

Miinuspäästöt

Mitä negatiivisten päästöjen tekniikat ovat ja miksi niitä tarvitaan ilmastokriisin ratkaisemiseksi?

Oras Tynkkynen

Vanhempi neuvonantaja
Sitra

Mariko Landström

Johtava asiantuntija
Sitra

Ilmastokriisin ratkaiseminen edellyttää päästöjen vähentämisen lisäksi hiilen sitomista takaisin ilmakehästä eli negatiivisten päästöjen tuottamista. Näitä miinuspäästöjä tarvitaan hyvittämään vaikeasti vähennettäviä päästöjä, peruuttamaan osa aiheutetusta ilmastohaitasta ja hallitsemaan ilmastotyöhön liittyviä riskejä.

Miinuspäästöjä voidaan tuottaa poistamalla ilmakehään tai biomassaan kertynyttä hiiltä luonnon kierrosta. Tämä voidaan tehdä teknisin keinoin esimerkiksi ottamalla hiilidioksidia talteen sellutehtaan tai hakevoimalan päästöistä ja varastoimalla se pysyvästi geologisiin muodostelmiin.

Suomella on hyvät edellytykset tuottaa miinuspäästöjä, mutta teknisten ratkaisujen edistämiseksi olemme jääneet muita Pohjoismaita jälkeen. Vauhtia voidaan kiihdyttää esimerkiksi asettamalla miinus-päästöille tavoitteet ja laatimalla niille strategia, rahoittamalla ratkaisujen kehittämistä sekä ottamalla käyttöön taloudelliset kannustimet ratkaisujen edistämiseksi.

Sitran työpaperi

© Sitra 2023

Miinuspäästöt

Mitä negatiivisten päästöjen tekniikat ovat ja miksi niitä tarvitaan ilmastokriisin ratkaisemiseksi?

Kirjoittajat: Oras Tynkkynen ja Mariko Landström, Sitra

Taitto: PunaMusta

ISBN 978-952-347-314-0 (PDF)

ISSN 2737-1042 (PDF)

www.sitra.fi

Sitran työpaperit tarjoavat monialaista tietoa asioista, jotka vaikuttavat yhteiskunnan muutokseen. Työpaperit ovat osa Sitran tulevaisuustyötä, jota tehdään ennakkoinnin, tutkimuksen, hanketoiminnan ja kokeilujen sekä koulutuksen menetelmin.

Sisällys

Tiivistelmä	4
Sammanfattning	5
Summary	6
1 Johdanto: miinuspäästöistä mahdollisuuksia Suomelle	7
2 Kolme syytä miinuspäästöihin	8
3 Viivyttely päästövähennyksissä kasvattaa miinuspäästöjen tarvetta	10
4 Kuinka paljon miinuspäästöjä tarvitaan?	11
5 Kaikki hiilen varastointi ei tuota miinuspäästöjä	13
6 Kaikilla ratkaisuilla vahvuutensa ja heikkoutensa	15
7 Johtopäätöksiä: Suomessa tarvitaan lisätoimia	18
Lähteet	19

Tiivistelmä

Ilmastokriisin ratkaiseminen edellyttää ennen kaikkea päästöjen vähentämistä ripeästi. Se ei kuitenkaan enää yksin riitä, vaan lisäksi kasvihuonekaasuja pitää sitoa takaisin ilmakehästä eli tuottaa negatiivisia päästöjä.

Näitä miinuspäästöjä tarvitaan kolmesta pääasiallisesta syystä. Miinuspäästöillä voidaan hyvittää erityisen vaikeasti vähennettäviä päästöjä, peruuttaa osa aiheutetusta ilmastohaitasta ja hallita ilmastotyöhön liittyviä riskejä.

Miinuspäästöjen tarpeen suuruus riippuu ennen kaikkea tavoitellusta päästöpolusta. Jos päästöjä vähennetään nopeasti ja paljon, tarvitaan miinuspäästöjä vähemmän; jos taas ilmastotoimissa viivytellään, tarve vastaavasti kasvaa.

Maailmanlaajuisesti miinuspäästöjä voidaan tulevina vuosikymmeninä tarvita huomattavan suuria määriä. Jotta ratkaisut olisivat aikanaan käytössä riittävän laajassa mitassa, pitää niiden kehittämiseen ja soveltamiseen panostaa jo nyt.

Miinuspäästöjä tuotetaan pääasiallisesti silloin, kun ilmakehään tai biomassaan, kuten metsien puustoon, kertynyttä hiiltä poistetaan luonnon kierrosta pysyvästi. Talteen otetun hiilen käyttäminen pitkäkestoisten tuotteiden raaka-aineena voi myös antaa lisäaikaa ilmastotyölle. Vaikutus ilmastoon riippuu kuitenkin myös ratkaisun elinkaaren aikaisista päästöistä – esimerkiksi siitä, mistä ratkaisun vaatima biomassa on peräisin.

Keinoja tuottaa miinuspäästöjä voi karkeasti jakaa luonnon ja teknisiin nieluihin. Kaikilla ratkaisuilla on vahvuutensa, heikkoutensa ja riskinsä. Esimerkiksi hinnat, ympäris-

tövaikutukset ja varmuus hiilen pysymisestä poissa ilmakehästä vaihtelevat merkittävästi.

Bioperäisen hiilen talteenotto (BECCS) on Suomelle erityisen lupaava ratkaisu. Esimerkiksi selluntuotannossa syntyy paljon puuperäistä hiilidioksidia, joka voitaisiin tulevaisuudessa ottaa talteen tehtaiden piipusta. Paljon huomiota viime aikoina on herättänyt hiilen talteenotto suoraan ympäröivästä ilmasta (DACCS). Muita mahdollisia ratkaisuja ovat mm. biohiili ja tehostettu rapautuminen eli murskatun kiviaineksen lisääminen ympäristöön.

Suomella on hyvät edellytykset kehittää ja soveltaa miinuspäästöjen ratkaisuja, ja suomalaisille yrityksille voi tarjoutua tilaisuus viedä osaamistaan muihin maihin. Suomi tulee kuitenkin vielä muita Pohjoismaita jäljessä.

Mahdollisuuksiin tarttuminen edellyttää etenemistä ajoissa ja ratkaisuja vauhdittavia päätöksiä politiikassa. Esitämme työpaperissa harkittavaksi viittä toimenpidettä:

- 1.** edistetään miinuspäästöjen tarvitsemaa ohjausta EU:ssa
- 2.** asetetaan miinuspäästöille Suomessa määrällinen tavoite
- 3.** määritetään miinuspäästöille kansallinen strategia
- 4.** osoitetaan miinuspäästöjen ratkaisujen kehittämiseen ja soveltamiseen riittävästi rahoitusta
- 5.** otetaan käyttöön taloudelliset kannustimet, joilla investoinnit miinuspäästöihin saadaan liikkeelle

Sammanfattning

För att lösa klimatkrisen krävs framför allt en snabb minskning av utsläppen. Men att endast minska utsläppen är inte längre tillräckligt. Vi måste dessutom fånga upp växthusgaserna från atmosfären och binda dem, det vill säga producera negativa utsläpp.

Det finns tre viktiga orsaker till varför vi behöver de här minusutsläppen. Med minusutsläpp kan vi kompensera utsläpp som är särskilt svåra att minska, vända en del av den redan orsakade klimatolägenheten och hantera riskerna med klimatarbetet.

Hur stort behovet av minusutsläpp är beror framför allt på vilken utsläppsbana vi strävar efter. Om utsläppen minskas snabbt och mycket behövs mindre minusutsläpp; om klimatåtgärderna framskrider sakta ökar behovet i motsvarande grad.

Sett ur ett globalt perspektiv kan de minusutsläpp som behövs under de kommande decennierna vara anmärkningsvärt stora. För att lösningarna när det är dags ska kunna användas i tillräckligt stor omfattning måste vi redan nu satsa på att utveckla och tillämpa dem.

