

SUOMEN ILMASTOPANEELIN RAPORTTI 2/2024

# Suomen päästövähennyspolun tarkastelu huomioiden muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja epäsuorien nieluvaikutusten rooli

ANTTI-ILARI PARTANEN, SALLY WEAVER, TOMMI EKHOLM, TARU PALOSUO, TIMO VESALA, JYRI  
SEPPÄLÄ, HANNELE KORHONEN, MARKKU OLLIKAINEN

© Suomen ilmastopaneeli

Julkaistu CC BY 4.0 -lisenssillä.

Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2024

## **Suomen päästövähennyspolun tarkastelu huomioiden muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja epäsuorien nieluvaikutusten rooli**

Tekijät: Antti-Ilari Partanen, Sally Weaver, Tommi Ekholm, Taru Palosuo, Timo Vesala, Jyri Seppälä, Hannele Korhonen, Markku Ollikainen

ISSN: 2737-0666

ISBN: 978-952-7457-32-0

DOI: [lisätään myöhemmin]

Julkaistu 30.10.2024.

Toimitussihteeri: Maria Karttunen

Viittausohje:

Partanen, A-I., Weaver, S., Ekholm, T., Palosuo, T., Vesala, T., Seppälä, J., Korhonen, H., Ollikainen, M. 2024. Suomen päästövähennyspolun tarkastelu huomioiden muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja epäsuorien nieluvaikutusten rooli. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2024.

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia hallituksen ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä otetta ilmastotieteissä. Ilmastopaneelin selvitykset ja kannanotot tehdään tieteellisin perustein.

[info@ilmastopaneeli.fi](mailto:info@ilmastopaneeli.fi)

[www.ilmastopaneeli.fi](http://www.ilmastopaneeli.fi)

[@ilmastopaneeli1](https://www.instagram.com/ilmastopaneeli1)

# SISÄLLYS

SISÄLLYS	II
ILMASTOPANEELIN ESIPUHE JA KESKEISET VIESTIT	IV
TIIVISTELMÄ	VII
SAMMANDRAG	VIII
SUMMARY	IX
SANASTOA	X
1. JOHDANTO	1
2. MENETELMÄ EPÄSUORIEK NIELUVAIKUTUSTEN JA MUIDEN KUIN CO <sub>2</sub> -PÄÄSTÖJEN HUOMIOON OTTAMISEKSI GLOBAALISTI REILUN PÄÄSTÖBUDJETIN JA NETTOPÄÄSTÖPOLUN MÄÄRITTÄMISESSÄ	4
2.1 MUUT KUIN CO <sub>2</sub> -PÄÄSTÖT	4
2.2 EPÄSUORAT NIELUVAIKUTUKSET	7
2.3 TARKASTELUUN VALITUT TAVAT SOVITTAÄ INVENTAARIOLASKENNAN MUKAINEN MENETELMÄ VASTAAMAAN ILMASTOTIETEEN MUKAISTA PÄÄSTÖBUDJETTIA	8
2.3.1 LASKENTAMENETELMIIN LIITTYVÄ EPÄVARMUUS	10
3. SUOMEN PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTIEK MÄÄRITTELY TARKASTELTAESSA SUOMEN REILUA OSUUTTA 1,5 ASTEEN TAVOITTEESSA	11
4. SUOMEN PÄÄSTÖVÄHENNYSKOLUN TARKASTELU VUOSILLE 2020–2050	14
4.1 SUOMEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN ILMASTOVAIKUTUS	16
4.1.1 MUIDEN KUIN CO <sub>2</sub> -KASVIHUONEKAASUJEN LÄMMITTÄVÄ VAIKUTUS	16
4.1.2 PÄÄSTÖVÄHENNYSKOLKUKJEN KOKONAISVAIKUTUS GLOBAALIIN KESKILÄMPÖTILAAN	17
5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	20
LÄHTEET	22
LIITTEET	26
LIITE 1: TIETEELLINEN TAUSTA JA MENETELMÄT PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTIEK LASKEMISEKSI	26

LIITE 2: PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTILASKELMIEN EPÄVARMUUSARVIOT _____	31
LIITE 3: EPÄSUORAT NIELUVAIKUTUKSET _____	34
LIITE 4: PÄÄSTÖVÄHENNYSPOLOT ESITETTYNÄ GLOBAALIEN HIILENKIERTOMALLIEN MUKAISELLA LULUCF-SEKTORIN NETTOPÄÄSTÖJEN LASKENTATAVALLA _____	37
LIITE 5: WAM-CN-SKENAARIO _____	38

# ILMASTOPANEELIN ESIPUHE JA KESKEISET VIESTIT

Suomen ilmastolain (423/2022) mukainen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoite on ensimmäisiä tieteeseen perustuvia kansallisia ilmastotavoitteita maailmassa. Hiilineutraaliustavoite ja siihen johtava nettopäästöjen vähennyspolku on vastaus kysymykseen, mikä on Suomen globaalisti oikeudenmukainen osuus IPCC:n määrittämästä 1,5 asteen tavoitteen mukaisesta globaalista hiilibudjetista. Tavoite on johdettu nojautuen ilmastopolitiikassa käytettyyn inventaariolaskentaan sekä maksukykyyn globaalina oikeudenmukaisuusperiaatteena ja se toimeenpanee Pariisin ilmastososimusta.

Globaalin hiilinielun tarkastelutavat ja ilmastomallinnus ovat kehittyneet Ilmastopaneelin aiemman tarkastelun ja suosituksen (Ollikainen ym. 2019, Ilmastopaneeli 2021) jälkeen. Tästä johtuen Ilmastopaneeli toteutti tämän raportin menetelmätarkastelun, jossa verrataan ilmastopolitiikan perustana olevaa kasvihuonekaasujen inventaariolaskentaan pohjautuvaa menetelmää ilmastotieteelliseen mallinnukseen. Peruskysymyksenä tarkastelussa on, mikä on Suomen globaalisti oikeudenmukainen osuus jäljellä olevasta ilmastoa lämmittävästä kasvihuonekaasubudjetista.

IPCC:n arvioiman jäljellä olevan hiilibudjetin soveltaminen kansalliselle tasolle edellyttää ilmastotieteelliseen mallinnukseen perustuvaa muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kehityksen ennakoitua sekä niin sanottujen epäsuorien nieluvaikutusten määrittämistä. Muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt ovat tässä yhteydessä metaani (CH<sub>4</sub>), dityppioksidi (N<sub>2</sub>O) ja fluoratut kasvihuonekaasut (F-kaasut). Epäsuorilla nieluvaikutuksilla tarkoitetaan esimerkiksi ilmaston lämpenemisestä ja kasvaneesta CO<sub>2</sub>-pitoisuudesta aiheutuvaa muutosta metsien kasvuun ja ilmaston lämpenemisen vaikutuksia maaperäpäästöihin verrattuna esiteolliseen ilmastoon. Kumpikin tekijä (muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt ja epäsuora nieluvaikutus) voidaan sovittaa laskentaan joko kansallisella tai globaalilla tasolla tai näiden yhdistelmänä. Tehdyt valinnat vaikuttavat kansalliseen lopputulokseen, eli päästöbudjetista johdettavaan nettopäästöpolkuun. Valitun tarkastelutavan mukaan raportin laskelmien mukainen oikeudenmukainen hiilineutraaliustavoite, jossa kasvihuonekaasujen päästöt ovat enintään yhtä suuret kuin poistumat, asettuu vuosien 2029–2037 tienoille. Tämän tarkastelun pohjalta Ilmastopaneeli korostaa seuraavia näkökohtia.

## Hiilineutraalius vuonna 2035 on perusteltu tavoite ja sen toimeenpanosta tulee huolehtia

Ilmastopaneeli korostaa, että ilmastolakiin kirjattu hiilineutraalius vuonna 2035 on maksukykyyn perustuvan oikeudenmukaisuusperiaatteen valossa perusteltu tavoite Suomen ilmastopolitiikalle, sillä toteutetun tarkastelun tuloksena hiilineutraalius tulee saavuttaa vuosien 2029–2037 välillä. Tätä näkemystä tukevat myös Ilmastopaneelin arviot toteuttamiskelpoisista ilmastotoimista hiilineutraaliuden saavuttamiseksi vuoteen 2035 mennessä. Lisäksi Ilmastopaneelin näkemyksen mukaan hiilineutraaliuden saavuttaminen vuonna 2035 on Suomelle puhtaan siirtymän mahdollisuuksien lunastamisen näkökulmasta tärkeää.

Fossiilipäästöjen vähentäminen Suomessa on etenemässä päästökauppasektorilla jopa ennakoitua nopeammin. Tämä voi mahdollistaa hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisen maankäyttösektorin historiallista keskiarvoa alhaisemmalla nettonielutasolla. Päästövähennyksiä voidaan jouduttaa edelleen, ja nettonielun, eli hiilidioksidin poistojen ja maaperän päästöjen summan, vahvistaminen on välttämätöntä. Maankäyttösektorin (LULUCF) kustannustehokkaat, päästöjä vähentävät ja nielua kasvattavat toimet tulee ottaa heti käyttöön. Maankäyttösektorin nettonielun kasvattamisen tueksi

tarvitaan myös teknologisia nieluja. Aika riittää hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseen, kunhan luonnon ja teknologisen nielun vahvistamista kiirehditään ja päästövähennyksissä edetään riittävän nopeasti.

### **Vauhtia nielujen vahvistamiseen**

Raportissa käytettiin nettonielun historiallista keskiarvoa vastaavaa tasoa, kuten aiemmassa Ilmastopaneelin analyysissä, jotta menetelmien vertailu olisi johdonmukaista. Maankäyttösektorin nettonielun taso 2020-luvun alussa on ollut huomattavasti pienempi, jopa päästön puolella, kun sitä verrataan vuonna 1990 alkavan aikasarjan keskiarvoon. Nettonielun heikkeneminen johtuu siitä, että toimia ei ole tehty sen riittävän tason ylläpitämiseksi, vuosittaiset hakkuut ovat kasvaneet yli 20 prosenttia 2010-luvun alkuun verrattuna ja turvemaiden maaperäpäästöt ovat kasvaneet ilmaston lämpenemisen myötä.

Maankäyttösektorin nettonielua voidaan kasvattaa vähentämällä maaperäpäästöjä maatalouskäytössä olevilla turvemaidella, vanhoilla turpeenottoalueilla ja suometsissä. Näille maille on toteutettavissa kustannuksiltaan edullisia toimenpiteitä. Myös metsien talouskäytölle on hahmotettavissa taso, joka on yhteensopiva nielu- ja luonnon monimuotoisuutta koskevien tavoitteiden kanssa.

Teknologisen nielun kasvattamisen mahdollisuudet ovat hyvät, sillä Suomessa syntyy biogeenistä hiiltä vuosittain noin 28 Mt suuren mittakaavan laitoksissa (yli 0,1 Mt CO<sub>2</sub>/vuosi päästävät laitokset). Investoinnit biogeenisen hiilen talteenottoon ja varastointiin voitaisiin käynnistää esimerkiksi yhteiskunnan rahoittamalla tarjouskilpailulla. Samalla se jouduttaisi varastoinnin ohella biogeenisen hiilidioksidin hyödyntämistä uusissa tuotteissa fossiilisia polttoaineita korvaten.

### **Globaaliin ilmastopolitiikkaan tarvitaan harmonisointia**

Toteutettu menetelmätarkastelu osoittaa, että Pariisin sopimusta voidaan soveltaa maakohtaisesti eri tavoin silloinkin, kun se pyritään tekemään ilmastotieteellisesti perustellulla tavalla. 1,5 asteen tavoitetta ei välttämättä saavuteta, vaikka maat soveltaisivat samaa oikeudenmukaisuusperiaatetta, sillä epäsuoran nieluvaikutuksen ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen huomioiminen tulisi myös toteuttaa samoin periaattein. Kansallisten tavoitteiden laskentaperiaatteiden tekeminen näkyväksi, kun maat määrittelevät kansallisia panoksiaan Pariisin sopimukselle, sekä myöhemmässä vaiheessa laskennan harmonisointi maiden kesken voikin olla tarpeen YK:n ilmastopolitiikan kehittämisessä.

### **Voimakkaasti lämmittävän metaanin kohtelu ilmastopolitiikassa**

Kun verrataan kasvihuonekaasuinventaarion ja ilmastotieteen mukaisten menetelmien eroa, korostuvat muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen vaikutukset. Erityisesti metaani on lyhytikäinen kasvihuonekaasu, joka lämmittää ilmakehää erittäin voimakkaasti. Nykyisellä sadan vuoden säteilypakotteeseen perustuvalla laskentatavalla sen vaikutus on 30-kertainen suhteessa hiilidioksiidiin, mutta 20 vuoden aikaskaalalla vaikutus on yli 80-kertainen. Nykyinen laskentatapa ei ohjaa kohdistamaan toimia metaanipäästöjen vähentämiseen riittävän tehokkaasti, joten säteilypakotteeseen perustuvassa laskentatavassa lyhyemmän aikajänteen käyttö voi olla tarpeen ilmastotoimien tehokkaaksi kohdentamiseksi 1,5 asteen tavoitteen saavuttamiseksi.

### **Lisää tutkimusta**

Muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen ennustamiseen, epäsuorien nieluvaikutusten mallintamiseen sekä joiltain osin itse ilmastomallinnukseen liittyy epävarmuustekijöitä. Lisäksi eri mallinnuskriteerit ja

menetelmävalinnat tuottavat toisistaan eroavia tuloksia, kuten aina eri tarkastelutapoja käytettäessä. Ilmastopolitiikan tieteellisen perustan vahvistaminen, erityisesti kansallisen ja globaalin epäsuoran nielun arviointi, on tiedeyhteisön tärkeä tehtävä tulevaisuudessa.

*Helsingissä 9.10.2024*

*Suomen ilmastopaneeli*

# TIIVISTELMÄ

Raportissa tarkastellaan Suomen reilua osuutta ilmastotoimista ja siitä seuraavaa päästövähennyspolkua. Ilmastopaneelin aiemmissa arvioissa käyttämää inventaariolaskentaan perustuvaa lähestymistapaa verrataan ilmastotieteellistä mallinnusta ja IPCC:n tieteellisten raporttien määritelmiä paremmin vastaaviin lähestymistapoihin. Raportin tarkastelussa otetaan huomioon muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasut sekä epäsuorat nieluvaikutukset osana ilmastonmallinnusta. Tarkasteluvälinä on vuodet 2020–2050. Raportti esittää Suomelle Ilmastopaneelin aiemmin käyttämän inventaariolaskennan suoran sovelluksen lisäksi kaksi päästövähennyspolkua (tapa 1 ja tapa 2), jotka ovat linjassa Pariisin sopimuksen 1,5 asteen tavoitteen kanssa. Analyysin tuloksia verrataan Ilmastopaneelin aiemmin antamiin suosituksiin kansallisesta päästövähennyspolusta ja hiilineutraaliustavoitteen. Esitetyt päästövähennyspolut perustuvat lineaarisiin päästövähennyksiin, jotka jakautuvat tasaisesti vuosille 2020–2050.

Raportti käsittelee Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vaikutusta globaaliin ilmaston lämpenemiseen. Lähtökohtana on Pariisin sopimuksen osapuolien ilmastopolitiikan mukainen lähestymistapa, inventaariolaskennan suora sovellus. Siinä päästövähennyspolku lasketaan käyttämällä kasvihuonekaasuinventaarion mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä ja hiilibudjettiin sovitetaan kasvihuonekaasuinventaarion mukaisesti muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt. Kasvihuonekaasuinventaarion nettopäästöihin pohjaavaa reilua osuutta globaaleista ilmastomuutoksen hillintätoimista voidaan käsitellä tarkastelemalla reilua hiilibudjettiosuutta tai osuutta ilmakehän lämmittämisestä. Raportissa käytetyllä jälkimmäisellä tarkastelutavalla muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasut voidaan huomioida laskennassa tarkemmin. Epäsuorien nieluvaikutusten, eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden vaikutus ihmiskäytössä olevilla mailla, arvioidaan perustuen kahteen tutkimukseen, joiden menetelmässä metsien kasvua hoidetulla metsämaalla mallinnettiin ilmastomuutoksen kanssa ja esiteollisella ilmastolla, ja näiden simulaatioiden erotuksesta laskettiin epäsuorat nieluvaikutukset.

Tavassa 1 epäsuorat nieluvaikutukset ja muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt sovitetaan globaalilla tasolla. Tavassa 2 samat sovitukset tehdään kansallisella tasolla. Laskennan tulokset johtavat kummassakin tavassa pienempään päästöbudjettiin kuin Ilmastopaneelin aiemmalla menetelmällä. Erityisesti tavan 2 mukaiset tulokset ja tulokset vaativat Suomelta selkeästi tiukempaa ilmastopolitiikkaa tarkasteltavana ajanjaksona. Tavan 1 mukaan Suomen tulisi olla hiilineutraali vuonna 2037 ja tavan 2 mukaan jo vuonna 2029. Tavan 1 nykyistä hiilineutraaliustavoitetta myöhäisempi ajankohta johtuu pääosin päivitetyistä IPCC:n hiilibudjettiarviosta. Muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen vaikutukset korostuvat kasvihuonekaasuinventaarion suoran sovelluksen ja ilmastotieteen kanssa yhteensopivampien menetelmien eroja vertailtaessa.

Tarkastelun lopputuloksena voidaan todeta, että maksukykyyn perustuvan oikeudenmukaisuusperiaatteen valossa Suomen vuoden 2035 hiilineutraaliustavoite ei ole ainakaan liian kunnianhimoinen Suomen reiluksi panokseksi Pariisin sopimuksen 1,5 asteen tavoitteen saavuttamiseen. Raportti tarjoaa alustavia tuloksia sen tarkasteluun, kuinka ilmastopolitiikan perustana oleva inventaariolaskennan mukainen lähestymistapa saataisiin paremmin vastaamaan ilmastotieteen mukaista lähestymistapaa.



# SAMMANDRAG

# SUMMARY

# SANASTOA

**Ei-LULUCF-sektorit.** Maankäyttösektorin (LULUCF) ulkopuoliset sektorit eli EU:n päästoluokittelun mukaiset päästökauppa- ja taakanjakosektorit.

**Epäsuorat nieluvaikutukset.** Ilmastonmuutoksen ja kasvaneen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden aiheuttamat muutokset LULUCF-sektorin nettopäästöissä ihmiskäytössä olevilla mailla verrattuna esiteolliseen vertailutasoon.

**Gloaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaiset LULUCF-sektorin nettopäästöt.**

Maankäyttösektorin nettokasvihuonekaasupäästöt, joihin lasketaan ainoastaan suorat ihmisperäiset vaikutukset liittyen esim. hakkuisiin, maankäytön muutoksiin tai metsien takaisin kasvuun. Ei sisällä epäsuoria nieluvaikutuksia.

**Hiilibudjetti.** Suurin sallittu hiilidioksidipäästöjen kumulatiivinen määrä, joka on yhteensopiva esimerkiksi 1,5 asteen tavoitteen kanssa joko globaalilla tai kansallisella tasolla. Sisältää oletuksia muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten tulevaisuuden päästöistä.

**Hiilineutraalius.** Tässä raportissa käytetään Suomen ilmastopoliittisessa keskustelussa vakiintunutta tapaa ymmärtää hiilineutraalius kaikkien kasvihuonekaasujen päästöjen ja nielujen tasapainona kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavalla. IPCC määrittelee hiilineutraaliuden (en. carbon neutrality) eri tavalla suorien ihmisperäisten CO<sub>2</sub>-päästöjen ja -nielujen tasapainona globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisesti.

**Kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaiset LULUCF-sektorin nettopäästöt.**

Kasvihuonekaasuinventaarion ohjeistuksen mukaisesti ihmiskäytössä olevan maan LULUCF-sektorin päästöjen ja poistumien summa sisältäen myös epäsuorat nieluvaikutukset.

**LULUCF.** Maankäyttösektori (en. land use, land use change and forestry).

**Päästöbudjetti.** Suurin sallittu hiilidioksidiksi yhteismitallistettujen kasvihuonekaasujen kumulatiivinen määrä, joka on yhteensopiva esimerkiksi 1,5 asteen tavoitteen kanssa joko globaalilla tai kansallisella tasolla. Sisältää oletuksia globaaleista pienhiukkasten tulevaisuuden päästöistä.

