024. Ilmastovuosikertomus 2024. Ympäristöministeriön julkaisuja 2024:25. Helsinki. [Viitattu 12.2.2025] Saatavissa: <https://www.eduskunta.fi/valtiopaivaasiakirjat/K+16/2024>

Suomen ilmastopaneeli. 2023. Teknologiset hiilinielut tarjoavat Suomelle mahdollisuuksiastrategian ja kannustimien luominen kiireellistä. [verkkosivu]. [Viitattu 30.1.2025]. Saatavissa: <https://ilmastopaneeli.fi/teknologiset-hiilinielut-tarjoavat-suomelle-mahdollisuuksia-strategian-ja-kannustimien-luominen-kiireellista/>

Suomen ilmastopaneeli. 2025. Ilmastopaneelin kannanotto: Hiilineutraalius 2035 on perusteltu ja saavutettavissa oleva tavoite. [verkkosivu]. [Viitattu 26.3.2025]. Saatavissa: [https://ilmastopaneeli.fi/hiilineutraalius-2035-on-perusteltu-ja-saavutettavissa-oleva-tavoite/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ilmastopaneeli.fi/hiilineutraalius-2035-on-perusteltu-ja-saavutettavissa-oleva-tavoite/?utm_source=chatgpt.com)

Suomen ympäristökeskus. 2023. Hiilinielut eivät kompensoi päästöjä. [verkkosivu]. [Viitattu 11.2.2025] Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fi/ympariston-tila/ilmastonmuutos/hiilinielut>

Tilastokeskus. 2025. Kasvihuonekaasut. [verkkosivu]. [Viitattu 17.2.2025]. Saatavissa: <https://stat.fi/tilasto/khki>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2022:53. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 21.3.2025]. ISBN pdf: 978–952–327–811–0

Valtioneuvosto. 2023. Vahva ja välittävä Suomi: Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. [Viitattu 20.3.2025]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>

VTT. 2025. Teknologiset hiilinielut. [verkkosivu]. [Viitattu 11.2.2025]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/syvenny-aiheeseen/teknologiset-hiilinielut>

Wang, H., Pilcher, D. J., Kearney, K.A., Cross, J.N., Shugart, O.M., Eisaman, M.D. & Carter, B.R. 2022. Simulated impact of ocean alkalinity enhancement on atmospheric CO<sub>2</sub>

removal in the Bering Sea. *Earth's Future*, 11, e2022EF002816. [Viitattu 4.3.2025].  
Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2022EF002816>

Wong, K. V. 2016. *Climate change*. New York, NY: Momentum Press. [Viitattu 21.1.2025].  
ISBN 1-60650-848-2.

Ympäristöministeriö. 2024. *Ilmastovuosikertomus 2024*. [verkkosivu]. [Viitattu 6.3.2025].  
Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-374-4>

Ympäristöministeriö. 2025. *Kansainvälinen ilmastopolitiikka*. [verkkosivu]. [Viitattu 7.2.2025]  
Saatavissa: <https://ym.fi/kansainvalinen-ilmastopolitiikka>