Minusutsläpp produceras i huvudsak när kol som samlats i atmosfären eller i biomassa, såsom skogsbestånd, avlägsnas permanent från naturens kretslopp. Att använda tillvarataget kol som råvara för produkter med lång livslängd kan också ge klimatarbetet mer tid. Klimatpåverkan beror dock också på utsläppen under lösningens livscykel – till exempel varifrån den biomassa som lösningen kräver kommer.

Metoderna för att producera minusutsläpp kan grovt indelas i naturliga och tekniska sänkor. Alla lösningar har sina styrkor, svagheter och risker. Till exempel varierar kostna-

derna, miljöpåverkan och hur säkert det är att kolet hålls borta från atmosfären avsevärt.

Koldioxidlagring från biomassa (BECCS) är en särskilt lovande lösning för Finland. Till exempel inom cellulosaproduktionen uppstår stora mängder träbaserad koldioxid som i framtiden kunde tas tillvara från fabrikernas skorstenar. Koldioxid infångad direkt från luften (DACCS) har väckt mycket uppmärksamhet den senaste tiden. Andra möjliga lösningar är bland annat biokol och påskyndad vittring, det vill säga spridning av krossat stenmaterial i omgivningen för att binda kol.

Finland har goda förutsättningar att utveckla och tillämpa lösningar för minusutsläpp, och det kan uppstå möjligheter för finländska företag att exportera sin kompetens till andra länder. Finland ligger dock ännu efter de övriga nordiska länderna.

För att kunna ta tag i möjligheterna krävs att vi tar klivet framåt i rätt tid och fattar politiska beslut som påskyndar lösningarna. I arbetspappret föreslår vi fem åtgärder som ska övervägas:

- 1.** Den styrning på EU-nivå som minusutsläppen behöver främjas.
- 2.** Minusutsläppen får ett kvantitativt mål i Finland.
- 3.** En nationell strategi för minusutsläpp fastställs.
- 4.** Tillräcklig finansiering anvisas för utveckling och tillämpning av lösningar för minusutsläpp.
- 5.** Ekonomiska incitament införs för att mobilisera investeringar i minusutsläpp.

Summary

Tackling the climate crisis requires above all a rapid reduction in emissions. However, this alone is no longer enough. We must also sequester greenhouse gases from the atmosphere.

These negative emissions are needed for three main reasons: to compensate for emissions that are particularly difficult to reduce, cancel some of the climate damage caused and manage risks associated with climate action.

The magnitude of the need for negative emissions in particular depends on the emissions pathway to be followed. If the plan is to reduce emissions quickly and substantially, there will be less need for negative emissions, but if climate action is delayed, the need for negative emissions will grow accordingly.

Globally, there may be a substantial need for negative emissions in the coming decades. To ensure that the solutions will be available on a sufficiently large scale and early enough, we have to make an effort to develop and deploy them now.

Negative emissions are mainly generated when we permanently remove carbon that has accumulated in the atmosphere or in biomass, such as trees, from the biological cycle. The use of sequestered carbon as a raw material for long-lasting products may also provide additional time to carry out climate action. However, the climate impact also depends on the life-cycle emissions of the solution – such as where the biomass required for the solution comes from.

The means of producing negative emissions can be roughly divided into natural and

technological sinks. All solutions have their strengths, weaknesses and risks. Factors such as costs, environmental impacts and the certainty that carbon will be kept out of the atmosphere vary significantly.

Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) is a particularly promising solution for Finland. For example, pulp production produces a lot of wood-based carbon dioxide, which could in the future be recovered from mill chimneys. Recently, direct air carbon capture and storage (DACCS) has attracted a lot of attention. Other possible solutions include biochar and enhanced weathering, which involves depositing crushed rock particles into the terrestrial and ocean environment.

Finland is well placed to develop and apply solutions for negative emissions, and there may be opportunities for Finnish companies to export their know-how to other countries. However, Finland is still lagging behind the other Nordic countries.

To seize the opportunities, we need timely progress and policy-making that will accelerate solutions. In this working paper, we propose five measures for consideration:

- 1.** Promote the EU policies and measures needed for negative emissions.
- 2.** Set a quantitative target for negative emissions in Finland.
- 3.** Define a national strategy for negative emissions.
- 4.** Allocate sufficient funds to develop and deploy solutions for negative emissions.
- 5.** Introduce financial incentives to stimulate investment in negative emissions.

1 Johdanto: miinuspäästöistä mahdollisuuksia Suomelle

Ilmastokriisin ratkaisemiseksi maailman päästöt pitää leikata ennennäkemättömän paljon ja nopeasti. Tämä ei kuitenkaan enää yksin riitä, jotta ilmaston kuumeneminen voitaisiin rajoittaa Pariisin sopimuksen mukaisesti 1,5 asteeseen. Lisäksi kasvihuonekaasuja pitää sitoa takaisin ilmakehästä – siis tuottaa negatiivisia päästöjä. (IPCC 2021)

Negatiivisia eli miinuspäästöjä tuottavat ratkaisut voivat perustua luonnon prosesseihin (kuten hiilidioksidia yhteyttämällä sitoviin puihin metsissä), teknisiin menetelmiin (kuten hiilidioksidin koneelliseen sidontaan suoraan ympäröivästä ilmasta) tai näiden yhdistelmiin (kuten biohiilen tuotantoon biomassasta). Tässä työpaperissa keskitytään teknologiaa hyödyntäviin ratkaisuihin, sillä suomalaisessa keskustelussa niitä on käsitelty vielä niukasti.

Työpaperissa pyrimme tarjoamaan yleiskatsauksen miinuspäästöihin ja niitä tuottaviin ratkaisuihin. Alkuun tarkastelemme yleisellä tasolla sitä, mitä miinuspäästöt oikein ovat ja

miksi niitä tarvitaan. Seuraavissa luvuissa arvioimme sitä, kuinka paljon miinuspäästöjä tarvitaan sekä mistä hiili tulee ja mihin se voi päätyä. Sitten käymme läpi tärkeimpiä miinuspäästöjen ratkaisuja. Lopuksi esitämme keskustelun pohjaksi joitakin ajatuksia siitä, mitä Suomessa olisi seuraavaksi hyvä tehdä.

Suomella on hyvät edellytykset kehittää ja soveltaa miinuspäästöjen ratkaisuja, koska meillä on paljon tarvittavaa teknologiaosaamista, bioperäisiä päästöjä ja vähäpäästöistä sähköä. Koska tulevaisuudessa miinuspäästöjä tarvitaan suuria määriä koko maailmassa, voi suomalaisille yrityksille tarjoutua tilaisuus viedä ratkaisujaan muihin maihin – ja luoda Suomeen työtä ja toimeentuloa.

Mahdollisuuksiin tarttuminen edellyttää kuitenkin etenemistä ajoissa ja ratkaisuja vauhdittavia päätöksiä politiikassa. Toivomme työpaperin tukevan julkista keskustelua ja päätöksentekoa ratkaisujen edistämisestä.

Miinuspäästöt, negatiiviset päästöt, nielut?

Alan käsitteistö on vielä osin vakiintumatonta. Englanniksi käytetään limittäin esimerkiksi termejä negative emission technologies (NETs), carbon dioxide removal (CDR) ja carbon capture, use and storage (CCUS). Suomeksi on puhuttu mm. negatiivisten päästöjen ratkaisuista, teknisistä nieluista sekä hiilen sidonnasta ja varastoinnista. Tässä työpaperissa puhutaan tiiviiden vuoksi miinuspäästöistä ja niitä edistävästä ratkaisuista.

Miinuspäästöjen ratkaisut yhdistetään toisinaan keskustelussa niin sanottuun ilmastonmuokkaukseen tai ilmastonkorjaukseen (engl. climate engineering tai geoengineering). Miinuspäästöjä tuottamalla ihminen pyrkii kuitenkin lähinnä kumoamaan osan jo ilmastojärjestelmälle aiheuttamastaan häiriöstä sitomalla takaisin kasvihuonekaasuja. (Politico 2021) Ilmastonmuokkauksen alla käsitellään lisäksi auringonsäteilyn heijastamista takaisin avaruuteen. Siihen liittyy erityisen suuria epävarmuuksia ja riskejä.