**Sallittu lämmitysvaikutus.** Suurin sallittu tulevaisuuden kasvihuonekaasupäästöjen lämmitysvaikutus, jolla globaali keskilämpötila nousee korkeintaan 1,5 astetta 1850–1900 keskiarvon yläpuolelle. Voidaan määritellä joko globaalilla tasolla tai laskemalla kansallinen osuus.

**WAM-CN-skenaario** (With additional measures carbon neutrality). Suomen ilmastolain mukaiseen hiilineutraaliustavoitteeseen ja HIISI-projektiin perustuva skenaario Suomen kasvihuonekaasupäästöille ja nieluille. Tässä raportissa skenaariosta on käytetty kaikkien sektoreiden muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjä (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, F-kaasut). Ks. liite 5.

# 1. JOHDANTO

Pariisin ilmastopoliittinen sopimus (YK 2015) solmittiin vuonna 2015. Sopimuksen tavoite, johon sen osapuolet ovat sitoutuneet, on rajoittaa globaalin keskilämpötilan nousu selvästi alle kahden asteen suhteessa esiteolliseen aikaan ja pyrkiä rajoittamaan se 1,5 asteeseen. Myöhemmin Pariisin sopimuksen osapuolet ovat sopineet keskittyvänsä 1,5 asteen tavoitteeseen (UNFCCC 2021, 2023) Sopimus edellyttää maiden tarjoavan ajassa tiukentuvia päästövähennyslupauksia tämän tavoitteen saavuttamiseksi. Päästövähennysten sopivuutta yhteisen tavoitteen saavuttamiseen arvioidaan yhteisesti viisivuotiskausin ja arvion pohjalta ilmastotoimia pyritään tehostamaan.<sup>1</sup> Hallitustenvälisen ilmastopaneelin, IPCC:n, 1,5 asteen erikoisraportti (2019) osoitti, että mikäli lämpötilan annetaan nousta kaksi astetta, ilmastomuutoksen aiheuttamat vahingot kasvavat todella merkittävästi verrattuna 1,5 asteeseen. Raportin julkistamisen jälkeen useat valtiot ja Euroopan unioni (EU) ovat päivittäneet ilmastotavoitteitaan vastaamaan paremmin 1,5 asteen tavoitetta.

Yksittäisen maan kansallisten tavoitteiden määrittäminen 1,5 asteen tavoitteen mukaisiksi on kuitenkin lähtökohtaisesti haasteellista. Tehtävänä on ratkaista osuus, jota maa voi pitää omana reiluna osuutenaan 1,5 asteen mukaisesta hiilibudjetista yhteisen tavoitteen saavuttamiseksi. Hiilibudjetilla tarkoitetaan tietyn aikaikkunan yli yhteenlaskettuna suurinta määrää CO<sub>2</sub>-päästöjä, jolla ilmaston lämpeneminen ei ylittäisi tavoitetasoa, kuten 1,5 asteen tavoitetta (Rogelj ym. 2016). Kansallisen hiilibudjetin määrittämisessä yhdistetään luonnontieteellisesti määritelty hiilibudjettilaskenta kunkin maan näkemykseen siitä, mikä on maan reilu osuus globaalista ilmastotyöstä.

Globaalin reiluuden vaatimus nousee sekä YK:n ilmastopoliittisesta vuodelta 1992 (YK 1992) että Pariisin ilmastopoliittisesta. Pariisin sopimuksen artikla 2 toteaa, että sopimus pannaan täytäntöön oikeudenmukaisuutta noudattaen sekä muun muassa yhteisen, mutta eriytyneen vastuun periaatetta noudattaen. Oikeudenmukaisuuden odotetaan ohjaavan myös kansallisten päästövähennystavoitteiden asettamista (Art. 4.1). Yhteisen, mutta eriytyneen vastuun periaatteen mukaan kehittyneiden maiden tulisi toimia edelläkävijöinä globaaleissa ilmastotoimissa ja päästövähennyksissä (Art 4.1, 4.3, 4.4). Oikeudenmukaisen kansallisen päästövähennystavoitteen määrittely Pariisin sopimuksen kollektiivisten tavoitteiden toteuttamisesta on Pariisin sopimuksessa jätetty kansallisesti määriteltäväksi. Globaali reiluus tai oikeudenmukaisuus onkin normatiivinen käsite, eikä yksikäsitteisesti oikeaa kriteeriä ole. Ilmastotutkimuksessa on analysoitu ja operationalisoitu useita oikeudenmukaisuuden kriteereitä, kuten tasajaon ja historiallisen vastuun periaatteita sekä erilaisia kehittyneiden maiden suurempaa vastuuta korostavia määrittystapoja (ks. esim. Ollikainen ym. 2019).

Euroopan maista Britannia on ensimmäinen, joka hahmotti päästövähennystavoitteensa yksipuolisesti jo paljon ennen Pariisin ilmastopoliittisesta sitoutuen 80 prosentin päästövähennykseen vuoteen 2050 mennessä (ks. esim. Climate Change Committee 2020). Pariisin sopimuksen solmimisen jälkeen Britannia, Hollanti, Suomi, Ruotsi ja Tanska etunenässä hahmottivat kansalliset pitkän aikavälin ilmastotavoitteet, jotka olisivat linjassa Pariisin sopimuksen 1,5 asteen tavoitteen kanssa. Suomen ilmastopaneeli laati ympäristöministerin pyynnöstä tarkastelun ja suosituksen Suomen globaalisti oikeudenmukaiseksi nettopäästöjen vähennyspoluksi, joka olisi sopusoinnussa 1,5 asteen globaalin lämpenemisen tavoitteen kanssa (Ollikainen ym 2019, Suomen ilmastopaneeli 2021). Vuonna 2022

---

<sup>1</sup> Ensimmäinen arvio hillintätöiden tilanteesta tehtiin Dubain ilmastokokouksessa (COP28) 2023 ja kokous totesi, että valtioiden tulee tehostaa ilmastotoimia merkittävästi. Ensimmäistä kertaa COP-sopimukseen kirjattiin irtaantuminen fossiilista polttoaineista.

uudistettuun ilmastolakiin (423/2022) kirjatut kansalliset päästövähennystavoitteet sekä tavoite saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ovat yhdenmukaisia Ilmastopaneelin esittämän päästöpolun kanssa. Päästöpolku ja Suomen hiilineutraaliustavoite sisältävät EU:n ilmastoneutraaliustavoitteen tavoin myös muut ihmisen toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasut kuin CO<sub>2</sub> sekä kasvihuonekaasuinventaarion mukaiset maankäyttösektorin (Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) päästöt ja nielut.

Suomen ja yllä mainittujen maiden määrittämä globaalisti oikeudenmukainen päästöpolku perustuu kahteen keskeiseen oletukseen: Hiilibudjetti rajoittaa kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää, ja IPCC:n ohjeiden (IPCC 2006) mukaista kasvihuonekaasuinventaariota voidaan käyttää päästöjen ja hiilibudjetissa pysymisen seuraamiseen. Inventaariolaskenta toimii esimerkiksi myös EU:n ilmastopolitiikan suunnittelun perustana ja Pariisin ilmastopimuksen vuotuisen seurannan ohjeena. On kuitenkin syytä huomata, että IPCC:n laskemat globaalit hiilibudjetit ja ilmastopolitiikan seurannassa käytetyt kansainvälisesti sovitut kasvihuonekaasuinventaariot eroavat menetelmällisesti toisistaan kolmen asian suhteen.

Ensinnäkin EU:n ja YK:n ilmastopolitiikka perustuu kasvihuonekaasuinventaarioon, joka käsittää CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ja F-kaasut. IPCC:n laskema hiilibudjetti sen sijaan on määritelty pelkästään hiilidioksidille, mutta hiilibudjetin suuruuteen vaikuttavat tehtävät oletukset muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen sekä aerosolien päästöistä tulevaisuudessa (Lamboll ym. 2023, Rogeli ym. 2018). Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus otetaan huomioon lämpötilarajaa tarkastellessa, mutta niiden päästömäärille ei voida asettaa hiilibudjettia vastaavaa yksikäsitteistä raja-arvoa.

Toinen ero liittyy eri kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitallistamiseen. Ilmastopolitiikassa eri päästöt yhteismitallistetaan CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi käyttäen IPCC:n arviointiraporttien antamia globaaleja lämmityspotentiaali-, eli GWP100-kertoimia (Pierrehumbert 2014). Tällöin eri kasvihuonekaasujen tonnin suuruisen päästön lämmitysvaikutus on muutettu vastaamaan hiilidioksiditonin aiheuttamaa lämmitysvaikutusta 100 vuoden aikana. Näitä kertoimia ei kuitenkaan käytetä IPCC:n arviointiraporttien hiilibudjettien laskelmissa, vaan CO<sub>2</sub>-päästöjen, muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja aerosolien vaikutus lämpenemiseen perustuu tarkempaan fysikaaliseen simulointiin. GWP100-kertoimien heikkous on se, että niillä ei pystytä kuvaamaan kovin tarkasti eri kaasujen lämmitysvaikutusta eri aikaskaaloissa. Ilmastopolitiikan kannalta tärkeää on huomata, että ne aliarvioivat metaanin lämmitysvaikutusta lyhyellä (vuosikymmenten) aikaskaalalla ja yliarvioivat sen yli sadan vuoden aikaskaalalla.

Kolmas ero ilmastomallinnuksen ja inventaariolaskennan soveltamisen välillä koskee LULUCF-sektorin päästö- ja nielulaskentaa. Maankäytön ilmastopolitiikan perustana olevissa kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisissa nettopäästöissä ihmisperäiseksi lasketaan kaikki ihmiskäytössä olevan maan päästöt ja nielut. Tämä laskentatapa perustuu IPCC:n antamaan ohjeistukseen (IPCC 2006). Sen sijaan esimerkiksi IPCC:n arviointiraporttien hiilibudjetteja laskettaessa käytetään globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä, joissa ihmisperäiseksi on laskettu ainoastaan suoraan ihmisen toimesta, esimerkiksi maankäytön muutoksista tai metsien hakkuista, aiheutuvat muutokset hiilivarastoissa tai päästöissä (Friedlingstein ym. 2022). Ihmisperäiseksi ei tässä laskentamallissa lasketa niin sanottuja epäsuoria nieluvaikutuksia (ks. liite 3). Epäsuorilla nieluvaikutuksilla tarkoitetaan esimerkiksi ilmaston lämpenemisestä ja kasvaneesta CO<sub>2</sub>-pitoisuudesta aiheutuvaa muutosta metsien kasvuun tai ilmaston lämpenemisen vaikutuksia maaperäpäästöihin verrattuna esiteolliseen ilmastoon (Grassi ym. 2021). Hiilibudjettilaskennassa nämä vaikutukset luokitellaan osaksi taustalla olevaa ”luonnollista nielua”, myös ihmiskäytössä olevien alueiden osalta. Esimerkiksi globaalin keskilämpötilan nousun pysäyttäminen vaatii nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöjä globaalien hiilenkiertomallien tavalla laskettuna, jolloin epäsuoria nieluvaikutuksia ei lasketa mukaan nettopäästöihin. LULUCF-sektorin päästöjen nettopäästöjen laskentatapaerojen takia maiden

pitäisi kollektiivisesti asettaa tiukempia päästötavoitteita, jotta ne olisivat sopuoinnussa globaalien lämpötilatavoitteiden kanssa (Gidden ym. 2023).

Euroopan ilmastopaneelin, ESABCC:n, (The European Scientific Advisory Board on Climate Change 2023) raportti ja suositus EU:lle vuoden 2040 ilmastotavoitteiksi on ensimmäinen EU:n ilmastopolitiikkaa luotaava raportti, jossa otetaan huomioon ilmastonmuutoksen epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin nettopäästöjen laskentaan. ESABCC:n suositukset EU:n päästöbudjetiksi perustuvat sekä CO<sub>2</sub>- että muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen osalta toteuttamiskelpoisiin skenaarioihin, jotka globaalilla tasolla ovat lähes yhteensopivia 1,5 asteen tavoitteen kanssa. Toteuttamiskelpoisuutta arvioitaessa raportissa hylättiin skenaarioita, joissa esimerkiksi hiilidioksidin talteenoton lisääntyminen lähitulevaisuudessa tai loppuenergian kysynnän lasku katsottiin epärealistiseksi. Toteuttamiskelpoisuuden ottaminen lähtökohdaksi eroaa esimerkiksi Suomen ilmastopaneelin oikeudenmukaisuusperiaatteisiin perustuvista tarkasteluista.

Oikeudenmukaisuusperiaatteista (sisältäen esim. väkiluvun, maksukyvyyn tai historiallisen vastuun huomioimisen) johdettavia päästöbudjetteja tarkasteltiin myös ESABCC:n raportissa, mutta ne olivat selvästi pienempiä kuin toteuttamiskelpoisiksi arvioituihin skenaarioihin perustuvat päästöbudjetit. ESABCC:n raportin lähestymistapa ja ensimmäiset tieteelliset arviot epäsuorista nieluvaikutuksista (Grassi ym. 2021 ja 2023) antavat uutta tietopohjaa EU:n ja sen jäsenvaltioiden ilmastopolitiikan arviointiin. Ne antavat myös hyvän lähtökohdan tarkastella uudelleen, kuinka hyvin inventaariolaskentaan ja sen mukaiseen ilmastopolitiikkaan perustuva nettopäästöpolku vastaa ilmastotieteellistä lähestymistapaa, jossa esimerkiksi 1,5 asteen tavoitteen mukaisten päästövähennystavoitteiden määrittäminen perustuu hiilenkiertomalleihin, epäsuoriin nieluvaikutuksiin sekä oletuksiin muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kehityksestä.

Tässä raportissa arvioidaan uuden tiedon valossa Suomen hiilineutraaliustavoitteen toteuttavaa päästöpolkua, kun inventaariolaskentaan perustuvaa lähestymistapaa tarkennetaan vastaamaan paremmin ilmastotieteellistä mallinnusta. Arvioinnin toteuttaminen edellyttää sitä, että ratkaistaan, kuinka inventaariolaskennan ja globaalien hiilenkiertomallien välinen ero ihmisperäisten nettopäästöjen laskennassa voidaan ottaa huomioon ja kuinka muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt mallinnetaan inventaariolaskentaan perustuvassa politiikan suunnittelussa. Siksi raportissa etsitään menetelmällisesti yhteensopivaa lähestymistapaa IPCC:n raporttien mukaisten globaalien hiilibudjettien kanssa. Sen perusteella tuotetaan Suomelle kaksi vaihtoehtoista päästövähennyspolkua, jotka olisivat yhteensopivia globaalin 1,5 asteen tavoitteen kanssa. Saatuja polkuja verrataan Ilmastopaneelin tuottamaan inventaariolaskennan mukaiseen polkuun (Suomen ilmastopaneeli 2021).

## 2. MENETELMÄ EPÄSUORIEN NIELUVAIKUTUSTEN JA MUIDEN KUIN CO<sub>2</sub>-PÄÄSTÖJEN HUOMIOON OTTAMISEKSI GLOBAALISTI REILUN PÄÄSTÖBUDJETIN JA NETTOPÄÄSTÖPOLUN MÄÄRITTÄMISESSÄ

Kasvihuonekaasuinventaarion nettopäästöihin pohjaavaa reilua osuutta globaaleista ilmastomuutoksen hillintätoimista voidaan lähestyä tarkastelemalla reilua osuutta ilmakehän lämmittämisestä reilun hiilibudjettiosuuden sijaan. Tämä lähestymistapa mahdollistaa myös muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ajassa muuttuvien ilmastovaikutusten huomioon ottamisen mallinnuksen avulla. Tähän liittyen termiä päästöbudjetti käytetään tässä raportissa kuvaamaan tulevaisuuden kaikkien kasvihuonekaasujen päästöjen suurinta määrää, jolla lämpeneminen ei ylitä 1,5 asteen rajaa esiteolliseen ilmastoon verrattuna. Pelkän CO<sub>2</sub>:n osuuden sisältävä hiilibudjetti on puolestaan jäljelle jäävä osuus, joka saadaan, kun päästöbudjetista vähennetään tulevaisuuden muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt. Päästöbudjetti perustuu arvioon tulevaisuuden kasvihuonekaasupäästöjen sallitusta lämmitysvaikutuksesta, jolla lämpeneminen ei ylitä 1,5 asteen rajaa. Siinä otetaan huomioon jo päästettyjen kasvihuonekaasujen lämmittävän vaikutuksen väheneminen ajan myötä. Sallitun lämmitysvaikutuksen ja päästöbudjetin takana oleva teoria ja tämän raportin laskelmat on esitetty liitteessä 1.

Tarkastelun lähtökohdaksi otetaan EU:n ja muiden Pariisin sopimuksen osapuolien nykyisen ilmastopolitiikan mukainen lähestymistapa, inventaariolaskennan suora sovellus. Siinä hiilibudjettiin nojaava päästövähennyspolku lasketaan käyttämällä kasvihuonekaasuinventaarion mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä, kun hiilibudjettiin sovitetaan myös muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt käyttämällä GWP100-kertoimia. Tämä laskentatapa ei siis ota huomioon kasvihuonekaasuinventaarion ja globaalien hiilenkiertomallien välistä määritelmällistä eroa LULUCF-sektorin nettopäästöissä, eikä GWP100:n käyttöön liittyviä ongelmia. Toisaalta kaikkien kasvihuonekaasujen laskeminen hiilibudjetin alle on hiilibudjetin alkuperäistä ideaa tiukempi tulkinta.

Inventaariolaskennan suoran sovelluksen muuttaminen vastaamaan ilmastotieteellistä lähestymistapaa edellyttää epäsuorien nieluvaikutusten huomioimista. Se voidaan toteuttaa joko globaalilla tai kansallisella tasolla. Jäljellä olevan hiilibudjetin arvioimiseksi tulee lisäksi tehdä oletuksia muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kehityksestä globaalilla ja kansallisella tasolla, sillä muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt kuluttavat osan päästöbudjetista ja tulevaisuuden oletetut aerosolipäästöt vaikuttavat päästöbudjetin suuruuteen. Jotta vaihtoehtoisia laskentatapoja voidaan kehittää, on syytä tarkastella, mikä merkitys muilla kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöillä ja epäsuorilla nieluvaikutuksilla on.

### 2.1 MUUT KUIN CO<sub>2</sub>-PÄÄSTÖT

Muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt muodostavat suuren haasteen päästö- ja hiilibudjettien määrittelyssä. Samaan lämpötilavaikutukseen johtavien skenaarioiden muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kokonaismäärä riippuu eri kasvihuonekaasujen ja aerosolityyppien keskinäisestä jakaumasta sekä niiden ajallisesta jakautumisesta (aerosolien tapauksessa myös maantieteellisestä jakaumasta). Esimerkiksi lähellä vuotta 2050 päästetyllä metaanilla on huomattavasti vuonna 2020 päästettyä metaania suurempi lämpötilavaikutus vuonna 2050. Tämän vuoksi tulevaisuuden muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen kansallista osuutta ei voida yksikäsitteisesti ja suoraviivaisesti määrittellä

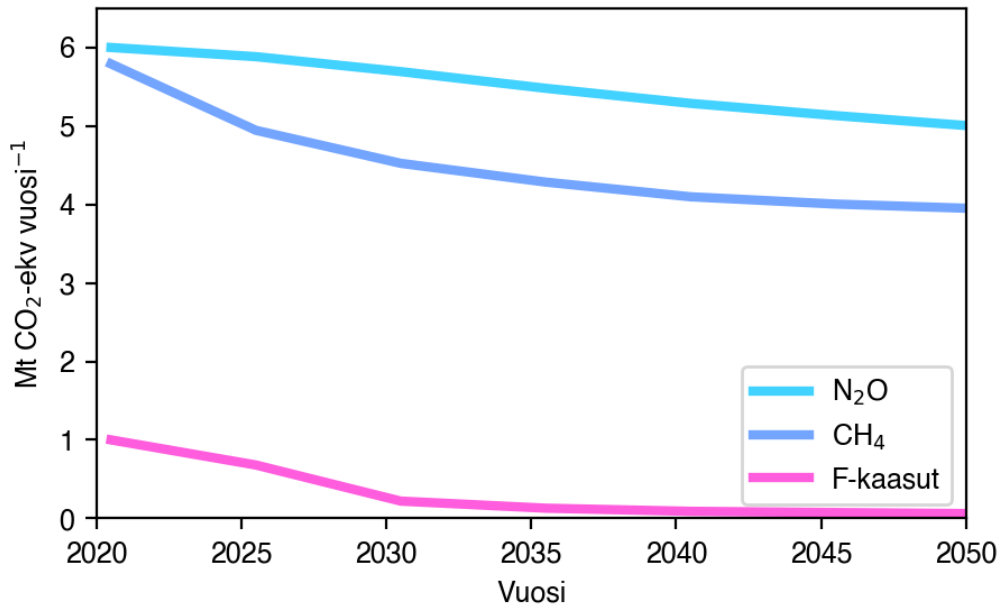
kuten hiilibudjetin tapauksessa, sillä muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjen osalta päästöjen syntyajankohdalla on merkitystä. Jotta tulevaisuuden kasviuonekaasupäästöjen sallittu lämmitysvaikutus voidaan laskea, tarvitaan globaalin tason arvio menneisyyden päästöjen lämmittävän vaikutuksen vähenemiselle ja aerosolipäästöjen viilentävän vaikutuksen muutokselle. Toisin kuin hiilidioksidin tapauksessa, ennen vuotta 2020 päästettyjen muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen lämmittävä vaikutus muuttuu ajan kuluessa, koska metaani ja erityisesti aerosolit ovat lyhytikäisiä ilmakehässä.

Ilmastopolitiikassa muut kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen päästöt yhteismitallistetaan yleensä CO<sub>2</sub>:n kanssa käyttämällä GWP100-kerrointa (Pierrehumbert 2014). GWP100-kerroin kertoo, kuinka moninkertaisesti verrattuna yhteen tonniin CO<sub>2</sub>:a yhden tonnin päästö kasviuonekaasua lämmittää ilmastoa 100 vuoden aikajänteellä. GWP-kerroin määritellään kullekin kasviuonekaasulle erikseen. GWP100-kertoimen käytöllä on monia hyviä puolia. Se mahdollistaa kaikkien kasviuonekaasujen samanaikaisen tarkastelun ja edistää toimien kohdistamista päästöjen vähentämiseen näiden kaasujen kesken kustannustehokkaasti. Valittu aikahorisontti 100 vuotta on kuitenkin ilmastopolitiikan tarpeisiin tarpeettoman pitkä ja hidastaa juuri erityisesti metaanipäästöjen vähentämistä.

GWP100 ei kuitenkaan kuvaa päästöjen lämpötilavaikutuksen suhdetta sadan vuoden päästä. Tällä aikavälillä osa ilmaston lisälämpenemisestä on ehtinyt sitoutua valtameriin, ja sitoutuneen lämmön määrä riippuu eri tavalla kaasujen eliniästä ja lämmitysvaikutuksesta kuin GWP:n mittaama kumulatiivinen lämmitysvaikutus. Tämän takia huomattavasti tarkemman arvion eri muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöskenaarioiden vaikutuksesta ilmastoon saa mallintamalla eri kasviuonekaasujen ja aerosolien ilmastovaikutusta huomioiden niiden eliniän ja säteilyominaisuudet eksplisiittisesti GWP100:n käyttämisen sijaan.

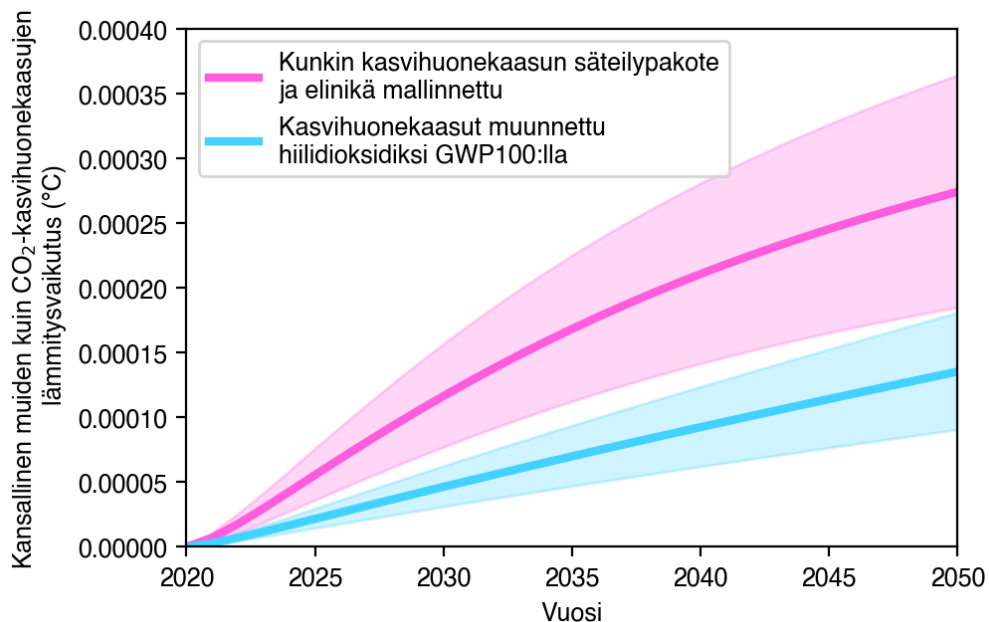
Jatkossa hyödynnetään HIISI-laskelmien (Koljonen ym. 2022) politiikka- eli WAM- (with additional measures) skenaarion muunnosta WAM-CN (with additional measures carbon neutrality) ei-LULUCF-sektoreiden (eli EU:n päästöluokittelun mukaisten taakanjako- ja päästökauppasektoreiden) muille kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöille ja WAM-skenaariota Suomen LULUCF-sektorin muille kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöille (liite 5). Tässä raportissa tähän WAM-CN- ja WAM-skenaariota yhdistelmään viitataan selkeyden vuoksi nimellä WAM-CN. WAM-CN-skenaariosta on laskettu yhteen kaikkien sektoreiden muut kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöt kullekin vuodelle 2020–2050. Tätä muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen kokonaispäästö määrää ajan suhteen käytetään tämän raportin analyysissä. Kuva 1 esittää laskennassa käytettyjen kaikkien sektoreiden yhteenlaskettuja muita kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjä CO<sub>2</sub>-ekvivalentteina GWP100-kertoimia käyttäen.





Kuva 1: Suomen muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöt GWP100-kertoimien avulla CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi (CO<sub>2</sub>-ekv.) muunnettuna WAM-CN-skenaariossa.

Kuvassa 2 puolestaan havainnollistetaan, miten muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen muuntaminen CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi GWP100-kertoimia käyttäen aliarvioi merkittävästi niiden lämmittävää vaikutusta verrattuna mallinnukseen, jossa kunkin kasvihuonekaasun säteilypakote ja elinikä huomioidaan erikseen.



Kuva 2: WAM-CN-skenaarion mukaisten muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, F-kaasut) lämmittävä vaikutus mallinnettuna FaIR 2.1 -mallilla (Leach ym., 2021) kunkin kasvihuonekaasun säteilypakote ja elinikä huomioiden ja 2) muuntamalla kaasut ensin CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi GWP100-kertoimia käyttämällä. Väritetyt alueet kuvaavat 95 %:n virherajoja.

## 2.2 EPÄSUORAT NIELUVAIKUTUKSET

Hiilibudjetti määrittelee tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen enimmäismäärän tietylle globaalille keskilämpötilan nousulle, kuten 1,5 asteelle, verrattuna esiteolliseen. LULUCF-sektorin bioperäiset CO<sub>2</sub>-päästöt ja -nielut kuluttavat tai kasvattavat jäljellä olevaa hiilibudjettia samoin kuin fossiiliset CO<sub>2</sub>-päästöt tai tekniset nielut, joten LULUCF-sektorin nettopäästöjen kehitys on olennaista Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamisen kannalta. Hiilibudjetin ja ilmastotavoitteiden seurannan kannalta on kuitenkin ongelmana, että globaalilla tasolla LULUCF-sektorin vuosittaisten kansallisten kasvihuonekaasuinventarioiden mukaisten hiilidioksidin nettopäästöjen on arvioitu olevan noin 7 Gt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> pienemmät kuin hiilibudjetin taustalla olevien menetelmien mukaan (Grassi ym. 2023)<sup>2</sup>. Ero on merkittävä, sillä esimerkiksi fossiiliset CO<sub>2</sub>-päästöt olivat vuonna 2022 arviolta 37 Gt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>.

Mahdollisesti tärkein syy tälle 7 Gt:n erolle on eroavaisuus koskien ihmisperäisen päästön sekä nielun määritelmiä eri laskentamenetelmissä. Kasvihuonekaasuinventariossa kaikki ihmiskäytössä olevien maiden päästöt ja nielut lasketaan ihmisperäisiksi. Globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaan taas ihmisperäisiksi lasketaan ainoastaan suorat vaikutukset, kuten maankäytön muutokset, hakkuut ja takaisinkasvu, mutta ei kasvaneesta CO<sub>2</sub>-pitoisuudesta ja ilmastomuutoksesta johtuvia epäsuoria nieluvaikutuksia (Friedlingstein ym. 2022).

Erolla on suuri käytännön merkitys. Mikäli kaikki maat tavoittelisivat 1,5 asteen hiilibudjettia kasvihuonekaasuinventarioon perustuvan menetelmän pohjalta, niiden yhteenlasketut päästöt olisivat suuremmat kuin globaalilla hiilibudjetin sallima määrä (Grassi ym. 2021). Tämän takia laskentamenetelmien erot tulisi sovittaa toisiinsa, jotta globaalilla hiilibudjettia voisi käyttää inventaariolaskentaan perustuvan ilmastopolitiikan pohjana. Globaalilla päästöbudjetin laskenta vuosille 2020–2050 on kuvattu liitteessä 1.

Epäsuorat nieluvaikutukset eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden vaikutus ihmiskäytössä olevilla mailla arvioitiin kahden tutkimuksen tulosten perusteella (Grassi ym. 2021, 2023). Näiden tutkimusten menetelmässä metsien kasvua hoidetulla metsämaalla mallinnettiin ilmastomuutoksen kanssa ja esiteollisella ilmastolla. Näiden simulaatioiden erotuksesta laskettiin epäsuorat nieluvaikutukset olettamalla, että epäsuorat nieluvaikutukset ovat yhtä suuria luonnontilaisissa ja hoidetuissa metsissä, ja että ihmisperäisen epäsuoran nieluvaikutuksen ja suoran vaikutuksen summa vastaa mitattavia nettopäästöjä. Epäsuorat nieluvaikutukset Suomessa olivat edellä kuvatun analyysin mukaan keskimäärin -26 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> vuosina 2000–2020 ja -14 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> vuosina 2020–2050 (ks. tarkemmin liite 3).

Sanotun nojalla epäsuorat nieluvaikutukset ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävä vaikutus voidaan sovittaa päästö- ja hiilibudjettien laskentaan usealla tavalla. Taulukon 1 mukainen nelikenttä havainnollistaa sovitustapojen vaihtoehtoja.

---

<sup>2</sup> v<sup>-1</sup> =1/vuosi

Taulukko 1: Nelikenttä eri vaihtoehdoille sovittaa inventaariolaskennan ja ilmastotieteen määrittelemien päästötavoitteiden välisiä ristiriitoja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen ja epäsuoran nielun suhteen joko kansallisella tai globaalilla tasolla.

Tapa 1) Globaalilla tasolla sovitettavat epäsuorat nieluvaikutukset ja globaalit muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasupäästöt	Tapa 3) Kansallisella tasolla sovitettavat epäsuorat nieluvaikutukset ja globaalit muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasupäästöt.
Tapa 4) Globaalilla tasolla sovitettavat epäsuorat nieluvaikutukset ja kansalliset muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasupäästöt	Tapa 2) Kansallisella tasolla sovitettavat epäsuorat nieluvaikutukset ja kansalliset muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasupäästöt.

Ylin vasen ruutu (tapa 1) sovittaa globaalin päästöbudjetin sekä epäsuorien nieluvaikutusten että muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen suhteen yhteensopivaksi kasvihuonekaasuinventaarion laskennan kanssa. Ruutu alhaalla oikealla (tapa 2) sovittaa päästöbudjetin puhtaasti kansallisesti. Tässä raportissa käsitellään pääosin näiden kahden ruudun mukaisia menetelmiä. Vasen ruutu alhaalla (tapa 4) ja oikea ylhäällä (tapa 3) kuvaavat globaalin ja kansallisen sovittamisen yhdistelmiä. Näiden menetelmien päätulokset on esitetty liitteessä 2.

## 2.3 TARKASTELUUN VALITUT TAVAT SOVITTAA INVENTAARIOLASKENNAN MUKAINEN MENETELMÄ VASTAAMAAN ILMASTOTIETEEN MUKAISTA PÄÄSTÖBUDJETTIA

EU ja muut Pariisin sopimuksen osapuolet ovat perustaneet ilmastopolitiikkansa inventaariolaskentaan. Sen nojalla voidaan suhteellisen suoraviivaisesti määrittää kunkin maan päästöbudjetti ja polku nettopäästöjen vähentämiseksi.

### INVENTAARIOLASKENNAN SUORA SOVELLUS

Nettopäästöpolku määritetään osittamalla kansallisesti reilu osuus globaalista hiilibudjetista yhdistämällä kansallisen LULUCF-sektorin nettopäästöt sekä kansalliset ei-LULUCF CO<sub>2</sub>-päästöt ja kaikkien sektoreiden muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt mukaan polun määrittämiseen.

Inventaariolaskennan suora sovellus sovitetaan tässä raportissa yhteensopivaksi globaalien hiilenkiertomallien ja IPCC:n tieteellisten raporttien määritelmien kanssa kahdella vaihtoehdoisella menetelmällä. Menetelmissä globaalien hiilenkiertomallien ja IPCC:n tieteellisten raporttien mukaisesta päästöbudjetista vähennetään arvio epäsuorista nieluvaikutuksista joko globaalilla tai kansallisella tasolla. Näin saadaan päästöbudjetille arvio, joka olisi yhteensopiva kasvihuonekaasuinventaarion mukaisten CO<sub>2</sub>-päästöjen kanssa. Vastaavasti kummassakin tavassa joko globaaliin tai kansalliseen päästöbudjettiin lisätään korjaustermi, jotta kasvihuonekaasuinventaarion mukainen päästöbudjetti on

yhteensopiva eksplisiittisesti mallinnetun muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen vuoden 2050 lämmittävän vaikutuksen kanssa<sup>3</sup> (ks. liite 1).

#### TAPA 1: PÄÄSTÖBUDJETIN SOVITUS GLOBAALILLA TASOLLA

Gloaalien hiilenkiertomallien ja kasvihuonekaasuinventaarion erilaiset määritelmät LULUCF-sektorin nettopäästöille yhteensovitetaan epäsuorien nieluvaikutusten avulla (Grassi ym. 2021). Sovitus tehdään lisäämällä vuosien 2020–2050 globaalien epäsuorien nieluvaikutusten summa globaaliin päästöbudjettiin ennen kuin kansallinen reilu osuus lasketaan. Kyseinen sovitus pienentää globaalia päästöbudjettia. Globaaliin päästöbudjettiin myös lisätään oletettuun globaalin tason muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuskenaarioon ja tarkempaan ilmastomallinnukseen perustuva (negatiivinen) sovitusermi, jotta kansallisella tasolla voidaan suoraan käyttää muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen GWP100-kertoimilla laskettua hiilidioksidiekvivalenttimäärää.

#### TAPA 2: PÄÄSTÖBUDJETIN SOVITUS KANSALLISELLA TASOLLA

Tässä laskentatavassa sovituksia ei tehdä globaalilla tasolla, vaan Suomelle jyvitetty kansallinen päästöbudjetti sovitetaan yhteensopivaksi inventaariolaskennan mukaisten LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöjen kanssa kansallisella tasolla. Sovitus tehdään lisäämällä vuosien 2020–2050 kansallisten epäsuorien nieluvaikutusten summa kansalliseen päästöbudjettiin. Samoin kuin globaalilla tasolla, tämä sovitusermi pienentää päästöbudjettia. Sovitusermi muille kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuille lasketaan vastaavasti kuin tavassa 1, mutta käyttäen oletettua kansallista muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuskenaariota.

Tavat 1 ja 2 ratkaisevat epä johdonmukaisuuden, joka aiheutuu erosta kasvihuonekaasuinventaarion ja globaalien hiilenkiertomallien tavassa käsitellä LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöjä. Tapa 1 tekee tämän globaalilla ja tapa 2 kansallisella tasolla, kuten taulukossa 1 on esitetty. Epäsuorien nieluvaikutusten huomioiminen on yksinkertaistus, eikä siinä huomioida esimerkiksi suorien ja epäsuorien nieluvaikutusten keskinäisestä vuorovaikutuksesta syntyvää nielun muutosta (Pongratz ym. 2014). Epäsuoriin nieluvaikutuksiin liittyy myös suuria tieteellisiä epävarmuuksia. Tällä hetkellä parempaa menetelmää niiden huomioimiseksi ei kuitenkaan ole vielä saatavilla.

Tavalla 1 laskettuna epäsuorat nieluvaikutukset lasketaan mukaan Suomen hiilinieluksi, kun tapa 2 puolestaan laskee Suomen hiilinieluksi vain suorat vaikutukset. Tapa 2 on LULUCF-sektorin ja epäsuorien nieluvaikutusten osalta samankaltainen kuin ESABCC:n raportissa (2023) käytetty menetelmä, jossa epäsuorien nieluvaikutusten osuus vähennettiin päästöbudjettiarvioista, jotta ne olisivat yhteismitallisia kasvihuonekaasuinventarioiden kanssa. ESABCC:n raportissa ei rajoitettu muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjä oikeudenmukaisuusperiaatteiden perusteella, kuten tässä raportissa tehdään.

<sup>3</sup> Muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen mallinnukseen liittyy kiinnostava piirre: niiden arvioitu päästökehitys tarkastelujaksolla riippuu itse asiassa harjoitetusta ilmastopolitiikasta. Täten politiikkaa käytetään näiltä osin tuottamaan hiilibudjetti politiikan muotoilua varten. Tämä tuo politiikkaepävarmuutta luonnontieteellisen epävarmuuden lisäksi päästö- ja hiilibudjettien laskentaan.

### 2.3.1 Laskentamenetelmiin liittyvä epävarmuus

Epäsuorien nieluvaikutusten määrittämiseen sekä muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kehityksen ennustamiseen ja ilmastomallinnukseen liittyy merkittävää epävarmuutta (ks. tarkempi epävarmuusanalyysi liitteessä 2), josta on syytä olla tietoinen. Epäsuorien nieluvaikutusten määrittäminen on haastava tehtävä, sillä esimerkiksi ilmastomuutoksen metsien kasvua lisäävän vaikutuksen erottaminen metsänhoidon tehostumisesta sekä jalostuksen ja lannoituksen kasvua lisäävästä vaikutuksesta on hankalaa. Lisäksi eri mallit antavat hyvin erilaisia tuloksia epäsuorista nieluvaikutuksista. Epäsuorien nieluvaikutusten määrittämisessä joudutaan myös ottamaan kantaa maankäytön muutoksen eli erityisesti metsäkadon tulevaan kehittymiseen. Oletettavasti tämä metsäkatoon liittyvä skenaarioepävarmuus on kuitenkin pientä malliepävarmuuteen verrattuna. Samalla on syytä muistaa, että myös itse LULUCF-nettopäästöjä koskevaan inventaariolaskentaan liittyy suurta epävarmuutta, kuten viime vuosina tehdyt useat korjaukset osoittavat. Epävarmuus ei kuitenkaan heikennä inventaariolaskennan hyötyä ilmastotoimien seurannassa.<sup>4</sup>

Muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kehityksen ennakointi ja niiden ilmastovaikutuksen mallintaminen on toinen epävarmuuslähde. Näiden päästöjen kehitys riippuu lähiaikojen ilmastopolitiikasta. Esimerkiksi EU:lla on strategia metaanipäästöjen vähentämiseksi (EU 2020) ja vuonna 2024 se hyväksyi metaaniasetuksen (EU 2024), jolla pyritään leikkaamaan energiasektorin metaanipäästöjä. Lisäksi EU sisällyttää meriliikenteen metaanipäästöt mukaan päästökauppaan (ETS) nyky suunnitelmien mukaan vuonna 2026 (Traficom 2023). Euroopan komissio on myös selvittänyt päästökaupan mahdollisuutta maatalouden päästöille, joissa metaani ja dityppioksidi näyttelevät suurta roolia.