2 Kolme syytä miinuspäästöihin¹

Pariisin sopimuksessa maailman maat ovat sitoutuneet tavoittelemaan sitä, että ilmaston kuumeneminen saataisiin rajattua 1,5 asteeseen. Tämän saavuttamiseksi koko maailman pitää olla vuosisadan puolivälissä hiilineutraali.

Miinuspäästöjä tarvitaan urakassa pääasiallisesti kolmesta syystä (ks. myös kuva 1). Niillä voidaan hyvittää erityisen vaikeasti vähennettäviä päästöjä, peruuttaa osa aiheutetusta ilmastohaitasta ja hallita ilmastotyöhön liittyviä riskejä. Lisäksi miinuspäästöjä voidaan yksinkertaisesti käyttää vauhdittamaan ilmastotyötä: vähentämään nettopäästöjä siitä, mihin muuten oltaisiin yltämässä.

- 1. Hyvittäminen.** Nykytiedon valossa kaikkien päästöjen nollaaminen on joko äärimmäisen kallista tai teknisesti mahdotonta. Jäljelle jäävät päästöt pitää hyvittää tuottamalla vastaava määrä miinuspäästöjä. Erittäin vaikeasti vähennettäviä päästöjä syntyy mm. maataloudessa, teollisuuden prosesseissa kuten betonin tuotannossa ja kansainvälisessä lentoliikenteessä.
- 2. Peruuttaminen.** Miinuspäästöjä tarvitaan peruuttamaan osa siitä ilmaston kuumenemisesta, johon ihminen on päästöillään lukkiutumassa. Vaikka maailma onnistuisi leikkaamaan päästöjä ennennäkemättömän paljon ja nopeasti, lämpötilan nousu ylittäisi silti jokseenkin varmasti 1,5 astetta väliaikaisesti. Miinuspäästöillä voidaan yrittää kääntää kelloa taaksepäin ja palata riskirajan alle.
- 3. Riskienhallinta.** Miinuspäästöjä voidaan tarvita erityisesti silloin, jos ihmiskunta epäonnistuu vähentämään päästöjä riittävän nopeasti. Samoin niihin voidaan

joutua turvautumaan, jos ilmaston kuumeneminen eteneekin ennakoitua nopeammin ja ilmastokriisin torjumista täytyy äkillisesti kiihdyttää.

Myös Pariisin sopimus edellyttää miinuspäästöjä. Sopimuksessa maailman maat ovat sitoutuneet saavuttamaan vuosisadan toisella puoliskolla ilmastoneutraaliuden – tilanteen, jossa päästöt eivät nettona enää kuumenna ilmastoa. (UNFCCC 2016) Jotta maailma olisi kaikkien kasvihuonekaasujen suhteen ilmastoneutraali, pitää hiilidioksidipäästöjen olla nettona jo negatiivisia. Tähän puolestaan tarvitaan juuri miinuspäästöjä.

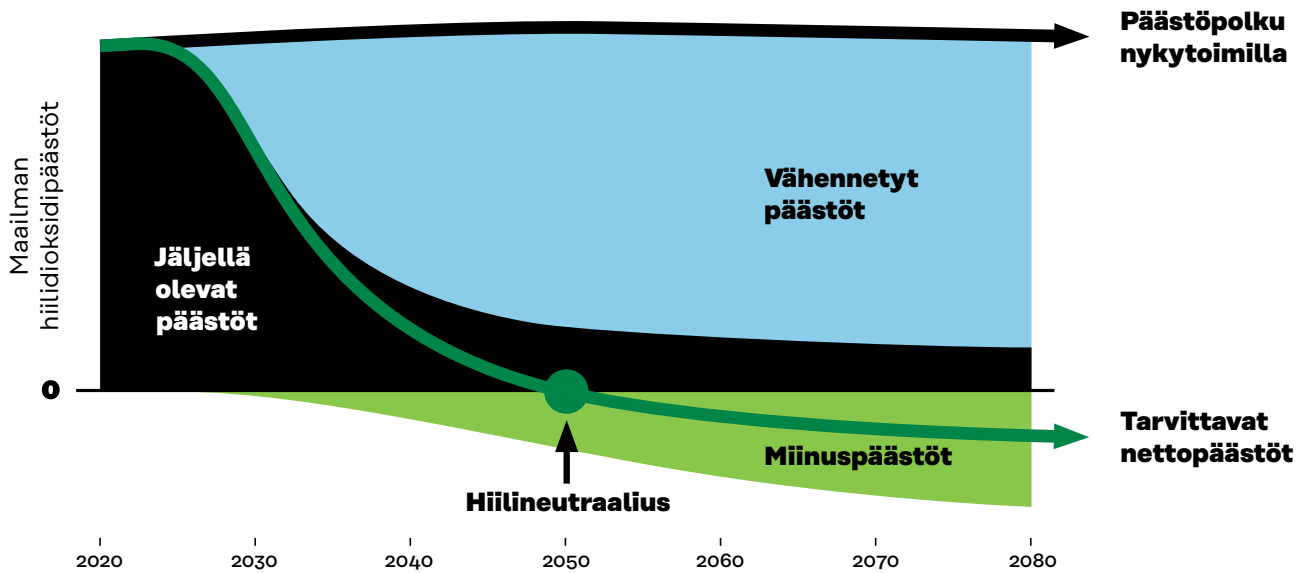
Miinuspäästöjen ratkaisuja on epäilty ja arvosteltu monin perustein. Osa ratkaisuista on teknisesti vielä melko kehittymättömiä, joten niiden toteutettavuudesta ei ole takeita ja hinta saattaa jäädä korkeaksi. Osa ratkaisuista saattaa aiheuttaa merkittäviä sosiaalisia tai ekologisia riskejä. Pelkona myös on, että jos ilmastotyö nojaa liikaa miinuspäästöihin, välttämättömiä päästövähennyksiä lykätään tai vältellään.

Huolia voidaan hälventää tavalla, jolla miinuspäästöjen ratkaisuja toteutetaan ja säännellään. Riskejä on myös hyvä suhteuttaa niihin perustavanlaatuisiin vahinkoihin, joita aiheutuu, jos ilmaston kuumenemisen rajoittamisessa epäonnistutaan.

Miinuspäästöjä voidaan perustella myös oikeudenmukaisuuden näkökulmasta. Valtaosa tähänastisesta ilmaston kuumenemisesta johtuu vauraiden teollisuusmaiden historiallisista päästöistä. Tuottamalla nyt miinuspäästöjä samat maat voivat kumota osan aiheuttamastaan vahingosta yhteiselle ilmastolle. (Progressive International 2020)

¹ Luku perustuu lähteisiin IPCC 2022b ja UNEP 2017.

Kuva 1. Miinuspäästöjen rooli ilmaston kuumenemisen rajoittamisessa 1,5 asteeseen



Kuva havainnollistaa karkeasti päästövähennysten ja miinuspäästöjen roolia 1,5 asteen mukaisella maailman päästöpolulla. Ilmaston kuumenemisen rajoittamisessa miinuspäästöjä tarvitaan ensin vaikeasti vähennettävien päästöjen hyvittämiseen niin, että maailma saavuttaa nettona hiilineutraaliuden. Sen jälkeen miinuspäästöjä tarvitaan myös hiilinegatiivisuuden saavuttamiseen, jotta osa jo aiheutetusta kuumenemisesta voidaan peruuttaa. Miinuspäästöt kuvaavat luonnon ja teknisten nielujen hiilensidontaa nettona. Mukailten [World Resources Institute](#), grafiikka: Sampsa Voutilainen, Berry.

3 Viivytely päästövähennyksissä kasvattaa miinuspäästöjen tarvetta

Riippuu monesta tekijästä, kuinka paljon miinuspäästöjä tarvitaan. Ratkaisevaa on tavoiteltu päästöpolku.

Erittäin jyrkkien ja nopeiden maailmanlaajuisten päästövähennysten poluilla miinuspäästöjen tarve jää vähäisemmäksi. Jos taas päästöjä vähennetään vähän tai myöhään, kasvaa miinuspäästöjen tarve olennaisesti – ja mahdollisesti epärealistiselle tai kestäättömälle tasolle. (UNEP 2017)

Miinuspäästöjen tarve riippuu myös siitä, mitkä päästöt tulkitaan niin vaikeasti vähennettäviksi, että ne on parempi hyvittää toisaalla. Se, onko järkevämpää vähentää jonkin toiminnan päästöjä vai tuottaa vastaava määrä miinuspäästöjä, voi muuttua teknologian ja markkinoiden kehittyessä. Esimerkiksi teräksentuotannon päästöjen vähentämistä on pitkään pidetty kohtuuttoman hankalana ja kalliina, mutta teknologian kehittäminen on tehnyt päästövähennyksistä helpompia.

Yhtäältä päästöjä vähentävän teknologian kehitys voi siis pienentää miinuspäästöjen tarvetta. Toisaalta teknologian kehitys voi myös parantaa miinuspäästöjen ratkaisujen kilpailu-

kykyä alentamalla niiden kustannuksia ja riskejä.

Jos ilmaston kuumeneminen haluttaisiin rajoittaa selvästi alle kahteen asteeseen ilman negatiivisten päästöjen ratkaisuja, tarvittaisiin 2020-luvulla arviolta tuplasti niin suuria päästövähennyksiä kuin niiden kanssa. (Carbon Brief 2021) Koska päästöjen vähentäminen riittävän nopeasti on muutenkin hyvin haastavaa, vaikeuttaisi tämä urakkaa huomattavasti. Ilman miinuspäästöjä kuumentamisen rajoittaminen tavoiteltuun puoleentoista asteeseen lienee jo tosiasiallisesti mahdotonta. (Drummond ym. 2021)

Kyse on aina valinnoista. Esimerkiksi Kansainvälisen energiajärjestön IEA:n nettonollaskenaariossa miinuspäästöjä tarvitaan suhteellisen vähän. Vastaavasti energiatehokkuutta, uusiutuvaa energiaa ja vetyä tarvitaan selvästi useimpia muita skenaarioita enemmän. (IEA 2022) Matalimpiin arvioihin päätyvissä tarkasteleissa oletukset päästövähennyksistä ovat usein hyvin rohkeita, esimerkiksi maailman kaikkien uusien hiilivoimahankkeiden lopettaminen välittömästi. (Energy Post 2021)

Tekniset vai luonnon nielut?

Teknisten ratkaisujen tarpeeseen vaikuttaa se, kuinka paljon hiiltä onnistutaan sitomaan metsien, maaperän ja vesistöjen luonnollisia nieluja kasvattamalla. Luonnon nieluihin liittyy monia vahvuuksia, kuten usein edullinen hinta ja hyödyt luonnon monimuotoisuuden turvaamiselle.

Luonnon nielujen vahvistamisessakin on silti rajoitteensa ja riskinsä. Ratkaisujen potentiaali on rajallinen mm. niiden edellyttämän maa-alan ja veden takia. Harkitsemattomasti toteutettuna nielujen vahvistaminen voi heikentää luonnon monimuotoisuutta, jos esimerkiksi istutetaan yksipuolisia vieraslajimetsiä. Kasvipeitteen lisääminen voi samalla heikentää maan heijastavuutta eli albedoa, minkä seurauksena auringon säteilystä isompi osa päätyy kuumentamaan ilmastoa. (Yale Environment 360 2021)

Perustavanlaatuinen huoli liittyy siihen, kuinka pitkään luonnon nieluja vahvistamalla sidottu hiili pysyy sidottuna. Metsiin varastoitunutta hiiltä uhkaavat mm. palot, tuhohyönteiset ja laittomat hakkuut. On vaikea varmistaa, että metsät varastoivat hiiltä vielä 30 tai 50 vuoden päästäkin. Ilmaston kuumeneminen lisää edetessään metsien heikkenemisen tai menettämisen riskiä. (Yale Environment 360 2021) Pelkkä puiden istuttaminen ei myöskään vielä takaa sitä, että niistä aina kehittyä elinvoimaisia metsiä. (Coleman ym. 2021)

4 Kuinka paljon miinuspäästöjä tarvitaan?

Ilmaston kuumenemisen rajoittamiseksi 1,5 asteeseen maailman pitää olla hiilineutraali vuosisadan puolivälin tienoilla. Tähän tarvitaan vuosittain arviolta 5–16 miljardia tonnia (gigatonnia hiilidioksidia, GtCO₂) miinuspäästöjä yksin hyvittämään vaikeasti vähennettäviä päästöjä muualla. (IPCC 2022a)

Alimmillaankin miinuspäästöjä tarvitaan siis määrä, joka vastaa suunnilleen nykyisiä Yhdysvaltain päästöjä. (Climatewatch) Lukuja voi suhteuttaa myös siihen, että koko maailman nykyiset päästöt ovat noin 54 Gt vuodessa. (UNEP 2022)

Päästöjen hyvittämisen lisäksi miinuspäästöjä tarvitaan peruuttamaan jo aiheutettua kuumenemistä. Puolentoista asteen poluilla niitä tarvitaan tähän tarkoitukseen 200–300 Gt yhteensä vuosisadan toisen puoliskon aikana. (IPCC 2022b)

EU:n ilmastolaki asettaa tavoitteeksi ilmastoneutraaliuden viimeistään vuoteen 2050 mennessä ja ilmastoposiitivisuuden sen jälkeen. (Euroopan parlamentti 2021, pdf) Lakiesityksen tausta-aineistoissa komissio arvioi, että valtaosa tarvittavista miinuspäästöistä tuotettaisiin luonnon nieluja vahvistamalla, mutta teknisten ratkaisujen osuus voisi olla 2040-luvulle tultaessa joitakin satoja miljoonia tonneja vuodessa. (Euroopan komissio 2020) EU:n komission tiedonanto kestävästä hiilenkierrosta puolestaan pyrkii poistamaan viisi

miljoonaa tonnia pysyvästi ilmakehästä teknisin ratkaisuin vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan komissio 2021)

EU:n nykyiset päästötavoitteet eivät kuitenkaan välttämättä riitä toteuttamaan reilua osuuttamme maailman ilmastovastuusta. (Climate Action Tracker; katso myös Rocha ym. 2016) Jos tavoitteita nykyisestä tiukennetaan, tarve miinuspäästöjen ratkaisuille vastaavasti kasvaa kaavaillusta.

Suomen ilmastolaissa tavoitteeksi on asetettu hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivisuus sen jälkeen. Lisäksi päästövähennyksille on asetettu asteittain tiukentuvat tavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050. (Ilmastolaki 423/2022) Lain taustaselvityksessä on arvioitu, että bioperäisen hiilen talteenotto ja varastointi (BECCS) alkaisi korostua vuodesta 2040 lähtien. Vuosisadan puoliväliin mennessä ratkaisu voisi tuottaa jopa kymmenen miljoonaa tonnia miinuspäästöjä vuodessa. (Koljonen ym. 2021)

Sitran teettämän selvityksen suoraan sähköistämiseen perustuvassa skenaariossa BECCSin miinuspäästöt alkaisivat näkyä Suomessa vuoden 2045 paikkeilla. Vuoteen 2050 mennessä määrä kasvaisi runsaaseen kuuteen miljoonaan tonniin vuodessa, jolloin saataisiin kumottua viimeisetkin maankäyttösektorin ulkopuoliset päästöt. (Roques ym. 2021)

Tulevien vuosikymmenten teknologia kehitetään tänään

Monissa tarkasteluissa miinuspäästöjen ratkaisuja aletaan soveltaa merkittävässä määrin 2030- tai 2040-luvulla. Uuden teknologian kehittäminen ja käyttöönotto vie kuitenkin aikaa – karkeasti 20–70 vuotta ensimmäisestä prototyypistä yhden prosentin osuuteen markkinoilla. ([IEA 2020](#)) Ratkaisuihin pitää siis alkaa panostaa jo nyt, jotta ne olisivat laajasti ja kilpailukykyiseen hintaan käytössä tulevina vuosikymmeninä.