Myös muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävään vaikutukseen liittyy luonnontieteellistä epävarmuutta skenaarioepävarmuuden lisäksi. Tätä epävarmuutta voidaan mallintaa hyödyntämällä muihin kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuihin ja yleisesti ilmastoon liittyvien parametrien todennäköisyysjakaumia. On hyvä huomata, että yleisesti käytettyihin GWP100-kertoimiin liittyy myös epävarmuutta (Derwent 2020), mutta sitä ei tässä raportissa huomioida osana inventaariolaskennan suoran sovelluksen epävarmuusanalyysia. Epävarmuuksien vuoksi on syytä tarkastella paitsi parhaana pidettäviä ennusteita, myös tulosten jakaumaa, jotta epävarmuuksien laajuus ja suunta tulisi ymmärretyksi tavoissa 1 ja 2.

---

<sup>4</sup> Ilmastopaneeli tarkasteli inventaariolaskentaan liittyvää epävarmuutta tekemällä herkkyysanalyysia hiilibudjetin ja LULUCF-nettonielun koon suhteen. Hiilibudjettilaskenta ja kiinnitetty aikahorisontti merkitsee kuitenkin sitä, että epävarmuus ei ratkaisevasti vaikuttanut tuloksiin.

### 3. SUOMEN PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTIEEN MÄÄRITTELY TARKASTELTAESSA SUOMEN REILUA OSUUTTA 1,5 ASTEEN TAVOITTEESSA

Tarkasteluväliksi on valittu vuodet 2020–2050 mukailien IPCC:n arviointiraporttien viestiä, jonka mukaan 1,5 asteen tavoite vaatii nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöjen saavuttamisen 2050-luvun alkupuolella (Calvin ym. 2023). Hiilibudjetin ja siitä johdettavien päästövähennyspolkujen taustaoletuksena on HIISI-projektin (Koljonen ym. 2022) mukainen WAM-CN-skenaario (with additional measures carbon neutrality, ks. liite 5), joka sisältää myös yllä viitatu muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöt vuosille 2020–2050. LULUCF-nettopäästöiksi kasvihuonekaasuinventaarion mukaisella määritelmällä (sisältää sekä suorat että epäsuorat ihmisperäiset nieluvaikutukset) oletettiin Ilmastopaneelin edellisten raporttien tapaan –21 Mt CO<sub>2</sub>-ekv v<sup>-1</sup>, josta keskimäärin 2,7 Mt CO<sub>2</sub>-ekv v<sup>-1</sup> tulkittiin WAM-CN-skenaario mukaisesti muiksi kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöiksi. Tällöin LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöiksi laskettiin –23,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> (negatiiviset arvot tarkoittavat nielua) ja kumulatiivisesti vuosille 2020–2050 –735 Mt CO<sub>2</sub>.

Taulukossa 2 määritetään välivaiheittain kullakin laskentatavalla (inventariolaskennan suora sovellus, tapa 1 ja tapa 2) Suomen kasvihuonekaasuinventaarion kanssa yhteensopivaksi sovitettut päästöbudjetti sekä hiilibudjetti kaikille sektoreille ja ei-LULUCF-sektoreille vuosille 2020–2050. Inventariolaskennan suoraa sovellusta varten globaali hiilibudjetti päivitettiin vastaamaan IPCC:n kuudennen arviointiraportin (IPCC 2023) esittämää uusinta hiilibudjettia, 500 Gt CO<sub>2</sub> vuoden 2020 alusta, kun Ilmastopaneelin aiempi laskelma pohjautui IPCC:n 1,5 asteen erikoisraportin esittämään hiilibudjettiin (Rogelj ym. 2018), josta oli vuoden 2020 alussa jäljellä 336 Gt CO<sub>2</sub>. Inventariolaskennan suora sovellus perustuu Ilmastopaneelin aiempien raporttien ratkaisuun käyttää globaalia CO<sub>2</sub>:lle määritettyä hiilibudjettia rajoittamaan kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää eli päästöbudjettia. Tapojen 1 ja 2 pohjalla oleva globaali päästöbudjetti laskettiin IPCC:n kuudennen arviointiraportin arviosta jäljellä olevasta lämpenemisestä (0,43 °C), ennen vuotta 2020 päästettyjen kasvihuonekaasujen lämmittävän vaikutuksen vähenemisestä ja tulevaisuuden aerosolipäästöjen oletetusta muutoksesta (ks. tarkemmin liite 1). Näin globaaliksi päästöbudjetiksi saatiin 875 Gt CO<sub>2</sub>-ekv. Ero inventariolaskennan suoran sovelluksen globaaliin päästöbudjettiin kuvaa suurin piirtein muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen osuutta globaalissa päästöbudjetissa. Tavassa 1 globaali päästöbudjetti sovitetaan inventariolaskennan kanssa yhteensopivaksi lisäämällä siihen LULUCF-sektorin ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen sovitustermit. LULUCF-sektorin sovitustermi on suuruudeltaan vuosien 2020–2050 globaalien epäsuorien nieluvaikutusten summa –151 Gt CO<sub>2</sub> (laskenta, ks. liite 3). Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen sovitustermi on –362 Gt CO<sub>2</sub>-ekv. Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen sovitustermi sovittaa päästöbudjetin yhteensopivaksi kasvihuonekaasuinventarioiden käyttämän GWP100-muunnoksen kanssa pohjautuen niiden lämmittävän vaikutuksen eroon vuonna 2050 kunkin kaasun ominaispiirteet huomioivan yksinkertaisen ilmastomallin ja GWP100-muunnoksen välillä. Sen sijaan tavassa 2 päästöbudjetti sovitetaan sekä LULUCF-sektorin että muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen osalta myöhemmässä vaiheessa kansallisella tasolla. Inventariolaskennan suorassa sovelluksessa sovittamista ei tehdä ollenkaan. Tämän tuloksena taulukossa 2 kaikki kolme laskennan pohjalla olevaa globaalia päästöbudjettia poikkeavat toisistaan: 500 Gt CO<sub>2</sub>-ekv., 363 Gt CO<sub>2</sub>-ekv. ja 875 Gt CO<sub>2</sub>-ekv.

Kukin globaali hiilibudjetti jyvitetään Suomelle samassa suhteessa kuin Ilmastopaneelin (2021) raportissa (79 Mt CO<sub>2</sub> / 336 000 Mt CO<sub>2</sub> ≈ 0,235 ‰). Inventariolaskennan suoralla sovelluksella saadaan Suomen päästöbudjetiksi ennen kansallisen tason sovituksia 118 Mt CO<sub>2</sub>-ekv., tavalla 1 85 Mt

CO<sub>2</sub>-ekv. ja tavalla 2 206 Mt CO<sub>2</sub>-ekv.<sup>5</sup> Tavan 2 muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen sovitustermi kansallisella tasolla on -292 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Korjaustermi on lähes yhtä suuri kuin muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen yhteismäärä (318 Mt CO<sub>2</sub>-ekv.) GWP100:n avulla laskettuna, joten tarkempi ilmastomallinnukseen perustuva tapa antaa niille lähes kaksinkertaisen lämmittävän vaikutuksen GWP100:n käyttöön verrattuna. Lisäksi tavassa 2 lisätään sovitustermi -438 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. epäsuorien nieluvaikutusten huomioimisesta kansallisella tasolla. Näin saadaan inventaariolaskennan suoralla sovelluksella Suomen sovitetuksi päästöbudjetiksi 118 Mt CO<sub>2</sub>-ekv., tavalla 1 85 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. ja tavalla 2 -523 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Tavan 2 päästöbudjetin negatiivinen arvo tarkoittaa, että GWP100:lla yhteismitallistettuja kasvihuonekaasupäästöjä pitäisi nettona poistaa ilmakehästä vuosien 2020–2050 välillä.

Hiilibudjetit saadaan vähentämällä päästöbudjeteista muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen yhteismäärä 318 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Koska päästöbudjetit on sovitettu tavoissa 1 ja 2 yhteensopiviksi GWP100-perustaisten päästöjen kanssa, ja inventaariolaskennan suorassa sovelluksessa ei sovitusta tehdä, kaikilla tavoilla lasketaan muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen yhteismäärä GWP100:n avulla. Näin Suomen sovitetuksi hiilibudjetiksi (sisältäen ainoastaan CO<sub>2</sub>:n) saadaan inventaariolaskennan suorassa sovelluksessa -200 Mt CO<sub>2</sub>-ekv., tavalla 1 -233 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. ja tavalla 2 -841 Mt CO<sub>2</sub>-ekv.

Ei-LULUCF-sektoreille voidaan laskea hiilibudjetti vähentämällä hiilibudjetista LULUCF-sektorin CO<sub>2</sub>-nettopäästöt (-735 Mt CO<sub>2</sub>-ekv.) inventaariolaskennan mukaisesti.

Inventaariolaskennan suora sovellus antaa Suomelle suurimman ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjetin vuosille 2020–2050 (535 Mt CO<sub>2</sub>). Tämä määrä vastaa hieman yli 14 vuoden fossiilisia CO<sub>2</sub>-päästöjä vuoden 2020 tasolla (37,6 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>) ja sallisi tarkastelujaksolla keskimäärin 17,3 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> päästöt. Se on vain hieman suurempi kuin tavalla 1 määritetty hiilibudjetti (503 Mt CO<sub>2</sub>), joka sallisi keskimäärin 16,2 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> päästöt. Merkillepantavaa on, että tapa 2 johtaa negatiiviseen ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjettiin (-106 Mt CO<sub>2</sub>). Ilmastopolitiikan kielellä tämä tarkoittaa, että aikajänteellä 2020–2050 fossiilisia päästöjä olisi tavan 2 hiilibudjetissa pysymiseksi vähennettävä erittäin voimakkaasti. Lisäksi (teknologisia ja luonnon) nieluja tulisi kasvattaa niin, että Suomi on tarkastelukauden kuluessa merkittävästi negatiivisilla päästöillä, eli siirtyy ilmakehästä hiilidioksidia voimakkaasti poistaviin ratkaisuihin, nettona hiilibudjettien mukaisen määrän ei-LULUCF-sektoreilla. Se tarkoittaisi, että Suomen tulisi tuottaa nettonegatiivisia päästöjä keskimäärin -3,4 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> LULUCF-sektorin ulkopuolella. On hyvä huomata, että laskenta perustuu oletukseen, että samaan aikaan LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöt olisivat -23,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavalla, joten kokonaisuudessaan Suomen netto-CO<sub>2</sub>-päästöt olisivat keskimäärin -27,1 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Liitteessä 2 esitetyt laskentatavat 3 ja 4 tuottavat hiilibudjetit, jotka asettuvat näiden kahden (tapa 1 ja tapa 2) väliin.

---

<sup>5</sup> Inventaariolaskennan mukaisen lähestymistavan päästöbudjetti on hieman suurempi kuin Ilmastopaneelin raportin (2021) hiilibudjetti 79 Mt (joka tämän raportin termistöllä vastaa päästöbudjettia). Tähän on kaksi syytä. Ensinnäkin tämän raportin laskenta perustuu IPCC AR6:n hiilibudjettiin, joka on hieman suurempi kuin IPCC:n 1,5 asteen erikoisraportin arvio, johon Ilmastopaneelin aiemmat raportit perustuivat. Toiseksi tässä raportissa tarkastellaan ensisijaisesti budjetteja, joilla lämpeneminen rajoitetaan alle 1,5 asteen 50 % todennäköisyydellä, kun taas aiemman raportin päästöbudjetti perustui 66 % prosentin todennäköisyyteen.

Taulukko 2: Suomen päästö- ja hiilibudjettien (Mt CO<sub>2</sub>-ekv.) laskennan välivaiheet vuosille 2020–2050 kolmella eri tavalla laskettuna. Taulukon yläosa näyttää globaalin tason laskennan ja alaosa kansallisen. Luvut on ilmoitettu yksikössä Mt CO<sub>2</sub>-ekv.

	Inventaariolaskennan suora sovellus	Tapa 1	Tapa 2
Globaali päästöbudjetti	500 000	875 000	875 000
LULUCF-laskennan sovitus globaalilla tasolla		-151 000	
Muiden kuin CO <sub>2</sub> - kasvihuonekaasujen sovitus globaalilla tasolla		-362 000	
<b>Sovitettu globaali päästöbudjetti</b>	<b>500 000</b>	<b>363 000</b>	<b>875 000</b>
Suomen osuus globaalista päästöbudjetista (0,235 ‰)	118	85	206
LULUCF-laskennan sovitus kansallisella tasolla			-438
Muiden kuin CO <sub>2</sub> - kasvihuonekaasujen sovitus kansallisella tasolla			-292
<b>Suomen sovitettu päästöbudjetti</b>	<b>118</b>	<b>85</b>	<b>-523</b>
Suomen muut kuin CO <sub>2</sub> - kasvihuonekaasupäästöt (kaikki sektorit)	318	318	318
<b>Suomen hiilibudjetti (kaikki sektorit)</b>	<b>-200</b>	<b>-233</b>	<b>-841</b>
Suomen CO <sub>2</sub> -päästöt (LULUCF)	-735	-735	-735
<b>Suomen hiilibudjetti (ei- LULUCF)</b>	<b>535</b>	<b>503</b>	<b>-106</b>



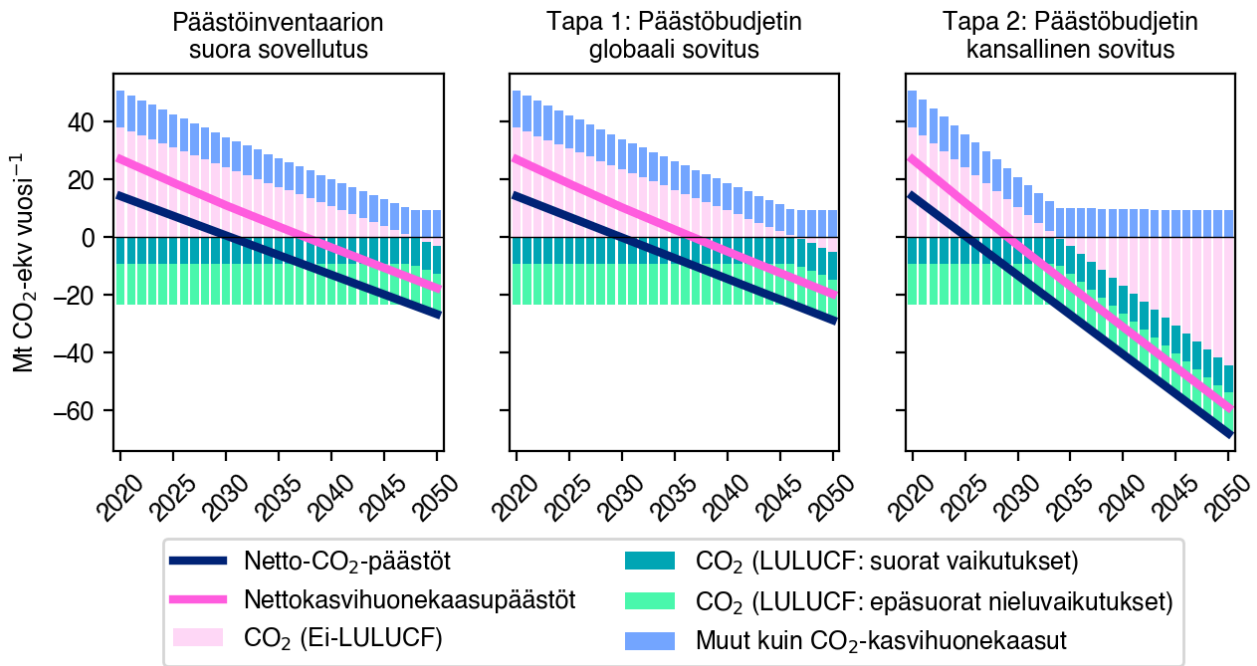
## 4. SUOMEN PÄÄSTÖVÄHENNYSPOJUN TARKASTELU VUOSILLE 2020–2050

Kumulatiivisten päästöjen laskemisen jälkeen päästövähennyspolut hahmoteltiin siten, että ei-LULUCF-sektoreiden kumulatiiviset CO<sub>2</sub>-päästöt eivät ylittäneet niille laskettua vuosien 2020–2050 hiilibudjettia. Erilaisia tapoja jakaa päästöt eri vuosille on rajattomasti, mutta tässä valittiin yhtenevästi Ilmastopaneelin aiempien raporttien lähestymistavan kanssa ei-LULUCF-sektoreiden CO<sub>2</sub>-päästöjen lineaarinen väheneminen vuoden 2020 tilanteesta. Osana ratkaisua LULUCF-sektorin nettopäästöt pidettiin vakiona. Edellä kuvatulla menetelmällä lasketut vuosittaiset CO<sub>2</sub>-päästöt sekä LULUCF-sektorilla että muilla sektoreilla on esitetty Kuva 3. Kuva 3 LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöt (-23,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>) on ilmoitettu kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisesti kaikille kolmelle tavalle.<sup>6</sup> Vuoden 2020 CO<sub>2</sub>-päästöt ovat 37,6 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> tilastoitujen päästöjen mukaiset (Tilastokeskus 2023b), mutta muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt ovat WAM-CN-skenaariosta (skenaarion päästöt vuodelle 2020 ovat hyvin lähellä tilastoituja). Inventaariolaskennan suoralla sovelluksella laskettuna (kuvan 3 vasen paneeli) vuosittaiseksi CO<sub>2</sub>-päästövähennystarpeeksi ei-LULUCF-sektoreilla yhteensä saadaan 1,4 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Tavalla 1 vuosittaiset päästövähennystarpeet ovat 1,4 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> ja tavalla 2 laskettuna 2,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> eli peräti kaksinkertainen inventaariolaskennan suoraan sovellukseen verrattuna.

Tässä raportissa ei tehty ei-LULUCF-sektoreiden netto-CO<sub>2</sub>-päästöjen sisällä erottelua fossiilisten päästöjen ja lisäisten poistojen (teknologisten nielujen) välillä. Ei-LULUCF-sektoreiden netto-CO<sub>2</sub>-päästöt ovat inventaariolaskennan suoralla sovelluksella laskettuna vuonna 2050 -3,2 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Jos brutto-CO<sub>2</sub>-päästöt muilta sektoreilta olisivat nollassa, tarvittaisiin siis tämän verran lisäisiä poistoja eli käytännössä teknologisia nieluja. Vertailun vuoksi, Ilmastopaneelin (2021) raportin 95 prosentin päästövähennyspolun mukaiset lisäiset poistot olivat -2,6 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> vuonna 2050. Tapojen 1 ja 2 vuoden 2050 netto-CO<sub>2</sub>-päästöt muilta sektoreilta olivat -5,2 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> ja -44,5 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> eli lisäisten poistojen pitäisi olla vähintään niin suuret tai vieläkin suuremmat, jos bruttopäästöt muilta sektoreilta eivät laske nolnaan. Näin suurien lisäisten poistojen saavuttaminen olisi taloudellisesti erittäin haastavaa. Päästöbudjetissa pysymiseksi olisi erittäin todennäköisesti halvempaa vähentää WAM-CN-skenaariota enemmän muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjä sekä mahdollisesti kasvattaa LULUCF-nielua vielä oletettuakin suuremmaksi.