Esimerkiksi aurinkovoimalla kesti noin kuusi vuosikymmentä kehittyä ensimmäisestä käytännön sovelluksesta – Vanguard-1-satelliitista – tilanteeseen, jossa aurinkosähkö alkoi olla kustannuksiltaan kilpailukykyistä perinteisten energiamuotojen kanssa. ([Washington Post 2018](#)) Toisaalta energiatehokkaita ledivaloja alettiin käyttää rakennuksissa vain kymmenen vuotta ensimmäisen prototyypin jälkeen. ([IEA 2020](#))

Teknologian kehitystä ja käyttöönottoa on onneksi mahdollista kiihdyttää yhteiskunnan toimin. Kriisioloissa hyvinkin nopea tuotannon lisääminen on teknisesti mahdollista. Esimerkiksi toisen maailmansodan aikaan Yhdysvallat yli nelinkertaisti alumiinin tuotannon kahdessa vuodessa. ([Rockoff 2016](#))

Mitä myöhemmäksi ratkaisujen kehittäminen ja käyttöönotto lykätään, sitä nopeammin siinä pitäisi onnistua. Esimerkiksi jos haluttua hiilensidonnin määrää vuonna 2050 olisi lähdetty tavoittelemaan heti viime vuosikymmenen taitteessa, ratkaisujen vuotuisen kasvuvauhdin olisi pitänyt olla noin 55 prosenttia. Jos aloitusta lykättäisiin vuoteen 2025, tarvittava kasvuvauhti kasvaisi jo 80 prosenttiin. Jos taas tehtävään tartuttaisiin vasta vuonna 2030, pitäisi kapasiteetin tuplaantua joka vuosi kahden vuosikymmenen ajan. ([Beuttler ym. 2019](#))

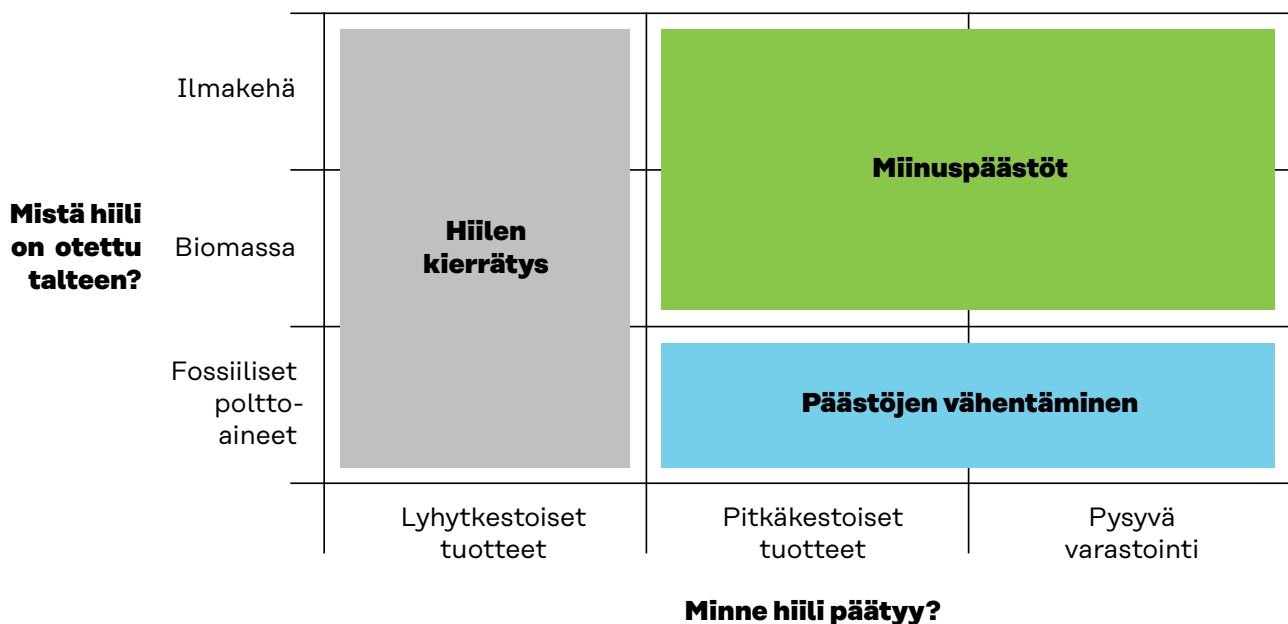
5 Kaikki hiilen varastointi ei tuota miinuspäästöjä

Hiiltä voidaan sitoa monista lähteistä ja sijoittaa moniin kohteisiin. Näiden lähteiden ja kohteiden yhdistelmä määrää vaikutuksen ilmaston kannalta. Vain osa hiilen sidonnasta tuottaa miinuspäästöjä (kuva 2).

Hiilen lähteitä on pääasiassa kolme: ilmakehään kertynyt, biomassaan sitoutunut ja fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidi. **Ilmakehään** päädyttyään hiilidioksidi kuumentaa ilmastoa, mutta uuden teknologian avulla sitä voidaan imuroida takaisin.

Metsät ja muu biomassaa sitovat kasvaessaan ilmakehästä hiiltä. Kun biomassaa poltetaan tai siitä valmistetaan lyhytikäisiä tuotteita, hiili vapautuu takaisin ilmakehään. Jos biomassaan sitoutuneen hiilen pääsy takaisin ilmakehään kuitenkin estetään käytön jälkeen, pystytään tuottamaan miinuspäästöjä. Hiiltä voidaan ottaa talteen biomassaa käyttävien tehtaiden tai voimaloiden päästöistä.

Kuva 2. Hiilen lähteet ja kohteet



Hiilen lähteet ja kohteet määrittävät sen ilmastovaikutuksen. Kun ilmakehästä tai biomassasta talteen otettua hiiltä varastoidaan pysyvästi tai pitkäkestoisesti, voidaan tuottaa miinuspäästöjä. Muu hiilen talteenotto voi joko vähentää tai kierrättää ja siten lykätä päästöjä. Mukailten [Morrow ja Thompson 2020 \(pdf\)](#), grafiikka: Sampsa Voutilainen, Berry.

Fossiilisten polttoaineiden hiili taas ei päädy ilmakehään ennen, kuin se kaivetaan esiin geologisesta varastosta ja poltetaan. Se ei myöskään palaudu luonnollisesti takaisin varastoon – muuta kuin miljoonien vuosien kuluessa. Fossiilisen hiilen sitominen tehtaan tai voimalan piipun päästä ei voikaan tuottaa miinuspäästöjä, mutta sitominen voi vähentää päästöjä riippuen siitä, mitä hiille sen jälkeen tehdään.

Sidottu hiili voidaan puolestaan ohjata pääosin kahdenlaisiin kohteisiin. Yhtäältä hiili voidaan varastoida pysyvästi **geologisiin muodostelmiin**, kuten ehtyneisiin öljy- ja kaasulähteisiin tai maanalaisiin suolavesikerrostumiin. Hiilidioksidia voidaan myös pumpata basalttimuodostelmiin, joissa se mineralisoituu kiveksi. (Snæbjörnsdóttir ym. 2020) Tällöin puhutaan hiilen talteenotosta ja varastoinnista (carbon capture and storage, CCS).

Toisaalta hiiltä voidaan sitoa erilaisiin **raaka-aineisiin ja tuotteisiin**, kuten betoniin ja muoveihin – tai jopa timantteihin. Tällöin on kyse hiilen kierrättämisestä (carbon capture and use, CCU).