Vuosittaisten päästövähennysten lisäksi eri laskentatapoja voi verrata toisiinsa tarkastelemalla vuosia, jolloin saavutetaan joko kasvihuonekaasujen nettonollapäästöt tai nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöt. Ilmastopaneelin (2021) raportin hahmottelemassa 95 prosentin päästövähennysurassa ja Suomen ilmastolaissa hiilineutraalius (eli kasvihuonekaasujen nettonollapäästöt) saavutetaan vuonna 2035. Tässä raportissa inventaariolaskennan suoralla sovelluksella vastaava vuosi on 2038 (ks. kuvan 3 vasemmanpuoleisen paneelin punainen viiva). Tämä johtuu suuremmasta päästöbudjetista (118 Mt CO<sub>2</sub> vs. 79 Mt CO<sub>2</sub>) ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen suhteellisesti pienemmistä vähennyksistä WAM-CN-skenaariossa verrattuna Ilmastopaneelin aiempien raporttien kaikkien kasvihuonekaasujen vähennyksiin (muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuja ei aiemmissa raporteissa eritelty). Tavoilla 1 ja 2 lasketut vuodet kasvihuonekaasujen nettonollapäästöjen saavuttamiselle ovat 2037 ja 2029. Nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöt (kuvan 3 tummansiniset viivat) saavutetaan ennen kasvihuonekaasujen nettonollapäästöjä.

<sup>6</sup> Liitteessä 4 Kuvassa 8 esitetään vastaava kuva globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaan.



Kuva 3: Lineaariset päästövähennyspolut, jotka on laskettu siten, että ei-LULUCF-sektoreiden kumulatiiviset päästöt vastaavat luvussa 3 esitettyjä tuloksia. LULUCF-CO<sub>2</sub> pidetään vuosien 2020–2050 keskiarvon tasolla vakiona –23,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Nielut ja nettopäästöt sekä muut kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöt on esitetty kasviuonekaasuinventaarion määritelmän mukaan siten, että suorat vaikutukset ja epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorilla huomioidaan nettopäästöissä.

Edellä annetut nettonollavuodet perustuivat kasviuonekaasuinventaarion laskennan mukaisiin LULUCF-sektorin nettopäästöihin ja kaikkiin kasviuonekaasupäästöihin. IPCC:n arviointiraporteissa käytetään globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöjä, joten sillä laskentatavalla lasketut vuodet ovat paremmin vertailukelpoisia IPCC:n antamien vuosilukujen kanssa. Esimerkiksi IPCC:n kuudennen synteisiraportin (Calvin ym. 2023) mukaan globaalilla tasolla 1,5 asteen tavoitteeseen melkein pääsevissä päästövähennyspoluissa nettonollakasviuonekaasupäästöt<sup>7</sup> saavutetaan globaalilla tasolla keskimäärin vuoden 2070 jälkeen ja nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöt vuoden 2050 jälkeen (Calvin ym. 2023). Käyttäen globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä IPCC:n raporttien mukaisesti nettonollakasviuonekaasupäästöt saavutetaan inventaarion mukaista laskentatapaa myöhemmin: vuonna 2048 inventaariolaskennan suoralla sovelluksella, vuonna 2047 tavalla 1 ja vuonna 2034 tavalla 2. Vastaavasti nettonolla-CO<sub>2</sub>-päästöt saavutetaan näille kolmelle tavalla vuosina 2041, 2040 ja 2031 (ks. liitteen 4 kuvan 8 punaiset ja tummansiniset viivat).

Lopuksi on syytä huomata, että määritetyt päästövähennyspolut perustuvat parhaisiin arvioihin päästö- ja hiilibudjeteista kullakin kolmella tavalla laskettuna. Niihin liittyvistä epävarmuuksista on keskusteltu edellä. Nämä epävarmuudet aiheuttavat samalla epävarmuutta päästövähennyspolkuihin, ennen muuta

<sup>7</sup> Tämä eroaa Suomessa vakiintuneesta hiileneutraalius-käsitteestä siten, että IPCC ilmoittaa LULUCF-sektorin nettopäästöt globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaan. IPCC:n terminologian mukaan kyseessä on "greenhouse gas neutrality", kun taas "carbon neutrality" tarkoittaa IPCC:n raporteissa vain CO<sub>2</sub>-päästöjen nettonollapäästöjä.

niiden jyrkkyyteen ja sitä myöten esimerkiksi siihen, milloin hiilineutraalius saavutetaan kullakin laskentatavalla. Tämän ohella HIISI-hankkeen WAM-CN-skenaarion oletus muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöpolusta, vaikuttaa ratkaisevasti tuloksiin. Kaikkien muuttujien suuruutta tai epävarmuutta on mahdollista tarkentaa, mutta nyt valittu tarkkuustaso mahdollistaa vertailevan keskustelun päästövähennystavoitteista, sillä epävarmuus on pääsääntöisesti samanlaista kaikille laskentavaihtoehdoille.

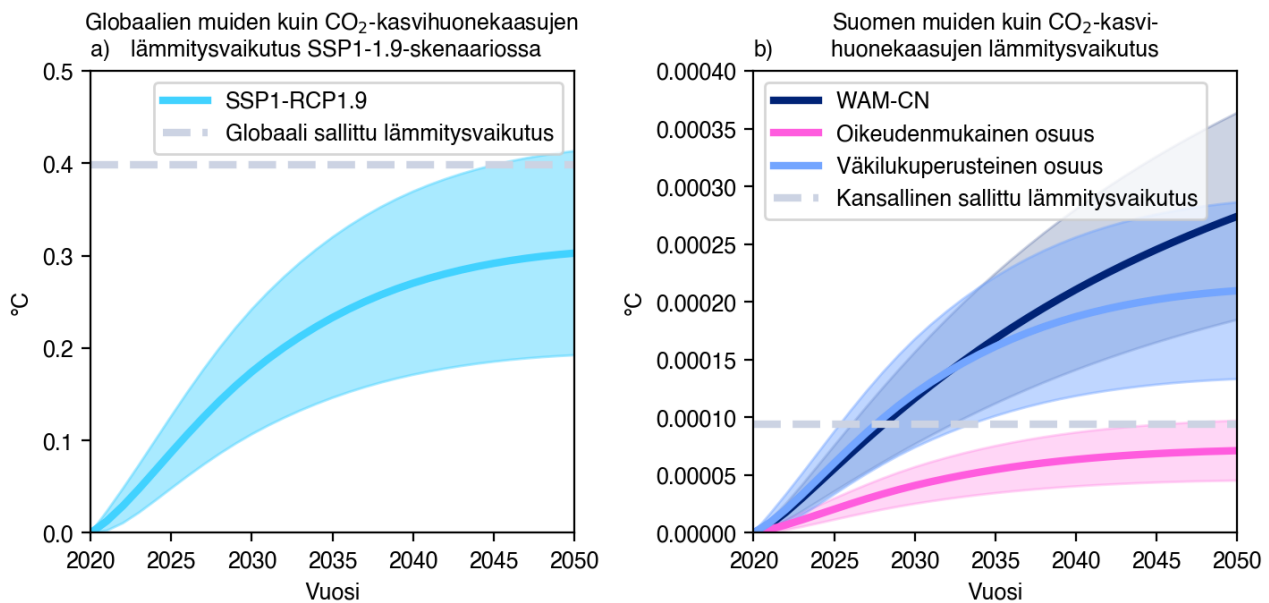
## 4.1 SUOMEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN ILMASTOVAIKUTUS

### 4.1.1 Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus

Tässä raportissa käytetyn WAM-CN-skenaarion (ks. liite 5) mukaiset muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöt ovat suhteellisen korkeat verrattuna 1,5 asteen tavoitetasoon. Taustaskenaariona käytetyssä lähes 1,5 asteen tavoitteen mukaisessa SSP1-RCP1.9-skenaariossa vuosien 2020–2050 välissä metaani- ja typpioksiduulipäästöt vähenevät 53 % ja 25 %. Käytetyssä WAM-CN-skenaariossa vastaavat päästövähennysprosentit Suomelle ovat vain 32 % ja 17 %. Jos SSP1-RCP1.9-skenaarion metaani- ja typpioksiduulipäästöistä laskee Suomelle saman osuuden kuin oikeudenmukaiseksi katsottu osuus globaalista päästöbudjetista (0,235 %), olisivat vuoden 2020 päästöt vain 41 % ja 11 % WAM-CN-skenaarion vastaavista metaani- ja typpioksiduulipäästöistä. Yleisemmin 1,5 asteen tavoitteen kanssa yhteensopivissa skenaarioissa mediaanivähennys vuosien 2020–2050 välillä on 50 % metaanille ja 25 % typpioksiduulille (Forster ym. 2023). Yhteenvetona WAM-CN-skenaarion vuoden 2020 muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt ovat suuremmat ja niiden suhteelliset päästövähennykset vuosina 2020–2050 pienemmät kuin Suomen oikeudenmukaiseksi katsottava osuus globaaleista muista kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöistä 1,5 asteen skenaarioissa.

WAM-CN-skenaarion muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen suhteellisen korkeaa tasoa voidaan havainnollistaa myös vertaamalla niiden lämmittävää vaikutusta Suomen oikeudenmukaiseen osuuteen SSP1-RCP1.9-skenaariossa muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävästä vaikutuksesta.

Globaalilla tasolla SSP1-RCP1.9-skenaariossa vuodesta 2020 päästettyjen muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus nousee noin 0,3 astetta vuoteen 2050 mennessä (Kuva 4a). Harmaa katkoviiva kuvaa kaikkien kasvihuonekaasujen sallittua lämmitysvaikutusta, jolla globaali lämpeneminen pysyy 1,5 asteen alapuolella ja johon globaali päästöbudjetti perustuu. Suomen oikeudenmukainen osuus tästä on esitetty punaisella viivalla Kuva 4b. Suomen muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus (kuvan 4b vaaleansininen viiva Kuva 4) sen sijaan nousee huomattavasti nopeammin ja korkeammalle kuin Suomen oikeudenmukainen osuus ja ylittää myös Suomen osuuden kaikkien kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksen rajasta (harmaa katkoviiva Kuva 4b). Tämän ylityksen takia Suomen hiilibudjetti on negatiivinen eli muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmittävää vaikutusta pitää kumota negatiivisilla CO<sub>2</sub>-päästöillä (ks. luku 3).



Kuva 4: Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen lämmittävä vaikutus a) globaalilla ja b) Suomen tasolla. Väritetyt alueet kuvaavat 95 % luottamusväliä perustuen FaIR-mallin simulaatioparveen. Harmaa katkoviiva esittää 1,5 asteen tavoitteen mukaista suurinta sallittua tulevaisuuden kasviuonekaasujen lämmitysvaikutusta vuonna 2050 Suomen tasolla. Oikeudenmukainen ja väkilukuperusteinen osuus tarkoittavat osuutta globaalista muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen lämmittävästä vaikutuksesta.

Lisäksi muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen suhteellisen suurta määrää WAM-CN-skenaariossa havainnollistaa se, että niiden lämmittävä vaikutus on suurempi kuin väkilukuun suhteutettu osuus globaalien muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen vaikutuksesta SSP1-RCP1.9-skenaariossa (tummansininen viiva Kuva 4b). Eli WAM-CN-skenaariota mukainen muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasujen lämmittävä vaikutus asukasta kohden olisi suurempi kuin lämmittävä vaikutus asukasta kohden globaalilla tasolla SSP1-RCP1.9-skenaariossa (käyttäen tämänhetkisiä väkilukuja). Sanottu osoittaa, että laskennan perusteena käytetty WAM-CN-skenaario on mahdollisesti epärealistisen korkea, jos tavoitteena on 1,5 asteen mukaiset päästövähennykset, ja että muut kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasut pienentävät tarpeettoman paljon hiilibudjettia tavoissa 1 ja 2. Vaikka tässä työssä ei tehty kustannustehokkuusanalyysejä, niin oletettavasti olisi halvempaa vähentää muita kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasuja WAM-CN-skenaariota enemmän kuin saavuttaa tapojen 1 ja 2 hiilibudjettien vaatimia CO<sub>2</sub>-päästövähennyksiä ja teknologisia nieluja.

#### 4.1.2 Päästövähennyspolkujen kokonaisvaikutus globaaliin keskilämpötilaan

Edellä esitettyjen hiilibudjettien ja päästövähennyspolkujen perustana on Suomen oikeudenmukainen osuus kasviuonekaasupäästöjen lämmitysvaikutuksesta. Tässä luvussa havainnollistetaan, miten lämmitysvaikutus eri tavoilla lasketuissa päästövähennyspoluissa kehittyy.

Tarkastelua varten kaikille kolmelle tavalle laskettiin Suomen nettopäästöt globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan LULUCF-sektorin nettopäästöjen perusteella, koska tämä laskentatapa vastaa parhaiten niiden ilmastovaikutuksen suuruutta. Kasviuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisilla LULUCF-sektorin netto-CO<sub>2</sub>-päästöillä ei ole samanlaista suoraviivaista yhteyttä lämpötilan muutokseen. Tulokset on esitetty Kuva 5. Vasemmanpuoleinen y-akseli kuvaa Suomen kasviuonekaasupäästöjen vaikutusta globaaliin keskilämpötilaan. Oikeanpuoleinen y-akseli taas kuvaa globaalia keskilämpötilaa

suhteessa esiteolliseen aikaan, jos kaikkien maiden vaikutus olisi Suomen kanssa samassa suhteessa niiden oikeudenmukaiseen osuuteen lämpenemisestä. Käytännössä tämä tarkoittaa globaalia lämpenemistä, jos kaikki muut maat vastaisivat velvoitteistaan suhteellisesti yhtä hyvin kuin Suomi.

Koska Suomen jäljellä oleva päästöbudjetti kuluu nykypäästöillä muutamassa vuodessa, kaikki kolme (inventariolaskennan suora sovellus, tapa 1 ja tapa 2) päästövähennyspolkua johtavat sen ylitykseen 2020-luvulla. Tämän raportin päästövähennystavoitteet perustuvat globaaliin vuoden 2050 lämpötilatavoitteeseen ja siitä johdettuun Suomen suurimpaan sallittuun lämmitysvaikutukseen (ks. liite 1) vuonna 2050. Siten päästöbudjetin ylitys ei ole tämän globaalin tavoitteen kanssa välttämättä ristiriidassa, jos lämmitysvaikutus pienenee riittävästi vuoteen 2050 mennessä. Globaalille tasolle skaalattuna tämä ylitys vastaisi parhaassakin tapauksessa (tapa 2) noin kahden asteen lämpenemistä vuoden 2040 tienoilla. Sallitun lämmitysvaikutuksen voimakas ylitys ja sitä seuraava viilenevä vaikutus kaikilla kolmella tavalla johtuu nielujen suuresta roolista päästövähennyspoluissa. Globaalilla tasolla suhteellisesti näin suurien nielujen saaminen ennen vuotta 2050 ei olisi käytännössä mahdollista.

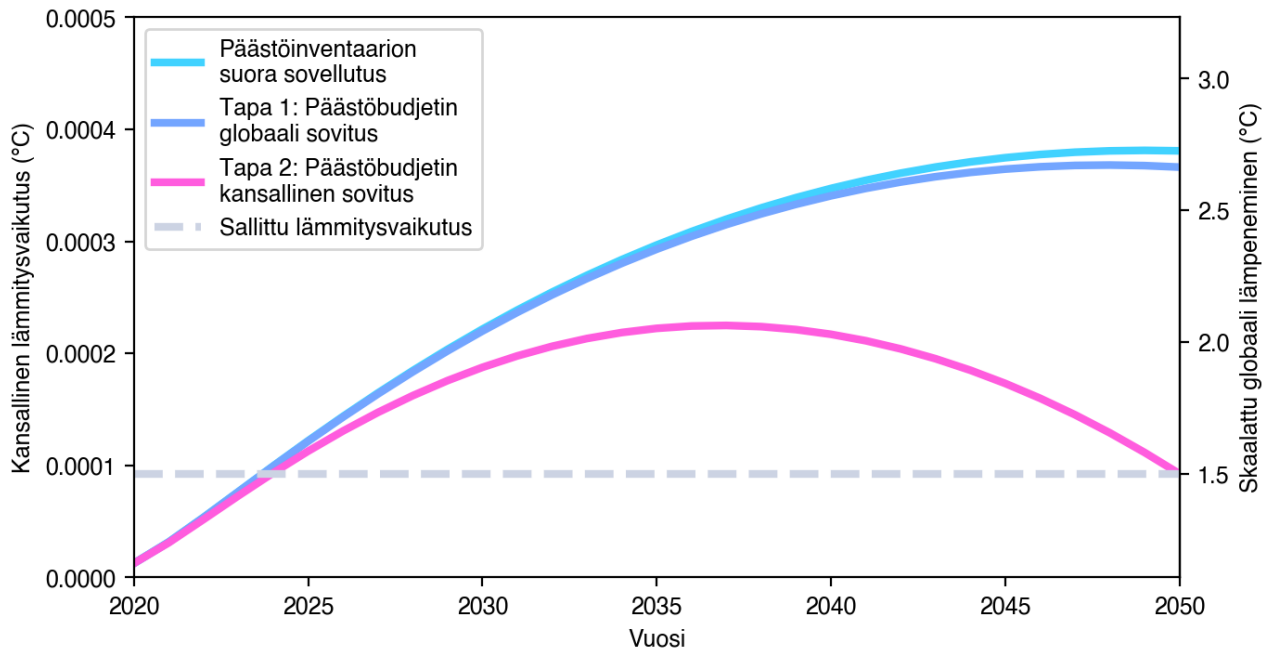
Ainoastaan tavalla 2 Suomen lämmitysvaikutus pienenee riittävästi vuoteen 2050 mennessä, jotta Suomi täyttäisi 1,5 asteen tavoitteen velvoitteet, jotka tässä raportissa määräytyvät normatiivisen oikeudenmukaiseksi katsottavan osuuden mukaan. Inventariolaskennan suoran sovelluksen päästövähennyspolun vaikutus globaalin lämpenemiseen vuonna 2050 on 0,38 mK<sup>8</sup>, kun suurin sallittu 1,5 asteen rajan kanssa yhteensopiva lämpeneminen on 0,09 mK. Suomen vaikutus lämpenemiseen olisi siis nelinkertainen tähän tavoitetasoon verrattuna. Globaalisti kasvihuonekaasujen sallitun lämmitysvaikutuksen paras arvio vuonna 2050 on 0,40 K. Jos kaikki maat ylittäisivät omat sallitut lämmitysvaikutuksensa vastaavasti, johtaisi se lähes kolmen asteen globaaliin lämpenemiseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Tämä havainnollistaa, miten tarvittavat päästövähennykset arvioidaan, jos muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasut muutetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi GWP100-kertoimilla ja kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä käytetään suoraan huomioimatta ristiriitaa globaalien hiilenkiertomallien mukaisen laskentatavan kanssa. Suomen kohdalla epäsuorien nieluvaikutusten rooli korostuu erityisen voimakkaasti.

Tavan 1 tulosten tulkitseminen on kahta muuta tapaa monimutkaisempaa ja altis virhetulkinnoille. Kuva 5 näkyvät tulokset kertovat 0,37 mK kansallisesta lämmitysvaikutuksesta vuonna 2050 ja 2,7 asteen globaalista lämpenemisestä, jos muut maat ylittäisivät omat sallitut lämmitysvaikutuksensa vastaavasti. Tavassa 1 on kuitenkin huomioitu ja sovitettu inventariolaskennan suoran sovelluksen ongelmat koskien muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuja ja epäsuoria nieluvaikutuksia, joten jos kaikki maat noudattaisivat sen periaatetta, globaali lämpeneminen rajoittuisi 1,5 asteeseen kuten tavassa 2. Lyhyesti syynä tälle näennäiselle ristiriidalle on se, että tavassa 1 maiden kansainvälisen ilmastopolitiikan käytännön mukaiset kirjanpidolliset päästöt eivät kansallisella tasolla vastaa suoraan niiden lämmittävää vaikutusta. Vaikka Suomen oikeudenmukainen osuus sallitusta lämmitysvaikutuksesta ja siten globaalista päästöbudjetista on tavan 1 lähtöpisteenä, epäsuorien nieluvaikutusten laskeminen ihmisperäisiksi ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen muuntaminen GWP100-kertoimilla kasvattavat Suomen lämmitysvaikutusta yli oikeudenmukaisen tason. Tavassa 1 epäsuorien nieluvaikutusten ja GWP100-muunnoksen virheiden huomioiminen globaalilla tasolla päästöbudjettia pienentämällä tarkoittaa, että kaikkien maiden pitää kollektiivisesti kompensoida tavan 1 Suomen lämmitysvaikutuksen aliarviointi vähentämällä päästöjään vielä enemmän. Lisäksi, jos epäsuorat nieluvaikutukset vähentäisivät jonkun maan nielua esimerkiksi lisääntyvän kuivuuden tai maaperän päästölähteeksi muuttumisen takia, tavan 1 periaatteen mukaan

---

<sup>8</sup> Millikelviniä eli Celsius-asteen tuhannesosaa.

kyseinen maa on itse vastuussa tämän kompensoimisesta suuremmilla päästövähennyksillä tai nieluja kasvattamalla. Täten myös tapa 1 johdonmukaisesti toteutettuna rajoittaisi globaalin lämpenemisen 1,5 asteeseen, mutta epäsuorien nieluvaikutusten ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen osuuden epätasainen jakautuminen maantieteellisesti vaikuttaisi yksittäisten maiden tavoitetasoon nostavasti tai alentavasti.



Kuva 5: Kolmella eri tavalla laskettujen päästövähennyspolkujen lämmittävä vaikutus. Horisontaalinen katkoviiva näyttää päästöbudjettilaskelmien alkupisteenä olleen suurimman sallitun lämmittävän vaikutuksen Suomen kasvihuonekaasuille vuonna 2050. Y-akselin vasen puoli näyttää Suomen lämmittävän vaikutuksen globaaliin lämpötilaan ja oikea puoli globaalin vaikutuksen, jos kaikkien maiden vaikutus olisi samassa suhteessa niiden oikeudenmukaiseen osuuteen lämpenemisestä.

## 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Tässä raportissa hahmotettiin lähestymistapoja määrittää ilmastotieteen mukaisesti perusteltu Pariisin sopimuksen 1,5 asteen tavoitteen kanssa linjassa oleva Suomen kansallinen päästöbudjetti ja verrattiin tuloksia Ilmastopaneelin aiempiin suosituksiin (Ollikainen ym. 2019, Suomen ilmastopaneeli 2021). Tarkastelussa otetaan tarkemmin huomioon muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjen lämmittävä vaikutus sekä epäsuorat nieluvaikutukset.

Raportissa analysoitiin tarkemmin kahta eri tapaa sovittaa kansallisen kasviuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaiset LULUCF-sektorin nettopäästöt yhteensopivaksi globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan kanssa. Näitä kahta tapaa verrattiin Ilmastopaneelin aiemmissa arvioissa käyttämään inventaariolaskennan suoraan sovellukseen. Tavoissa 1 ja 2 arvioitiin muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjen lämmittävä vaikutus yksinkertaisen ilmastomallin avulla ja epäsuorat nieluvaikutukset nojaten Grassi ym. (2021, 2023) tutkimuksiin. Tavassa 1 päästöbudjetin sovitus epäsuorien nieluvaikutuksien ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjen osalta tehdään globaalilla tasolla. Tavassa 2 samat sovitukset tehdään kansallisella tasolla. Inventaariolaskennan suora sovellus pohjaa Ilmastopaneelin (Ollikainen ym. 2019, Suomen ilmastopaneeli 2021) menetelmään, jossa Suomen osuus globaalista hiilibudjetista määritetään sisältämään kaikki kasviuonekaasupäästöt muuttamalla eri kasviuonekaasut GWP100-kertoimilla<sup>9</sup> hiilidioksidiekvivalenteiksi sekä olettamalla kasviuonekaasuinventaarion mukainen LULUCF-nielu kokonaisuudessaan ihmisperäiseksi.

Keskeisin havainto raportin analyysistä on, että ilmastotieteen kanssa yhteensopivimmat tavat 1 ja 2 johtavat Ilmastopaneelin laskentaa pienempään Suomen kansalliseen päästöbudjettiin. Erityisesti tavan 2 mukaiset tulokset ja tulokset vaatisivat Suomelta selkeästi tiukempaa ilmastopolitiikkaa kaudella 2020–2050. Tavan 2 mukaan Suomen tulisi olla hiilineutraali jo vuonna 2029 vuoden 2035 sijaan ja tavan 1 mukaan puolestaan vuonna 2037. Tavan 1 vuotta 2035 myöhempi hiilineutraalius johtuu pääosin päivitetystä IPCC:n hiilibudjettiarviosta. Ero hiilineutraaliuden saavuttamisvuodessa ei ole kovin suuri, ja vaikka tuloksiin vaikuttaa monenlainen epävarmuus, voidaan tarkastelun pääjohtopäätöksensä todeta, että Ilmastopaneelin suosituksen (2021) mukainen Suomen hiilineutraaliustavoite 2035 ja ilmastolakiin kirjattu päästöpolku eivät ole ainakaan liian kunnianhimoisia Suomen reiluksi panokseksi Pariisin sopimuksen 1,5 asteen tavoitteen saavuttamiseen, kun oikeudenmukaisuuskriteerinä on kansallinen maksukyky.

Työssä tehty analyysi osoittaa, että päästö- ja hiilibudjetit ja niistä seuraavat päästövähennyspolut poikkeavat toisistaan riippuen siitä, mikä tapa valitaan sovittamaan laskenta yhteensopivaksi ilmastotieteen kanssa. Johdetut tulokset ovat luonteeltaan alustavia, eikä niiden perusteella voi antaa perusteltua suositusta sen suhteen, mikä laskentatapa olisi suositeltavin. Jokaiseen laskentatapaan liittyy epävarmuuksia (muun muassa valittu muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasviuonekaasupäästöjen skenaario, epäsuorien nieluvaikutusten arviointi, ilmastomallinnuksen epävarmuudet) ja muita laskennan haasteita. Siten raportin toinen johtopäätös on, että analyysi on hahmottanut johdonmukaisia menettelytapoja ja tarjonnut alustavia tuloksia sen tarkasteluun, kuinka ilmastopolitiikassa vallitseva inventaariolaskennan mukainen lähestymistapa saataisiin paremmin vastaamaan ilmastotieteen mukaista lähestymistapaa.

Raportti avaa myös näkökulmia kansainvälisen ilmastopolitiikan tarkentamiseen. Koska Pariisin ilmastosopimus on niin sanottu bottom-up -sopimus, sen osapuolet määrittelevät itse kansallisen reilun

---

<sup>9</sup> GWP-100-kertoimilla eri kasviuonekaasujen tonnin suuruisen päästön lämmitysvaikutus on muutettu vastaamaan hiilidioksiditonin aiheuttamaa lämmitysvaikutusta sadan vuoden aikana. GWP-100-kertoimien heikkous on, että niillä ei pystytä kuvaamaan kovin tarkasti eri kaasujen lämmitysvaikutusta eri aikaskaaloissa.

panoksen sen toteuttamiseen. Olisi tärkeitä analysoida, mikä hahmotetuista laskentatavoista vastaisi parhaiten Pariisin sopimuksen henkeä ja erityisesti takaisi sen, että eri maiden valinta eri sovittamistapojen kesken johtaa lopputulokseen, jossa globaali lämpeneminen olisi mahdollista rajoittaa 1,5 asteeseen.

Kasvihuonekaasuinventarioiden ja globaalien hiilenkiertomallien laskentatapojen mukaisten LULUCF-sektorien nettopäästöjen eroavuus asettaa haasteita tieteeseen perustuvalla ilmastopolitiikalle. Grassi ym. (2021) on ehdottanut, että maat lisäisivät kasvihuonekaasuinventaariorissa arvion epäsuorille nieluvaikutuksille. Tämä helpottaisi kasvihuonekaasuinventaariorin käyttämistä ilmastopolitiikan vaikutusten seuraamiseen kansallisella ja globaalilla tasolla esimerkiksi Pariisin sopimuksen puitteissa, olettaen että muutkin maat parantavat raportointiaan. Tämä vaatisi erillisiä lisäyksiä, mutta ei varsinaisia muutoksia, nykyiseen tapaan raportoida päästöjä ja nieluja kasvihuonekaasuinventaariorissa. Vastaavasti myös globaaleja hiilenkiertomalleja voisi kehittää laskemaan maankäytön ihmisperäiset hiilinielut kasvihuonekaasuinventaariorin mukaisen LULUCF-nielun mukaisesti.

Lopuksi on syytä todeta, että kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitallistaminen GWP100-periaatteen mukaan aliarvioi merkittävästi muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävää vaikutusta seuraavien muutaman vuosikymmenen aikaskaalalla, joka on olennainen 1,5 asteen tavoitteen kannalta. Olisi hyödyllistä tarkastella, toisiko lämmittävän vaikutuksen arviointi 20–30 vuoden aikajänteellä inventaariolaskennan suoran sovelluksen lähemmäksi ilmastotieteellistä mallinnusta, ja tarjoaisiko se suoraviivaisen tavan tarkastella ilmastotavoitteita ja samalla tehostaa nykyisiä ohjauskeinoja muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä.



## LÄHTEET

Allen, M. R., Frame, D. J., Huntingford, C., Jones, C. D., Lowe, J. A., Meinshausen, M., & Meinshausen, N. 2009. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature08019>.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Climate Change Committee 2020. The UK Climate Change Act. CCC Insights Briefing 1. Saatavilla: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2020/10/CCC-Insights-Briefing-1-The-UK-Climate-Change-Act.pdf>.

Derwent, R. G. 2020. Global Warming Potential (GWP) for Methane: Monte Carlo Analysis of the Uncertainties in Global Tropospheric Model Predictions. *Atmosphere*, 11(5), 486. <https://doi.org/10.3390/atmos11050486>.

EU 2020. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. EU:n strategia metaanipäästöjen vähentämiseksi. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0663>.

EU 2024. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus metaanipäästöjen vähentämisestä energia-alalla ja asetuksen (EU) 2019/942 muuttamisesta. Saatavilla: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-86-2023-INIT/fi/pdf>.

Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M. D., Rogelj, J., von Schuckmann, K., Seneviratne, S. I., Trewin, B., Zhang, X., Allen, M., Andrew, R., Birt, A., Borger, A., ... Zhai, P. 2023. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 15(6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>.

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

Gidden, M. J., Gasser, T., Grassi, G., Forsell, N., Janssens, I., Lamb, W. F., Minx, J., Nicholls, Z., Steinhauser, J., & Riahi, K. 2023. Aligning climate scenarios to emissions inventories shifts global benchmarks. *Nature*, 624(7990), 102–108. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06724-y>.

Grassi, G., Schwingshackl, C., Gasser, T., Houghton, R. A., Sitch, S., Canadell, J. G., Cescatti, A., Ciais, P., Federici, S., Friedlingstein, P., Kurz, W. A., Sanz Sanchez, M. J., Abad Viñas, R., Alkama, R., Bultan, S., Ceccherini, G., Falk, S., Kato, E., Kennedy, D., ... Pongratz, J. 2023. Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020. *Earth System Science Data*, 15(3), 1093–1114. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1093-2023>.

Grassi, G., Stehfest, E., Rogelj, J., van Vuuren, D., Cescatti, A., House, J., Nabuurs, G.-J., Rossi, S., Alkama, R., Viñas, R. A., Calvin, K., Ceccherini, G., Federici, S., Fujimori, S., Gusti, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Korosuo, A., ... Popp, A. 2021. Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. *Nature Climate Change*, 11(5), 425–434. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01033-6>.

Heikkinen, J., Keskinen, R., Kostensalo, J., & Nuutinen, V. 2022. Climate change induces carbon loss of arable mineral soils in boreal conditions. *Global Change Biology*, 28(12), 3960–3973. <https://doi.org/10.1111/gcb.16164>.

Herrington, T., & Zickfeld, K. 2014. Path independence of climate and carbon cycle response over a broad range of cumulative carbon emissions. *Earth System Dynamics*, 5(2), 409–422. <https://doi.org/10.5194/esd-5-409-2014>.

Ilmastolaki 423/2022. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423>.

IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Saatavilla: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

IPCC 2023. Sixth Assessment Report. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.

Ise, T., Dunn, A. L., Wofsy, S. C., & Moorcroft, P. R. 2008. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nature Geoscience*, 1(11), 763–766. <https://doi.org/10.1038/ngeo331>.

Lamboll, R. D., Nicholls, Z. R. J., Smith, C. J., Kikstra, J. S., Byers, E., & Rogelj, J. 2023. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>.

Leach, N. J., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C. J., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J., & Allen, M. R. 2021. FalRv2.0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration. *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3007–3036. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>.

Lehtilä, A., Koljonen, T., Laurikko, J., Markkanen, J., & Vainio, T. 2021. Energijärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (Vol. 67). Valtioneuvoston kanslia.

Maanavilja, L., Tuomainen, T., Aakkula, J., Haakana, M., Heikkinen, J., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Koikkalainen, K., Kärkkäinen, L., Lehtonen, H., Miettinen, A., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Ollila, P., Viitanen, J., Vikfors, S., & Wall, A. 2021. *Hiilineutraali Suomi 2035 – Maankäyttö- ja maataloussektorin skenaariot*. Valtioneuvoston kanslia. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-263-3>.

MacDougall, A. H., Frölicher, T. L., Jones, C. D., Rogelj, J., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Arora, V. K., Barrett, N. J., Brovkin, V., Burger, F. A., Eby, M., Eliseev, A. V., Hajima, T., Holden, P. B., Jeltsch-Thömmes, A., Koven, C., Mengis, N., Menviel, L., Michou, M., ... Ziehn, T. 2020. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO<sub>2</sub>. *Biogeosciences*, 17(11), 2987–3016. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2987-2020>

Matthews, H. D., Gillett, N. P., Stott, P. A., & Zickfeld, K. 2009. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 459(7248), 829–832. <https://doi.org/10.1038/nature08047>.

Matthews, H. D., Tokarska, K. B., Rogelj, J., Smith, C. J., MacDougall, A. H., Haustein, K., Mengis, N., Sippel, S., Forster, P. M., & Knutti, R. 2021. An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget. *Communications Earth and Environment*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00064-9>.

Ollikainen, M., Weaver, S., & Seppälä, J. 2019. An approach to nationally determined contributions consistent with the Paris Climate Agreement and climate science: Application to Finland and the EU. The Finnish Climate Change Panel report 7/2019.

Palazzo Corner, S., Siebert, M., Ceppi, P., Fox-Kemper, B., Frölicher, T. L., Gallego-Sala, A., Haigh, J., Hegerl, G. C., Jones, C. D., Knutti, R., Koven, C. D., MacDougall, A. H., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Sallée, J. B., Sanderson, B. M., Séférian, R., Turetsky, M., Williams, R. G., ... Rogelj, J. 2023. The Zero Emissions Commitment and climate stabilization. *Frontiers in Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.1170744>.

Pierrehumbert, R. T. 2014. Short-Lived Climate Pollution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), 341–379. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054843>.

Pongratz, J., Reick, C. H., Houghton, R. A., & House, J. I. 2014. Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. *Earth System Dynamics*, 5(1), 177–195. <https://doi.org/10.5194/esd-5-177-2014>.

Rogelj, J., Schaeffer, M., Friedlingstein, P., Gillett, N. P., van Vuuren, D. P., Riahi, K., Allen, M., & Knutti, R. 2016. Differences between carbon budget estimates unravelled. *Nature Climate Change*, 6(3), 245–252. <https://doi.org/10.1038/nclimate2868>.

Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., & Vilariño, M. V. 2018. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In *Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Saatavilla: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>.

Schlesinger, W. H., Dietze, M. C., Jackson, R. B., Phillips, R. P., Rhoades, C. C., Rustad, L. E., & Vose, J. M. 2016. Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology*, 22(7), 2318–2328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.13105>.

Smith, C. 2022. *FaIR 2.1 Calibration* (2.1.0). <https://github.com/chrisroadmap/fair-calibrate/>.

Suomen ilmastopaneeli 2021. Ilmastolakiin kirjattavat pitkän aikavälin päästö- ja nielutavoitteet – Ilmastopaneelin analyysi ja suositukset. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2021. Saatavilla: [https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2024/03/ilmastopaneelin-raportti\\_ilmastolain-suositukset\\_final.pdf](https://ilmastopaneeli.fi/hallinta/wp-content/uploads/2024/03/ilmastopaneelin-raportti_ilmastolain-suositukset_final.pdf).

Tagesson, T., Schurgers, G., Horion, S., Ciais, P., Tian, F., Brandt, M., Ahlström, A., Wigneron, J.-P., Ardö, J., Olin, S., Fan, L., Wu, Z., & Fensholt, R. 2020. Recent divergence in the contributions of tropical and boreal forests to the terrestrial carbon sink. *Nature Ecology & Evolution*, 4(2), 202–209. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1090-0>.

The European Scientific Advisory Board on Climate Change 2023. *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030-2050*. <https://doi.org/10.2800/609405>.

Tilastokeskus 2023a. 138v - *Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990-2022\**. Saatavilla: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_khki/statfin\\_khki\\_pxt\\_138v.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_khki/statfin_khki_pxt_138v.px/table/tableViewLayout1/).

Tilastokeskus 2023b, November 8. *111k CO<sub>2</sub> Päästöt yhteensä ilman LULUCF-sektoria*. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa (Kioton Pöytäkirjan Toisen Velvoitekauden Loppuun). Saatavilla: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_khki/statfin\\_khki\\_pxt\\_111k.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_khki/statfin_khki_pxt_111k.px/table/tableViewLayout1/).

Traficom 2023. Meriliikenne osaksi EU:n päästökauppajärjestelmää 1.1.2024 alkaen. Saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/meriliikenne-osaksi-eun-paastokauppajarjestelmaa-112024-alkaen>.

UNFCCC 2021. Glasgow Climate Pact, Decision -/CP.26, advance unedited version. Saatavilla: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26\\_auv\\_2f\\_cover\\_decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf).

UNFCCC 2023. Outcome of the first global stocktake, Decision -/CMA.5, advance unedited version. Saatavilla: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma5\\_auv\\_4\\_gst.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma5_auv_4_gst.pdf).

YK 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change. Saatavilla: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.

YK 2015. Paris Agreement. Saatavilla: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf).

# LIITTEET

## LIITE 1: TIETEELLINEN TAUSTA JA MENETELMÄT PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTIEIEN LASKEMISEKSI

### Globaalin hiilibudjetin tieteellistä taustaa

Hiilibudjetin määrittämisen, ilman että otetaan huomioon päästöjen ajallinen jakautuminen, tekee mahdolliseksi globaalien keskilämpötilan muutoksen ja kumulatiivisten CO<sub>2</sub>-päästöjen välinen lähes lineaarinen riippuvuus (Transient Climate Response to cumulative CO<sub>2</sub> Emissions, TCRE) (Allen ym. 2009, Herrington & Zickfeld 2014, Matthews ym. 2009). IPCC:n uusimpien raporttien menetelmä 1,5 asteen hiilibudjetin (HB) laskemiseen perustuu jäljellä olevaan lämpenemiseen 1,5 asteen globaalista lämpenemisestä (T<sub>j</sub>), muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden vaikutukseen<sup>CO<sub>2</sub></sup><sub>muut kuin CO<sub>2</sub></sub> ja TCRE:hen (Rogelj ym., 2018). Hiilibudjetin taustalla on, että T<sub>j</sub> voidaan esittää CO<sub>2</sub>-päästöjen ja muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden vaikutusten summana:

$$T_j = T_{CO_2} + T_{\text{muut kuin } CO_2} \quad (1)$$

CO<sub>2</sub>:n aiheuttama lämpeneminen T<sub>CO<sub>2</sub></sub> voidaan taas ilmaista kumulatiivisten CO<sub>2</sub> päästöjen eli hiilibudjetin (HB) ja TCRE:n tulona:

$$T_{CO_2} = TCRE \times HB \quad (2)$$

Yhdistämällä kaavat saadaan

$$T_j = TCRE \times HB + T_{\text{muut kuin } CO_2} \quad (3)$$

Tästä voidaan ratkaista hiilibudjetti IPCC:n käyttämän menetelmän mukaisesti:

$$HB = \frac{T_j - T_{\text{muut kuin } CO_2}}{TCRE} \quad (4)$$

Muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden vaikutuksen arviointi perustuu yksinkertaisilla ilmastomalleilla tehtävään simulaatiopariin, jossa toisessa huomioidaan vain CO<sub>2</sub> ja toisessa kaikki pakotteet. Näiden simulaatioiden lämpötilan erotuksesta voidaan ensin laskea muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden vaikutus lämpötilaan ajan funktiona (esim. vuosille 1850–2100). Termi T<sub>muut kuin CO<sub>2</sub></sub> puolestaan voidaan laskea edellisen kahden simulaation erotuksen muutoksena nykyhetkestä ajanhetkeen, jolloin CO<sub>2</sub>-päästöt menevät nettonollaan. Termi T<sub>muut kuin CO<sub>2</sub></sub> ei siis ole muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden suora vaikutus lämpötilaan nettonollavuonna, vaan miten paljon vaikutus on muuttunut nykyhetkestä eli kuinka iso osa jäljellä olevasta lämpenemisestä 1,5 asteeseen johtuu muista kuin CO<sub>2</sub>-pakotteista. IPCC:n laskelmat perustuvat muiden kuin CO<sub>2</sub>-pakotteiden keskimääräiseen lämpötilavaikutuksen T<sub>muut kuin CO<sub>2</sub></sub> 1,5 asteen tavoitteen kanssa yhteensopivissa skenaarioissa.