Hiiltä raaka-aineena hyödyntävät tuotteet voidaan jakaa vielä lyhyt- ja pitkäkestoisiin sen mukaan, kuinka pitkään hiili pysyy niissä sitoutuneena. Jos talteen otettua hiilidioksidia käytetään esimerkiksi sähköpolttoaineiden valmistamiseen, hiili vapautuu niistä ilmakehään heti poltettaessa. Toisaalta rakennusmateriaaleihin varastoitu hiili voi pysyä poissa ilmakehästä yli sataakin vuotta, mikä antaisi kipeästi kaivattua lisääikää ratkaista ilmastokriisiä.

Pitkäikäiset tuotteet voivat – metsien tapaan – muodostaa huomattavan hiilivaraston. Varasto kasvaa (eli vähentää päästöjä tai tuottaa

miinuspäästöjä) uusien tuotteiden valmistuksen myötä ja kutistuu (eli tuottaa päästöjä), kun tuotteiden hiili vapautuu ilmakehään.

Vaikka hiilen kierrättäminen lyhytikäisiin tuotteisiin ei tuota miinuspäästöjä, se voi auttaa epäsuorasti vähentämään päästöjä. Esimerkiksi talteen otetusta hiilidioksidista tuotettu sähköpolttoaine voi syrjäyttää uuden fossiilisen polttoaineen käyttöä.

Lopullinen ilmastovaikutus riippuu kuitenkin ratkaisun päästötaseesta. Esimerkiksi hiilen talteenotto ja varastointi kuluttaa merkittäviä määriä energiaa, jonka tuotanto voi syödä osan saavutetusta ilmastohyödydestä. Puun käyttäminen rakentamiseen taas hyödyttää kokonaisuutena ilmastoa vain, jos sen takia metsien hakkuita ei lisätä ja rakentaminen korvaa puun lyhytikäisempää käyttöä (Seppälä ym. 2019).

Hiilidioksidin pitoisuudet eri lähteissä vaihtelevat merkittävästi. Ympäröivässä ilmassa hiilidioksidia on vaivaiset 0,04 prosenttia, kun bioetanolin tuotannon savukaasuissa pitoisuus nousee lähelle sataa prosenttia. (Huang ym. 2020) Mitä korkeampi pitoisuus on, sitä vähemmän energiaa tarvitaan hiilidioksidin talteenottoon ja sitä edullisempaa se on.

Ellei hiiltä varastoida tai käytetä suoraan talteenottopaikassa, se pitää kuljettaa. Suurissa määrissä ja lyhyemmällä etäisyyksillä putket ovat yleensä taloudellisin ratkaisu, mutta pienemmällä määrillä ja pitkällä matkoilla laivat voivat tarjota kilpailukykyisen vaihtoehdon. Tulevaisuudessa vanhoja öljy- ja kaasuputkia voidaan myös muokata niin, että ne soveltuvat hiilidioksidin kuljettamiseen. (Global CCS Institute 2021)

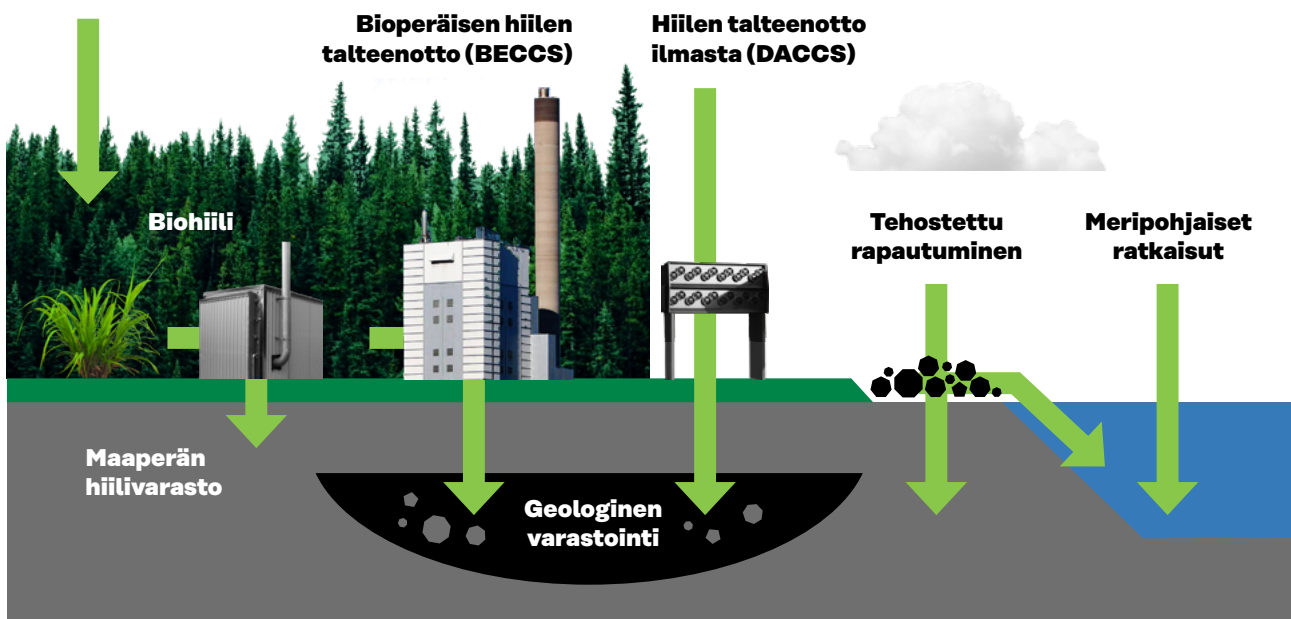
6 Kaikilla ratkaisuilla vahvuutensa ja heikkoutensa

Keinoja tuottaa miinuspäästöjä on useita (kuva 3), ja niitä voidaan ryhmitellä monin tavoin. Ratkaisuja voidaan jakaa karkeasti esimerkiksi sen mukaan, perustuvatko ne ensisijaisesti luonnon vai teknisiin nieluihin, vaikka osassa ratkaisuista on piirteitä molemmista.

Suomelle lupaava ratkaisu on **bioperäisen hiilen talteenotto**. Jos biomassan poltosta syntyvä hiilidioksidi varastoidaan pysyvästi

(bioenergy with carbon capture and storage, BECCS), pystytään energiaa tuottamaan negatiivisin päästöin. Bioperäistä hiiltä voidaan ottaa talteen myös esimerkiksi jätevoimaloista ja teollisuuden prosesseista. Ratkaisun kestävyys riippuu ennen kaikkea käytetystä biomassasta; kestävimpiä ovat jätteet ja sivuvirrat, joita ei muuten hyödynnettäisi.

Kuva 3. Esimerkkejä tavoista tuottaa miinuspäästöjä



Miinuspäästöjä voidaan tuottaa teknisesti monin tavoin. Biomassasta hiiltä voidaan varastoida biohiilen muodossa tai erottelemalla hiilidioksidi ja varastoimalla se pysyvästi. Hiiltä voidaan myös ottaa talteen suoraan ilmastasta. Tehostettu rapautuminen vauhdittaa hiilen sitoutumista kiviainekseen. Lisäksi joukko ratkaisuja hyödynittää miinuspäästöjen tuottamisessa meriä. Mukailten [The Conversation 2020](#), grafiikka: Sampsa Voutilainen, Berry.

Viime aikoina on kehitetty **hiilen talteenottoa suoraan ympäröivästä ilmasta** (direct air carbon capture and storage, DACCS).

Tekniikka vaatii paljon energiaa, joten laitokset kannattaa sijoittaa kohteisiin, joissa vähäpäästöistä energiaa on runsaasti ja edullisesti saatavilla. Toistaiseksi ratkaisu on kallis, mutta hinnan odotetaan tulevan alas teknologian kehityksen ja käyttöönoton myötä.

Pisimpään käytössä on ollut **biohiilen lisääminen maaperään** – Amazonin alueella jo ennen ajanlaskumme alkua. Biohiiltä valmistetaan biomassasta, kuten puutarhajätteestä tai metsien hakkuutähteistä. Hiili voi pysyä sitoutuneena biohiileen satoja tai jopa tuhansia vuosia, ja viljelymaahan lisättynä se voi myös parantaa satoja.

Tehostettu rapautuminen (enhanced weathering) vauhdittaa luonnostaankin esiintyvää kiviainesten kuten silikaattien hajoamista. Tekniikassa kiviaineksia murskataan ja syntynyt jauhe levitetään maaperään tai veteen, mikä kiihdyttää hiilensidontaa. Teknologia on vielä tuore, ja vasta viime vuosina on päästy ensimmäisiin kenttäkokeisiin.

Uusia ovat myös erilaiset **meripohjaiset ratkaisut**. Esimerkiksi syvänmeren pohjaan voidaan haudata biomassaa, meriveden emäksisyyttä kasvattamalla voidaan lisätä sen kykyä

situa hiiltä ja vedestä voidaan poistaa hiilidioksidia teknisesti samaan tapaan kuin ilmasta. Koska ratkaisujen soveltamisesta ei vielä ole kokemuksia, liittyy niihin merkittäviä epävarmuuksia mm. mahdollisista haitoista luonnolle.

Kaikilla ratkaisuilla onkin omat vahvuutensa, heikkoutensa ja riskinsä. Ratkaisujen teknologinen kypsyyssaste, hinta ja potentiaali miinuspäästöjen tuottamisessa vaihtelevat merkittävästi. Turvallisinta on kehittää rinnan useita ratkaisuja siltä varalta, että jokin niistä osoittautuu myöhemmin syystä tai toisesta toteuttamiskelvottomaksi.

Toistaiseksi monet miinuspäästöjä tuottavista tekniikoista ovat vielä verraten kalliita. Sidotun hiilidioksiditonnin hinnaksi voi tulla useita satoja euroja, kun EU:n päästökaupassa päästövähennyksen hinta on enimmilläänkin ollut sadan euron luokkaa. Toisaalta uuden teknologian odotetaan halpenevan merkittävästi kehittämisen ja käyttöönoton myötä.

Myös ratkaisujen kestävyysvaikutuksissa on suuria eroja. Esimerkiksi biomassan laajamittainen kasvattaminen BECCSiä varten voisi uhata ruokaturvaa, puhtaan veden saatavuutta ja luonnon monimuotoisuutta. (*Material Economics 2021*) Toisaalta biohiilen tai murskatun kiviaineksen lisääminen peltoihin voisi kasvattaa satoja.

Muut Pohjoismaat edelläkävijöinä

Suomessa miinuspäästöjä tuottavien ratkaisujen tarve on tunnustettu mm. ilmasto- ja energiastrategiassa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022), kestävän kasvun ohjelmassa (Valtioneuvosto 2021) sekä teollisuuden vähähiilitiekartoissa (Paloneva ja Takamäki 2020). Maassamme on bioperäisen hiilen pistelähteitä Ruotsin jälkeen eniten EU:ssa. (Rosa ym. 2021) Biojalostamoissa ja sellutehtaissa hiilidioksidi on korkeina pitoisuuksina ja siksi otettavissa talteen kohtuuhintaan. (Landström ym. 2021)

Toisaalta Suomesta puuttuvat geologiset muodostelmat, joihin hiiltä voisi varastoida pysyvästi, toisin kuin esimerkiksi Norjasta ja Islannista. Toteutuksessa ja ohjauksessa tulemme myös muita Pohjoismaita jäljessä.

Tanskassa valtio on tukenut kahta hiilenvarastointihanketta, jotka voivat tulevaisuudessa soveltua myös miinuspäästöjen tuottamiseen. (Danish Energy Agency a, b) Tanska on myös tehnyt kahdenvälisen sopimuksen hiilen rajat ylittävästä kuljettamisesta tiettävästi ensimmäisenä maailmassa. (Danish Ministry for Climate, Energy and Utilities 2022)

Norjassa valtio tukee voimakkaasti Longship-hanketta, jossa rakennetaan varastointia maan omalle ja muualta maahan tuotavalle hiilelle. (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy 2020) Valtio on myös perustanut mm. hiilen talteenottoon ja varastointiin keskittyvän tutkimuskeskuksen (The Norwegian CCS Research Centre) ja valtionyhtiön (Gassnova).

Islannissa on jo vuosia kokeiltu hiilen varastoimista basalttimuodostelmiin. (Carbfix) Maahan on myös rakenteilla maailman suurin hiiltä ilmakehästä suoraan talteen ottava DACCS-laitos. (Euronews 2022)

Ruotsi on tukenut miinuspäästöjä teollisuudessa tuottavia hankkeita laajalla industriklivet-ohjelmalla. (Energimyndigheten) Lisäksi maassa on päätetty ottaa käyttöön huutokauppa, jossa valtio ostaa BECCSillä tuotettuja miinuspäästöjä. (Regeringskansliet 2022)

7 Johtopäätöksiä: Suomessa tarvitaan lisätoimia

Ilmastokriisin ratkaisemiseksi ensisijaista on leikata päästöt mahdollisimman pian mahdollisimman alas. Ilmaston kuumentamisen rajoittamiseksi 1,5 asteeseen Pariisin sopimuksen mukaisesti myös miinuspäästöt ovat kuitenkin välttämättömiä. Suomessa niitä tarvitaan ensin hiilineutraaliuden ja sen jälkeen hiilinegatiivisuuden saavuttamiseksi.

Luonnon nielujen vahvistamisella metsissä ja maaperässä voidaan tuottaa merkittäviä hyötyjä sekä ilmaston että luonnon monimuotoisuuden kannalta. Niiden ohella tarvitaan kuitenkin myös teknisillä ratkaisuilla tuotettuja miinuspäästöjä.

Jotta miinuspäästöjä pystytään tuottamaan riittävän paljon oikeaan aikaan, pitää niitä edistää jo nyt. Siksi Suomen olisi hyvä harkita ennakoiden ainakin seuraavia toimenpiteitä.

- 1. Suomen on syytä edistää miinuspäästöjen ratkaisuja EU:ssa.** Yhteisillä eurooppalaisilla toimilla voidaan saada aikaan enemmän kuin jäsenmaiden toimin yksin. EU:ssa tarvitaan miinuspäästöjen tuottamiselle mahdollistava sääntelykehikko ja taloudellisia kannustimia.
- 2. Miinuspäästöille on tärkeä asettaa Suomessa määrällinen tavoite (Climate Home News 2021).** Tavoite voi kattaa joko luonnon ja tekniset nielut yhteensä tai molemmat erikseen. Nykyisten

nettopäästötavoitteiden tavoin miinuspäästöjä koskeva tavoite olisi luonteva kirjata ilmastolakiin.