### Haasteita kansallisen muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen huomioidinnissa hiilibudjettikehikossa

Globaalin hiilibudjetin jakaminen kansallisiksi hiilibudjeteiksi siten, että myös muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt jaettaisiin maittain, on haasteellista. Muut kuin CO<sub>2</sub>-päästöt muodostavat suuremman ongelman luonnontieteellisesti, koska hiilibudjetti on määritelty vain CO<sub>2</sub>-päästöille ja muille päästöille ei voida

määritellä yhtä yksinkertaista päästöbudjettia. Hiilibudjetin kaavassa oleva muut kuin CO<sub>2</sub>-termi on muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen ja aerosolien aiheuttama lämpötilan muutos, eikä se sisällä suoraa tietoa päästöistä. Samaan lämpötilavaikutukseen johtavien skenaarioiden muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kokonaismäärä riippuu eri kasvihuonekaasujen ja aerosolityyppien keskinäisestä jakaumasta sekä niiden ajallisesta jakautumisesta (ja aerosolien tapauksessa myös maantieteellisestä jakaumasta). Esimerkiksi lähellä vuotta 2050 päästetyllä metaanilla on huomattavasti suurempi lämpötilavaikutus vuonna 2050 kuin vuonna 2020 päästetyllä.

CO<sub>2</sub>-päästöjen lämmittävää vaikutusta valittuna ajanhetkenä voidaan hyvin arvioida esiteollisesta kaudesta kyseiseen ajanhetkeen asti päästettyjen kumulatiivisten CO<sub>2</sub>-päästöjen ja TCRE:n tulona (Allen ym. 2009, Matthews ym. 2009). Siten tapahtuneiden (tässä ennen vuotta 2020) CO<sub>2</sub>-päästöjen lämmittävä vaikutus pysyy suurin piirtein ennallaan vuosisadan aikaskaalalla (MacDougall ym. 2020, Palazzo Corner ym. 2023). Ennen vuotta 2020 päästettyjen muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen lämmittävä vaikutus sen sijaan muuttuu ajan kuluessa, koska metaani ja aerosolit ovat lyhytikäisiä ilmakehässä. Termi  $T_{\text{muut kuin CO}_2}$  sisältää sekä negatiivisen muutoksen menneisyyden päästöjen lämmittävissä vaikutuksissa että tulevaisuuden päästöjen lämmittävän vaikutuksen. Tämän vuoksi tulevaisuuden muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöjen kansallista osuutta ei voida suoraviivaisesti määritellä kuten hiilibudjetin tapauksessa.

Ilmastopolitiikassa muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöt yhteismitallistetaan yleensä CO<sub>2</sub>:n kanssa käyttämällä GWP100-kerrointa (Pierrehumbert 2014). GWP100-kerroin kertoo, kuinka moninkertaisesti verrattuna yhteen tonniin CO<sub>2</sub>:a yhden tonnin päästö kasvihuonekaasua lämmittää ilmastoa 100 vuoden aikajänteellä. GWP-kerroin määritellään kullekin kasvihuonekaasulle erikseen. GWP100 ei kuitenkaan kuvaa päästöjen lämpötilavaikutuksen suhdetta 100 vuoden päästä, sillä tällä aikavälillä osa ilmaston lisälämpenemisestä on ehtinyt sitoutua valtameriin, ja sitoutuneen lämmön määrä riippuu eri tavalla kaasujen eliniästä ja lämmitysvaikutuksesta kuin GWP:n mittaama kumulatiivinen lämmitysvaikutus. Tämän takia huomattavasti tarkemman arvion eri muiden kuin CO<sub>2</sub>-päästöskenaarioiden vaikutuksesta ilmastoon saa mallintamalla eri kasvihuonekaasujen ja aerosolien ilmastovaikutusta huomioiden niiden eliniän ja säteilyominaisuudet eksplisiittisesti GWP100:n käyttämisen sijaan.

## Kansalliset päästö- ja hiilibudjetit perustuen suurimpaan sallittuun lämpenemiseen

Edellä lueteltuja haasteita voidaan ratkoa useammallakin tavalla. Tässä työssä on kehitetty kehikko, jolla kansallisen muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen skenaarion pohjalta voidaan laskea kansallinen hiilibudjetti. Työssä käytetään Ilmastopaneelin hahmotteleman hiilineutraaluspulun kanssa yhteensopivan WAM-CN-skenaarion mukaisia muita kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöjä (ks. liite 5).

Tässä työssä esiteltävä menetelmä perustuu IPCC:n hiilibudjettimenetelmän laajentamiseen. Ensimmäinen haaste on laskea, kuinka paljon nettolämpenemistä tulevaisuuden kasvihuonekaasu- ja aerosolipäästöt saavat aiheuttaa. Yksinkertaistettuna kasvihuonekaasut lämmittävät ja aerosolihukkaset keskimäärin viilentävät ilmastoa. Koska kansallisten aerosolipäästöjen ilmastovaikutusten mallintaminen on erittäin epävarmaa ja lisäksi aerosolihukkasilla on kuitenkin merkittäviä negatiivisia terveysvaikutuksia, on tässä työssä tehty rajausta, että aerosolit käsitellään vain globaalilla tasolla ennen kansallista tarkastelua ja kansalliset päästöbudjetit koskevat siten ainoastaan kasvihuonekaasuja. Jos aerosolit otettaisiin kansallisella tasolla tarkasteluun, voisi viilentäviä aerosolipäästöjä ja samalla niiden negatiivisia terveysvaikutuksia lisäämällä korvata kasvihuonekaasupäästövähennyksiä päästöbudjetissa pysymiseksi.

Näiden valintojen jälkeen kaava (1), joka kuvaa jäljellä olevaa lämpenemistä, voidaan esittää muodossa:

$$T_j = T_{CO_2} + (T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020} + T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020} + T_{aero}) \quad (5)$$

Yllä muun kuin CO<sub>2</sub>-pakotteen muutoksen aiheuttama lämpeneminen jaetaan ensinnäkin erikseen ennen ja jälkeen vuoden 2020 päästettyjen muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen vaikutukseen sekä aerosolipakotteen muutoksen vaikutukseen.

Uudelleen järjestelemällä saadaan suurin mahdollinen *tulevaisuuden* kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaman lämpenemisen  $T_{khh}$ , jolla 1,5 asteen rajaa ei ylitetä:

$$T_{khh} = T_{CO_2} + T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020} = T_j - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero} \quad (6)$$

Suomen hiilibudjetti voidaan laskea pääosin samalla periaatteella kuin globaalin hiilibudjetin laskentakaavassa (4) kertomalla  $T_{khh}$  Ilmastopaneelin (2019) raportissa hiilibudjetin jyvittämisessä käytetyllä Suomen osuudella  $F_{Fi}$ :

$$HB_{Fi} = \frac{F_{Fi}(T_j - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero}) - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020, Fi}}{TCRE} \quad (7)$$

Kaavan termeistä  $T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020}$  on negatiivinen (menneiden päästöjen lämmittävä vaikutus pienenee),  $T_{aero}$  on positiivinen (tulevaisuudessa aerosolien viilentävä vaikutus vähenee 1,5 asteen skenaarioissa) ja Suomen tulevaisuuden muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävää vaikutusta kuvaava termi  $T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020, Fi}$  on positiivinen. Erot tässä kaavassa alkuperäiseen hiilibudjetin kaavaan verrattuna ovat, että menneiden kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävän vaikutuksen poistuminen, aerosolipäästöjen lämmittävä vaikutus ja tulevaisuuden muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasupäästöt on eritelty. Koska tässä raportissa, kuten IPCC:n kuudennessa arviointiraportissa, vertailuvuodet ovat 2010–2019, lasketaan lämpenemistermit suhteessa näiden vuosien keskiarvoon. Lisäksi hiilibudjetista pitää vähentää Suomen oikeudenmukainen osuus vuosien 2015–2019 CO<sub>2</sub>-päästöistä  $E_{2015-2019}$  (210 Gt CO<sub>2</sub>) (ei toteutuneita Suomen päästöjä, koska oikeudenmukaisen osuus lasketaan vasta vuodesta 2020 alkaen):

$$HB_{Fi} = \frac{F_{Fi}(T_j - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero}) - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020, Fi}}{TCRE} - F_{Fi}E_{2015-2019} \quad (8)$$

Jos hiilibudjettiin tehdään tavan 1 mukainen sovitus globaalilla lisäämällä globaalit epäsuorat nieluvaikutukset  $E_{es,gl}$  ja globaalien muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksen korjaustermi  $E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, gl}$ , saadaan hiilibudjetin kaavaksi:

$$HB_{Fi} = \frac{F_{Fi}(T_j - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero}) - T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020, Fi}}{TCRE} - F_{Fi}(E_{2015-2019} - E_{es,gl} - E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, gl}) \quad (9)$$

Muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksen korjaustermi  $E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, gl}$  lasketaan mallinnetun globaalin vuoden 2050 lämmitysvaikutuksen ja TCRE:n suhteen erotuksena GWP100:n avulla laskettuun hiilidioksidiekvivalenttimäärään  $E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}}$ :

$$E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}} = E_{GWP100} - \frac{T_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh}, t \geq 2020, gl}}{TCRE} \quad (9)$$

Jos termin  $T_{\text{muut kuin CO}_2\text{-khh}, t \geq 2020, Fi}$  merkitsee nollassi, saadaan kaavasta 8 Suomen päästöbudjetti tavan 1 mukaisesti:

$$PB_{Fi} = \frac{F_{Fi}(T_j - T_{\text{muut kuin CO}_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero})}{TCRE} - F_{Fi}(E_{2015-2019} - E_{es,gl} - E_{\text{muut kuin CO}_2\text{-khh},gl}) \quad (10)$$

Tavassa 2 sovitukset tehdään kansallisella tasolla, jolloin päästöbudjetiksi tulee:

$$PB_{Fi} = \frac{F_{Fi}(T_j - T_{\text{muut kuin CO}_2\text{-khh}, t < 2020} - T_{aero})}{TCRE} - F_{Fi}E_{2015-2019} + E_{es,fi} + E_{\text{muut kuin CO}_2\text{-khh},fi} \quad (11)$$

## Päästö- ja hiilibudjettitermien laskenta

Edellä kuvatut muihin kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuihin ja aerosoleihin liittyvät termit laskettiin FaiR 2.1 -mallilla (Leach ym. 2021, Smith 2022) Suomen muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasuskenaariota (liite 5) ja globaalilla tasolla SSP1-RCP1.9-skenaariota käyttäen. Kumulatiivisten päästöjen ja globaalien keskilämpötilan nousua kuvaava TCRE:n oletettiin noudattavan IPCC:n kuudennen arviointiraportin mukaista normaalijakaumaa ( $\mu=1,65$  °C / 1000 Gt CO<sub>2</sub>,  $\sigma=0,68$  °C / 1000 Gt CO<sub>2</sub>). Raportin luvuissa 2 ja 3 esitetyt luvut perustuvat kunkin termin parhaaseen arvioon. TCRE oli IPCC:n parhaan arvion mukainen ja FaiR-mallilla laskettujen termien arvoina käytettiin simulaatioparven keskiarvoa. Taulukossa 3 on kerättyinä päästö- ja hiilibudjettien laskemiseen tarvittavien muuttujien parhaat arviot.



Taulukko 3: Parhaat arviot hiili- ja päästöbudjetti-arvioissa tarvittaville muuttujille.

Muuttuja	Kuvaus	Paras arvio	Lähde
$F_{Fi}$	Suomen oikeudenmukainen osuus globaalista sallitusta lämmitysvaikutuksesta	0,235 ‰	(Suomen ilmastopaneeli 2021)
$T_j$	Jäljellä oleva lämpeneminen 1,5 asteeseen verrattuna vuosien 1850–1900 keskiarvoon	0,43 °C	(Calvin ym. 2023)
$T_{muut\ kuin\ CO_2-khk,t<2020}$	Ennen vuotta 2020 päästettyjen muiden kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasujen lämmittävän vaikutuksen muutos vuosista 2010–2019 vuoteen 2050.	–0,319 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$T_{aero}$	Aerosolipäästöjen lämpötilavaikutuksen muutos vuosista 2010–2019 vuoteen 2050.	0,262 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$T_{muut\ kuin\ CO_2-khk,t\geq 2020,Fi}$	Suomen 2020–2050 päästettyjen muiden kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus vuonna 2050.	0,000274 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$T_{muut\ kuin\ CO_2-khk,t\geq 2020,gl}$	Gloaalien 2020–2050 päästettyjen muiden kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus vuonna 2050.	0,30 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$TCRE$	Maapallon keskilämpötilan nousu suhteessa kumulatiivisiin CO <sub>2</sub> -päästöihin (Transient Climate Response to cumulative CO <sub>2</sub> emissions)	0,450 °C / 1000 Gt CO <sub>2</sub>	(Calvin ym. 2023)
$E_{2015-2019}$	Toteutuneet globaalit CO <sub>2</sub> -päästöt vuosina 2015–2019	210 Gt CO <sub>2</sub>	(Calvin ym. 2023)
$E_{es,gl}$	Gloaalit epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin netto-CO <sub>2</sub> -päästöihin 2020–2050	–151 Gt CO <sub>2</sub>	(Grassi ym. 2021, 2023) (ks. liite 3)
$E_{es,fi}$	Kansalliset epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin netto-CO <sub>2</sub> -päästöihin 2020–2050	–438 Mt CO <sub>2</sub>	(Grassi ym. 2021, 2023) (ks. liite 3)

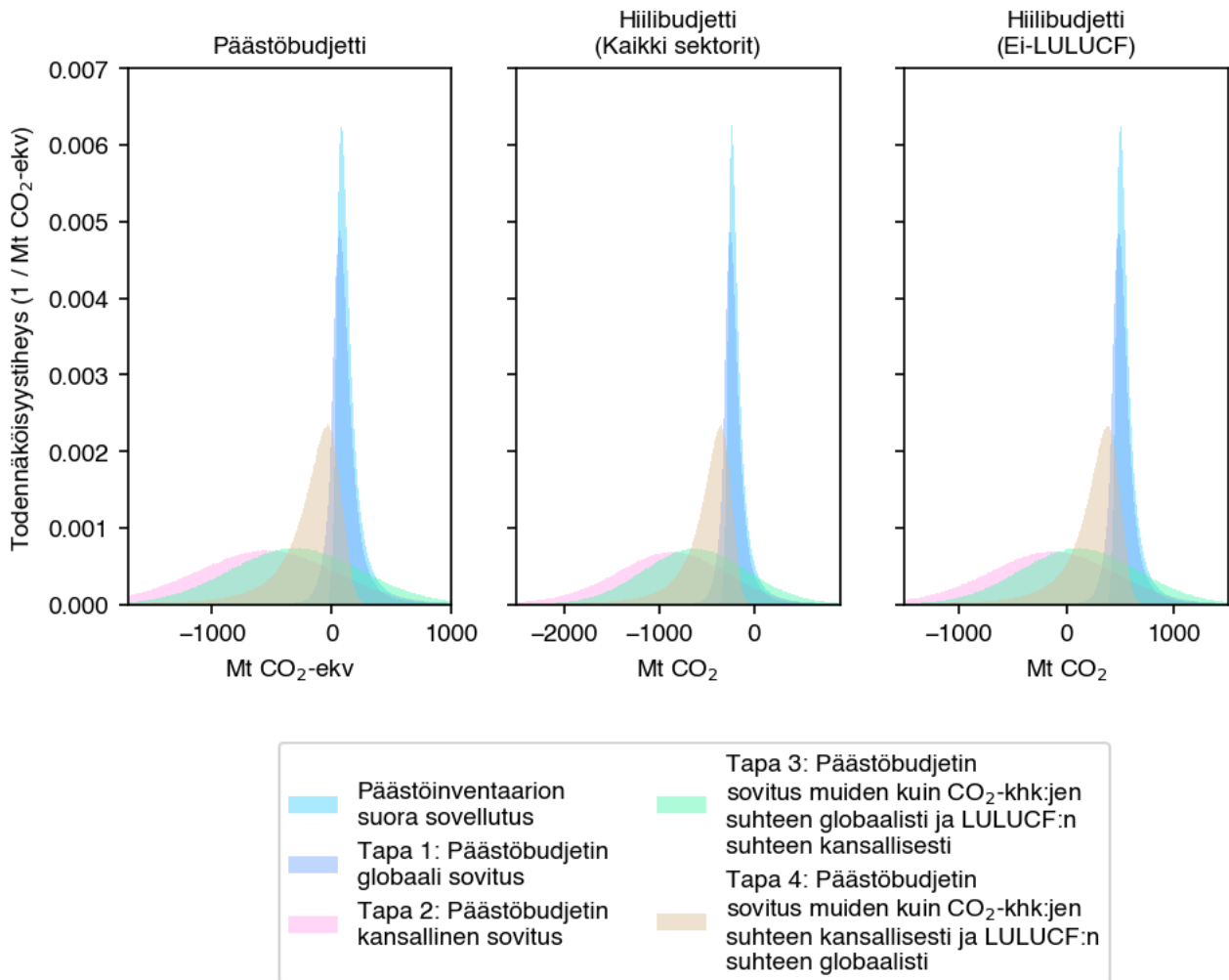
## LIITE 2: PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTILASKELMIEN EPÄVARMUUSARVIOT

Parhaan arvion lisäksi tehtiin epävarmuusarvio yhdistämällä FaIR:n tuloksista laskettu monimuuttujajakauma TCRE:n todennäköisyysjakaumaan. Satunnaisesti valitsemalla arvot kustakin jakaumasta 10 miljoonaan kombinaatioon, laskettiin vastaavasti 10 miljoonaa eri realisaatiota Suomen päästö- sekä hiilihiilibudjetille (Kuva 6). Samassa yhteydessä otettiin myös satunnaisotos epäsuorista nieluvaikutuksista kansallisella ja globaalilla tasolla päästövähennyspolkujen laskemista varten. Samankaltaista metodia on käytetty globaalin hiilibudjetin suuruuden ja epävarmuuden arviointiin (Lamboll ym. 2023, Matthews ym. 2021). Taulukossa 3 on esitetty mediaanit ja 95 % luottamusvälit päästö- ja hiilibudjeteille sekä muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen vaikutukselle. Inventaariolaskennan suoran sovelluksen epävarmuusanalyysi perustui ainoastaan TCRE:n ja globaalin muut kuin CO<sub>2</sub> termin ( $T_{\text{muut kuin CO}_2}$ ) epävarmuudelle. Jälkimmäisen jakauma saatiin skaalaamalla FaIR:n tuloksista laskettua jakaumaa siten, että TCRE:n mediaanilla avulla lasketun globaalin hiilibudjetin odotusarvo vastasi IPCC:n arviota 500 Gt CO<sub>2</sub>. Tarkempi analyysi olisi ollut mahdollista, jos IPCC:n raportin taustalaskelmat ja simulaatiot olisivat olleet käytettävissä.