- 3. Miinuspäästöille on tarpeen määrittää oma strategia, jossa kuvataan kattavasti Suomen nykytilaa, haasteita ja toimenpiteitä.** Strategian olisi perusteltua olla itsenäinen asiakirja, mutta se olisi mahdollista sisällyttää myös ilmasto- ja energiastrategiaan. Etenemistä miinuspäästöjen edistämiseksi tulisi seurata säännöllisesti ilmastovuosikertomuksissa.
- 4. Miinuspäästöjä tuottavien ratkaisujen tutkimiseen, kehittämiseen ja kokeilemiseen pitää osoittaa riittävästi rahoitusta.** Tämä voidaan toteuttaa erillisinä rahoitusohjelmina tai nykyisten ohjelmien osana. Työssä voidaan hyödyntää olemassa olevia rahoitusvälineitä, kuten Ilmastorahastoa, energiatukia ja Business Finlandin avustuksia.
- 5. Suomeen tarvitaan taloudelliset kannustimet, joilla investoinnit miinuspäästöihin saadaan liikkeelle.** Tarkkaan kannattaa seurata kokemuksia Ruotsin huutokaupasta, jolla edistetään miinuspäästöjen tuottamista bioenergialla yhdistettynä hiilen talteenottoon ja varastointiin. (Lundberg ja Fridahl 2022)

Lähteet

- Beuttler C., Charles L. ja Wurzbacher J. 2019.** The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Climate* 1. Haettu 18.1.2023.
- Carbfix.** Overview of projects around the globe. Haettu 18.1.2023.
- Carbon Brief 28.6.2021.** Guest post: Emissions should fall 'twice as fast' in case negative emissions fail. Haettu 18.1.2023.
- Climate Action Tracker.** EU – Country summary. Haettu 18.1.2023.
- Climate Home News 11.5.2021.** Carbon removal experts support splitting "net zero" into twin targets. Haettu 18.1.2023.
- Climatewatch.** Historical GHG Emissions. Haettu 18.1.2023.
- Coleman E.A., Schultz B., Ramprasad V. ym. 2021.** Limited effects of tree planting on forest canopy cover and rural livelihoods in Northern India. *Nature Sustainability* 4, 997–1004.
- Danish Energy Agency a.** Bifrost. Haettu 18.1.2023.
- Danish Energy Agency b.** Project Greensand Phase 2. Haettu 18.1.2023.
- Danish Ministry for Climate, Energy and Utilities 29.9.2022.** Denmark, Flanders and Belgium sign groundbreaking arrangement on cross-border transportation of CO2 for geological storage. Haettu 18.1.2023.
- Drummond P., Scamman D., Ekins P. ym. 2021.** Growth-positive zero-emission pathways to 2050. Haettu 18.1.2023.
- Energimyndigheten.** Industriklivet. Haettu 18.1.2023.
- Energy Post 20.7.2021.** Comparing four Carbon Removal scenarios (IPCC, IEA, McKinsey, NGFS) and policy implications. Haettu 18.1.2023.
- Euronews 28.6.2022.** 'Mammoth' new air capture plant will suck up 36,000 tonnes of CO2 per year in Iceland. Haettu 18.1.2023.
- Euroopan komissio 2020.** COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people - SWD(2020)176 osa 1. Haettu 18.1.2023.
- Euroopan komissio 2021.** Komission tiedonanto Euroopan parlamentille ja neuvostolle: Kestävä hiilen kierto – COM(2021)800. Haettu 18.1.2023.
- Euroopan parlamentti 2021.** REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law') (pdf). Haettu 18.1.2023.
- Gassnova.** About Gassnova. Haettu 18.1.2023.
- Global CCS Institute 2021.** 101 Questions and 101 Answers from the CCS 101 Webinar Series. Haettu 18.1.2023.
- Huang Z., Grim G., Schaidle J. ja Tao L. 2020.** Using waste CO2 to increase ethanol production from corn ethanol biorefineries: Techno-economic analysis. *Applied Energy* 280. Haettu 18.1.2023.
- IEA 2020.** Energy Technology Perspectives 2020. Haettu 18.1.2023.
- IEA 2022.** World Energy Outlook 2022. Haettu 18.1.2023.
- Ilmastolaki 423/2022.** Haettu 18.1.2023.

- IPCC 2021.** Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Toim. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. ym. Cambridge University Press. Haettu 18.1.2023.
- IPCC 2022a.** Summary for Policymakers. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Toim. Shukla P.R., Skea J., Slade R. ym. Cambridge University Press. Haettu 18.1.2023.
- IPCC 2022b.** Technical Summary. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Toim. Shukla P.R., Skea J., Slade R. ym. Cambridge University Press. Haettu 18.1.2023.
- Koljonen T., Lehtilä A. ja Honkatukia J. 2021.** Ilmastolain päästövähennystavoitevaihtoehtojen laskennalliset vaikutusarviot. Haettu 18.1.2023.
- Landström M., Kohl A., Puroila S. ym.** Korjausliike. Haettu 18.1.2023.
- Lundberg L. ja Fridahl M. 2022.** The missing piece in policy for carbon dioxide removal: reverse auctions as an interim solution. Discover Energy 2. Haettu 18.1.2023.
- Material Economics 2021.** EU Biomass Use in a Net-Zero Economy. Haettu 18.1.2023.
- Morrow D.R. ja Thompson M.S. 2020.** Remove, Reduce, Recycle: Clarifying the Overlap between Carbon Removal and CCUS. Institute for Carbon Removal Law and Policy, American University. Haettu 18.1.2023.
- Norwegian CCS Research Centre.** About NCCS. Haettu 18.1.2023.
- Norwegian Ministry of Petroleum and Energy 2020.** Longship – Carbon capture and storage — Meld. St. 33 (2019–2020) Report to the Storting (white paper). Haettu 18.1.2023.
- Paloneva M. ja Takamäki S. 2020.** Yhteenvedo toimialojen vähähiilitiekartoista. Haettu 18.1.2023.
- Politico 1.9.2021.** The problem with playing God to fix the climate: It might not work. Haettu 18.1.2023.
- Progressive International 22.6.2020.** Holly Jean Buck: How to Decolonize the Atmosphere. Haettu 18.1.2023.
- Regeringskansliet 4.11.2022.** Stor satsning görs på infångning av biogen koldioxid. Haettu 18.1.2023.
- Rocha M., Sferra F., Schaeffer M. ym. 2016.** What does the Paris climate agreement mean for Finland and the European Union?. Haettu 18.1.2023.
- Rockoff H. 2016.** The U.S. Economy in WWII as a Model for Coping with Climate Change. National Bureau of Economic Research. Haettu 18.1.2023.
- Roques F., Le Thieis Y., Aue G. ym. 2021.** Enabling cost-efficient electrification in Finland. Haettu 18.1.2023.
- Rosa L., Sanchez D.L. ja Mazzotti M. 2021.** Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe. Energy & Environmental Science 14, 3086-3097. Haettu 18.1.2023.
- Seppälä J., Heinonen T., Pukkala T. ym. 2019.** Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. Journal of Environmental Management 247, 580-587. Haettu 18.1.2023.
- Snæbjörnsdóttir S.Ó., Sigfússon B., Marieni C. ym. 2020.** Carbon dioxide storage through mineral carbonation. Nature Reviews Earth & Environment 1, 90–102. Haettu 18.1.2023.
- The Conversation 20.9.2020.** The Morrison government wants to suck CO₂ out of the atmosphere. Here are 7 ways to do it. Haettu 18.1.2023.
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2022.** Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastategia. Haettu 18.1.2023.
- UNEP 2017.** The Emissions Gap Report 2017. Haettu 18.1.2023.
- UNEP 2022.** Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid

transformation of societies. Haettu 18.1.2023.

UNFCCC 2016. The Paris Agreement. Haettu 18.1.2023.

Valtioneuvosto 2021. Suomen kestävä kasvun ohjelma : Elpymis- ja palautumissuunnitelma. Haettu 18.1.2023.

Washington Post 31.5.2018. The inconvenient truth about carbon capture. Haettu 18.1.2023.

World Resources Institute. Carbon Removal. Haettu 18.1.2023.

Yale Environment 360 2021. Are Huge Tree Planting Projects More Hype than Solution?. Haettu 18.1.2023.


SITRA

SITRAN TYÖPAPERI 26.1.2023

Sitra Työpaperit tarjoavat monialaista tietoa asioista, jotka vaikuttavat yhteiskunnan muutokseen. Työpaperit ovat osa Sitran tulevaisuustyötä, jota tehdään ennakkoinnin, tutkimuksen, hanketoiminnan ja kokeilujen sekä koulutuksen menetelmin.

ISBN 978-952-347-314-0 (PDF) www.sitra.fi

SITRA.FI

Itämerenkatu 11–13
PL 160, 00181 Helsinki
Puhelin 0294 618 991
 @SitraFund