Taulukko 4: Suomen päästö- ja hiilibudjettien (Mt CO<sub>2</sub>-ekv.) laskennan välivaiheet vuosille 2020–2050 viidellä eri tavalla laskettuna. Taulukon yläosa näyttää globaalin tason laskennan ja alaosa kansallisen. Luvut on ilmoitettu yksikössä Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Kunkin kohdan ensimmäinen luku kertoo parhaan arvion ja suluissa olevat luvut kertovat 95 %:n luottamusvälin perustuen 10 000 000 realisaation ja eri tekijöiden todennäköisyysjakaumien yhdistämiseen.

	Inventaario-laskennan suora sovellus	Tapa 1 Globaalilla tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset ja globaalit ei-CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 2 Kansallisella tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset ja kansalliset muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 3 Kansallisella tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset ja globaalit muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 4 Globaalilla tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset, kansalliset muut kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasu päästöt.
<b>Globaali päästöbudjetti</b>	<b>500 000 (56 000, 2 830 000)</b>	<b>875 000 (182 000, 4 450 000)</b>	<b>875 000 (182 000, 4 450 000)</b>	<b>875 000 (182 000, 4 450 000)</b>	<b>875 000 (182 000, 4 450 000)</b>
LULUCF-laskennan sovitus globaalilla tasolla		-151 000 (-259 000, -43 000)			-151 000 (-259 000, -43 000)
Muiden kuin CO <sub>2</sub> -kasvihuonekaasujen sovitus globaalilla tasolla		-362 000 (-2 550 000, 6000)		-362 000 (-2 550 000, 6000)	
<b>Sovitettu globaali päästöbudjetti</b>	<b>500 000 (56 000, 2 830 000)</b>	<b>363 000 (-521 000, 2 150 000)</b>	<b>875 000 (182 000, 4 450 000)</b>	<b>514 000 (-364 000, 2 300 000)</b>	<b>724 000 (18 500, 4 300 000)</b>

Suomen osuus globaalista päästöbudjetista (0,235 %)	118 (13, 666)	85 (-123, 507)	206 (43, 1050)	121 (-86, 541)	170 (4, 1010)
LULUCF-laskennan sovitus kansallisella tasolla			-438 (-1480, 604)	-438 (-1480, 604)	
Muiden kuin CO <sub>2</sub> -kasviuonekaasujen sovitus kansallisella tasolla			-292 (-2270, 31)		-292 (-2270, 31)
<b>Suomen sovitettu päästöbudjetti</b>	<b>118 (13, 666)</b>	<b>85 (-123, 507)</b>	<b>-523 (-2110, 621)</b>	<b>-317 (-1400, 846)</b>	<b>-121 (-1370, 160)</b>
Suomen muut kuin CO <sub>2</sub> -kasviuonekaasupäästöt (kaikki sektorit)	318	318	318	318	318
<b>Suomen hiilibudjetti (kaikki sektorit)</b>	<b>-200 (-305, 348)</b>	<b>-233 (-440, 189)</b>	<b>-841 (-2430, 303)</b>	<b>-635 (-1720, 528)</b>	<b>-439 (-1690, -157)</b>
Suomen CO <sub>2</sub> -päästöt (LULUCF)	-735	-735	-735	-735	-735
<b>Suomen hiilibudjetti (ei-LULUCF)</b>	<b>535 (430, 1080)</b>	<b>503 (295, 924)</b>	<b>-106 (-690, 1040)</b>	<b>100 (-987, 1260)</b>	<b>296 (-952, 578)</b>



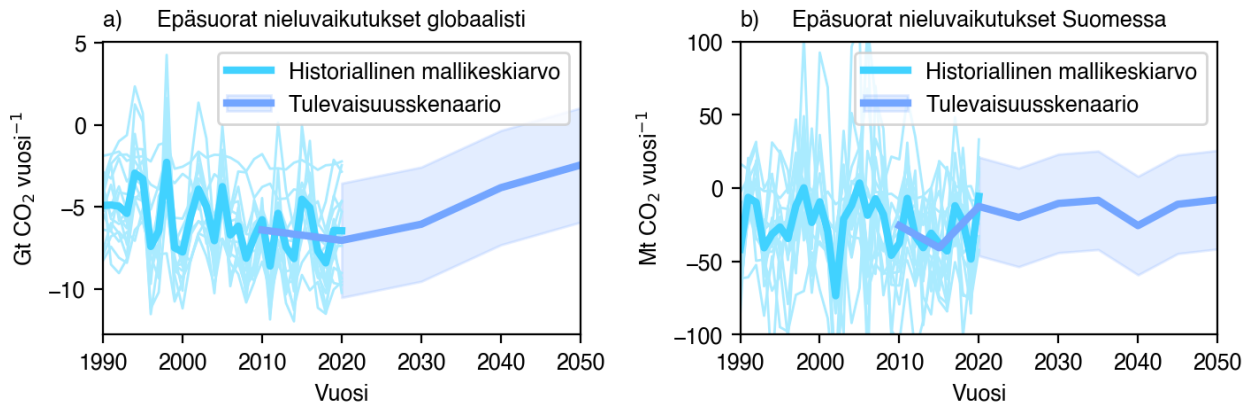
Kuva 6: Todennäköisyysjakaumat Suomen a) päästöbudjetille ja b) kaikkien sektoreiden hiilibudjetille ja c) ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjetille perustuen 10 000 000 realisaatioon.

### LIITE 3: EPÄSUORAT NIELUVAIKUTUKSET

Hiilibudjetti määrittelee tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen enimmäismäärän tietylle globaalille keskilämpötilan nousulle esiteollisesta ilmastosta, kuten 1,5 asteelle. LULUCF-sektorin päästöt ja nielut kuluttavat tai kasvattavat jäljellä olevaa hiilibudjettia laskennallisesti samoin kuin fossiiliset CO<sub>2</sub>-päästöt tai teknologiset nielut, joten LULUCF-sektorin nettopäästöjen kehitys on olennaista Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamisen kannalta. Hiilibudjetin ja ilmastotavoitteiden seurannan kannalta on kuitenkin ongelmana, että globaalilla tasolla LULUCF-sektorin vuosittaiset kansallisten kasvihuonekaasuinventaarioiden mukaiset hiilidioksidin nettopäästöt on arvioitu olevan noin 7 Gt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> pienemmät kuin hiilibudjetin taustalla olevien menetelmien mukaan (Grassi ym. 2023). Ero on merkittävä, sillä esimerkiksi fossiiliset CO<sub>2</sub>-päästöt olivat vuonna 2022 arviolta 37 Gt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Mahdollisesti tärkein syy tälle erolle on eroavaisuus ihmisperäisen päästön sekä nielun määrittelyä seuraavissa laskentamenetelmissä. Kasvihuonekaasuinventaarioissa kaikki ihmiskäytössä olevilla mailla tapahtuvat päästöt ja nielut lasketaan ihmisperäisiksi. Globaaleiden hiilenkiertomallien määrittelymukaan taas ihmisperäisiksi lasketaan ainoastaan suorat vaikutukset, kuten hakkuut ja takaisinkasvu, mutta ei kasvaneesta CO<sub>2</sub>-pitoisuudesta ja ilmastomuutoksesta johtuvia epäsuoria nieluvaikutuksia (Friedlingstein ym., 2022).

Eron käytännön merkitys on seuraava: mikäli kaikki maat tavoittelisivat 1,5 asteen hiilibudjettia ilmastopaneelin kehittämän kasvihuonekaasuinventaarioon perustuvan menetelmän pohjalta, niiden yhteenlasketut päästöt olisivat suuremmat kuin globaalilla hiilibudjetin sallima määrä (Grassi ym. 2021). Tämän takia laskentamenetelmien erot tulisi sovittaa toisiinsa, jotta globaalia hiilibudjettia voisi käyttää inventaariolaskentaan perustuvan ilmastopolitiikan pohjalla. Tässä raportissa käytetään yksinkertaista menetelmää, jossa kasvihuonekaasuinventaarioiden mukaisista nettopäästöistä vähennetään arvio epäsuorista nieluvaikutuksista, jotta saadaan nettopäästöarvio, joka olisi yhteneväinen globaalien hiilenkiertomallien ihmisperäisten nettopäästöjen kanssa. Menetelmä on yksinkertaistus, eikä siinä huomioida esimerkiksi suorien ja epäsuorien nieluvaikutusten keskinäisestä vuorovaikutuksesta syntyvää nielun muutosta (Pongratz ym. 2014). Tällä hetkellä parempaa menetelmää ei kuitenkaan ole saatavilla.

Ihmistoiminnan aiheuttama ilmastomuutos ja ilmakehän kasvanut hiilidioksidipitoisuus vaikuttavat pohjoisten alueiden hiilitaseisiin. Nettovaikutus riippuu kasvillisuuden hiilen sidonnan ja orgaanisen aineen hajoamisen vasteista nouseviin lämpötiloihin ja piteneviin kasvukausiin (Heikkinen ym. 2022, Ise ym. 2008) CO<sub>2</sub>-pitoisuuden nousuun (Tagesson ym. 2020) sekä äärevien sääilmiöiden yleistymiseen (Schlesinger ym. 2016). Tässä raportissa epäsuorat nieluvaikutukset eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden vaikutukset ihmiskäytössä olevilla mailla arvioitiin kahden tutkimuksen tulosten perusteella (Grassi ym. 2021, 2023). Näiden tutkimusten menetelmässä metsien kasvua hoidetulla metsämaalla mallinnettiin ilmastomuutoksen kanssa ja esiteollisella ilmastolla, ja näiden simulaatioiden erotuksesta laskettiin epäsuorat nieluvaikutukset olettamalla, että epäsuorat nieluvaikutukset ovat yhtä suuria luonnontilaisissa ja hoidetuissa metsissä, ja että epäsuorien nieluvaikutusten ja suorien vaikutusten summa vastaa mitattavaa nielua.



Kuva 7: Epäsuorat nieluvaikutukset (ilmastonmuutoksen ja kasvaneen CO<sub>2</sub>-pitoisuuden vaikutus ihmiskäytössä olevan maan hiilinieluun) historiallisella ajanjaksolla 1990–2020 ja tulevaisuusskenaariossa (SSP2-1.9 a) globaalilla tasolla ja b) Suomessa. Siniset ohuet viivat kuvaavat yksittäisten mallien tuloksia ja vaaleansininen alue mallien historiallisen hajonnan perusteella laskettua 95 % luottamusväliä tulevaisuusskenaariolle.

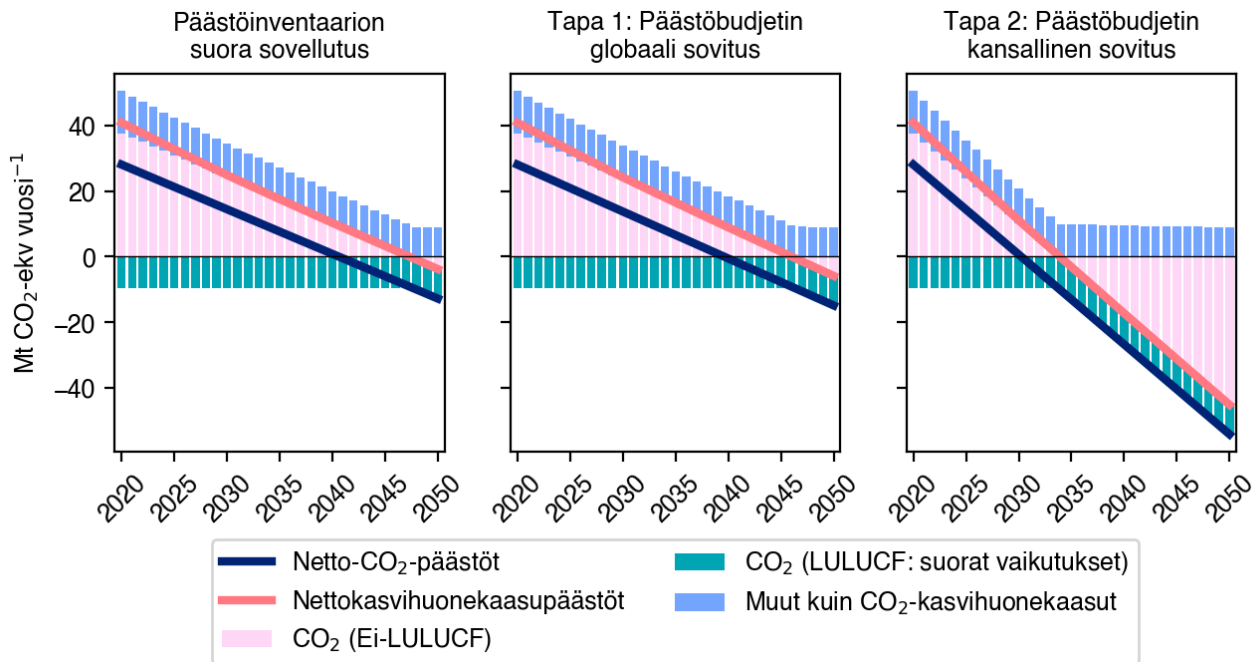
Tässä raportissa laskettiin aluksi epäsuorat nieluvaikutukset sekä Suomelle että globaalisti kaudelle 1990–2020 (Grassi ym. 2023) käyttämän 16 globaalien ekosysteemimallin tuloksien pohjalta (Kuva 7). Tulevaisuusskenaarion pohjana käytettiin (Grassi ym. 2021) mallintamia epäsuoria nieluvaikutuksia SSP2-RCP1.9-skenaariossa vuosille 2010–2100. Koska jälkimmäinen tutkimus perustui vain yhteen malliin ja useamman mallin keskiarvotulosta pidettiin luotettavampana, sen antamaa tulosta säädettiin sekä globaalisti että Suomelle yhdenmukaisesti jokaiselle vuodelle niin, että vuosien 2010–2020 keskiarvo vastasi (Grassi ym. 2023) 16 mallin keskiarvoa (Kuva 7). Tulevaisuusskenaarion epävarmuus mallinnettiin normaalijakaumalla, jonka yksittäisen vuoden keskihajonta perustui 16 ekosysteemimallin vuosien 1990–2020 keskiarvon keskihajontaan mallien välillä (vihreäksi väritetty alue Kuva 7). SSP2-RCP1.9 skenaario valittiin, koska se vastaa sen taustalla olevan RCP-skenaarion takia ilmastovaikutuksiltaan tässä raportissa globaaliksi taustaskenaarioksi valittua SSP1-RCP1.9-skenaariota.

Epäsuorat nieluvaikutukset olivat edellä kuvatun analyysin mukaan keskimäärin  $-26 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$  vuosina 2000–2020 ja  $-14 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$  vuosina 2020–2050. Vertailun vuoksi Suomen kasvihuonekaasuinventaarion mukaiset LULUCF-sektorin nettohiilidioksidipäästöt olivat keskimäärin  $-25 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$  vuosina 2010–2020 (Tilastokeskus, 2023a), joten tämän analyysin mukaan epäsuorat nieluvaikutukset olivat käytännössä yhtä suuret kuin LULUCF-sektorin nettonielu vuosina 2000–2020. Siten tässä raportissa käytetyllä sovitusmenetelmällä, jossa kasvihuonekaasuinventaarion määritelmän mukaisista nettopäästöistä vähennetään epäsuorat nieluvaikutukset, globaalien hiilenkiertomallien mukaiset ihmisperäisten nettohiilidioksidipäästöt olisivat olleet  $1 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$  eli LULUCF-sektori olisi ollut pieni päästölähde hiilidioksidin osalta. Tämä nettopäästöarvio on kuitenkin pienempi kuin kirjanpitomalleilla (en. bookkeeping models) tehty itsenäinen arvio  $11 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$  (Grassi ym. 2023).

(Grassi ym. 2021, 2023) laskemat epäsuorien nieluvaikutusten arviot kattavat vain metsämaan. Tätä he perustelivat sillä, että kasvihuonekaasuinventarioiden mukaan suurin osa (> 95 %) arvioiduista nieluista on metsissä, ja toisaalta myös sillä, että kasvihuonekaasuinventaariorissa ei kaikissa maissa raportoida muita kuin metsämaan nielua.

Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa metsien CO<sub>2</sub>-nielu on vaihdellut 2010-luvulla 37,9–17,2 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. välillä. Vuonna 2021 metsien CO<sub>2</sub>-nielu oli vain 7,4 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>, mikä teki LULUCF-sektorista ensimmäistä kertaa CO<sub>2</sub>:n nettopäästölähteen. Viljelysmaan, ruohikkoalueiden, kosteikkojen ja rakennetun maan hiilivarastot ovat Suomessa vaihdelleet vähemmän 2010-luvulla ja nämä maankäyttöluokat ovat olleet hiilidioksidin päästölähteitä eli keskimäärin yhteensä vähentäneet LULUCF-sektorin CO<sub>2</sub>-nettonielua noin 12 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup> (Tilastokeskus, 2023a). Kivennäismailla olevien viljelysmaiden CO<sub>2</sub>-päästöt ovat 2010-luvulla olleet noin 0,5–1 Mt CO<sub>2</sub>, eli varsin pienet kokonaispäästöihin ja -nieluun verrattuna. Epäsuorien nieluvaikutusten osuus kivennäismailla olevien viljelysmaiden CO<sub>2</sub>-päästöistä on oletettavasti pieni. Myös muiden maankäyttöluokkien kuin viljelysmaiden osuus LULUCF-sektorin päästötaseesta on suhteellisen pieni, joten kokonaisuudessaan Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa muiden LULUCF-päästöluokkien kuin metsien osalta voidaan todeta, että raportoitujen epäsuorien nieluvaikutusten osuus jäänee pieneksi, ja niiden huomiotta jättäminen tämän raportin laskelmissa ei merkittävästi vaikuta tuloksiin.

## LIITE 4: PÄÄSTÖVÄHENNYSPOLUT ESITETTYNÄ GLOBAALIEN HIILENKIERTOMALLIEN MUKAISELLA LULUCF-SEKTORIN NETTOPÄÄSTÖJEN LASKENTATAVALLA



Kuva 78: Lineaariset päästövähennyspolut, jotka on laskettu siten, että ei-LULUCF-sektoreiden kumulatiiviset CO<sub>2</sub>-päästöt vähennettyinä teknisillä nieluilla vastaavat taulukossa 2 esitettyjä tuloksia. LULUCF-sektorin CO<sub>2</sub>-nettopäästöt pidetään vuosien 2020–2050 keskiarvon tasolla vakiona  $-23,7 \text{ Mt CO}_2 \text{ v}^{-1}$ . Nielut ja nettopäästöt on esitetty globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaan.



## LIITE 5: WAM-CN-SKENAARIO

Tämän raportin laskelmat vuosien 2020–2100 muiden kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen vaikutuksesta perustuvat HIISI-hankkeen WAM-skenaarioon LULUCF-sektorin osalta (Maanvilja ym. 2021) ja ei-LULUCF-sektoreiden osalta WAM-CN-skenaarioon (Lehtilä ym. 2021, Antti Lehtilä, henkilökohtainen viestinvaihto), jossa vuonna 2050 on vähintään 90 % kasvihuonekaasupäästövähennykset vuodesta 1990. Skenaariossa hiilineutraalius (GWP100-kertoimiin perustuen) saavutetaan vuonna 2035 olettamalla –21 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. v<sup>-1</sup> LULUCF-sektorin nettopäästöiksi. Kun edellä mainituista nettopäästöistä vähennettiin WAM-skenaarion mukaiset muut kuin CO<sub>2</sub>-kasvihuonekaasujen päästöt, saatiin LULUCF-sektorin CO<sub>2</sub>-nettopäästöiksi vuosille 2020–2050 keskimäärin –23,7 Mt CO<sub>2</sub> v<sup>-1</sup>. Alkuperäisten skenaarioiden päästöt ilmoitettiin viiden vuoden välein ja tätä raporttia varten päästöt interpoloitiin lineaarisesti muille vuosille. IPCC:n viidennen arviointiraportin GWP100-kertoimia käytettiin muuntamaan metaani- (GWP100 = 28) ja typpioksiduulipäästöt (GWP100 = 265) CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi. Eri F-kaasuille ei ollut erittelyä, joten ne käsiteltiin ainoastaan CO<sub>2</sub>-ekvivalenteina. Kaikkien sektoreiden yhteenlasketut päästöt näille kolmelle kaasulle on esitetty Kuva 1. Raportin tekstissä tähän WAM ja WAM-CN-skenaarion yhdistelmään viitataan WAM-CN-skenaariona.