

EMBARGO 30.10.2024 klo 04.00 asti

SUOMEN ILMASTOPANEELIN RAPORTTI 2/2024

Suomen päästövähennyspolun tarkastelu huomioiden muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasujen ja epäsuorien nieluvaikutusten rooli

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

ISSN:

ISBN:

DOI: [lisätään myöhemmin]

Julkaistu xx.xx.202x

Toimitussihteeri:

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 CO₂-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

www.ilmastopaneeli.fi

[@ilmastopaneeli1](#)

SISÄLLYS

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

LUONNOS

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 globaalista IPCC:n määrittämästä 1,5 asteen tavoitteen mukaisesta hiilibudjetista. Tavoite on johdettu nojautuen ilmastopolitiikassa käytettyyn inventaariolaskentaan sekä maksukykyyn globaalina oikeudenmukaisuusperiaatteena ja se toimeenpanee Pariisin ilmastosopimusta.

Globaalin hiilinielun tarkastelutavat ja ilmastomallinnus ovat kehittyneet Ilmastopaneelin aiemman suosituksen (Ilmastopaneeli 2021) jälkeen. Tästä johtuen Ilmastopaneeli toteutti tämän raportin menetelmätarkastelun, jossa verrataan ilmastopolitiikan perustana olevaa kasvihuonekaasujen inventaariolaskentaan perustuvaa 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 sekä muiden kuin CO₂-päästöjen kehityksen ennakointia että ns. epäsuorien nieluvaikutusten määrittämistä. Muut kuin CO₂-päästöt ovat tässä yhteydessä metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O) ja fluoratut kasvihuonekaasut (F-kaasut). Epäsuorilla nieluvaikutuksilla tarkoitetaan esimerkiksi ilmaston lämpenemisestä ja kasvaneesta CO₂-pitoisuudesta aiheutuvaa muutosta metsien kasvuun, ja ilmaston lämpenemisen vaikutuksia maaperäpäästöihin verrattuna esiteolliseen ilmastoon. Kumpikin tekijä (muut kuin CO₂-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 turvamaiden 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 monimuotoisuus -tavoitteiden kanssa.

Teknologisen nielun kasvattamisen mahdollisuudet ovat hyvät, sillä Suomessa syntyy biogeenistä hiiltä vuosittain noin 28 Mt suuren mittakaavan laitoksissa (yli 0,1 Mt CO₂/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 ilmastopoliikkaan 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 CO₂-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 ilmastopoliitikan kehittämisessä.

Voimakkaasti lämmittävän metaanin kohtelu ilmastopoliitikassa

Kun verrataan kasvihuonekaasuinventaarion ja ilmastotieteen mukaisten menetelmien eroa, korostuvat muiden kuin CO₂-päästöjen vaikutukset. Erityisesti metaani on lyhytikäinen kasvihuonekaasu, joka lämmittää ilmakehää erittäin voimakkaasti. Nykyisellä sadan vuoden säteilypakotteeseen perustuvalla laskentatavalla sen vaikutus on 30-kertainen suhteessa hiilidioksidiin, 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 CO₂-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

LUONNOS

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 CO₂-kasvihuonekaasut sekä epäsuorat nieluvaikutukset osana ilmastomallinnusta. 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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöt. Kasvihuonekaasuinventaarion nettopäästöihin pohjaavaa reilua osuutta globaaleista ilmastomuutoksen hillintätoimista voidaan käsitellä tarkastelemalla reilua hiilibudjettiosuutta tai osuutta ilmakehän lämmittämisestä. Raportissa käytetyllä jälkimmäisellä tarkastelutavalla muut kuin CO₂-kasvihuonekaasut voidaan huomioida laskennassa tarkemmin. Epäsuorien nieluvaikutusten, eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöt sovitetaan globaalilla tasolla. Tavassa 2 samat sovitukset tehdään kansallisella tasolla. Laskennan tulokset johtavat kummallakin tavalla 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 CO₂-päästöjen vaikutukset korostuvat kasvihuonekaasuinventaarion suoran sovelluksen ja ilmastotieteen kanssa yhteensopivimpien 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

LUONNOS

SUMMARY

LUONNOS

SANASTOA

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

Epäsuorat nieluvaikutukset. Ilmastonmuutoksen ja kasvaneen CO₂-pitoisuuden aiheuttamat muutokset LULUCF-sektorin nettopäästöissä ihmiskäytössä olevilla mailla verrattuna esiteolliseen vertailutasoon.

Globaalien 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 CO₂-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 CO₂-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 HII SI-projektiin perustuva skenaario Suomen kasvihuonekaasupäästöille ja nieluille. Tässä raportissa skenaariosta on käytetty kaikkien sektoreiden muita kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjä (CH₄, N₂O, F-kaasut). Ks. liite 5.

1. JOHDANTO

Pariisin ilmastopuolustus (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.¹ 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 mukaiseksi 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 CO₂-päästöjä, jolla ilmaston lämpeneminen ei ylittäisi tavoitetasoa, kuten 1,5 asteen tavoitetta (Rogelj ym. 2016). Kansallisen hiilibudjetin määrittämisessä yhdistetään luonnontieteellisesti määritelty hiilibudjettilaskenta kunkin maan näkemukseen siitä, mikä on maan reilu osuus globaalista ilmastotyöstä.

Globaalin reiluuden vaatimus nousee sekä YK:n ilmastopuolustuksesta vuodelta 1992 (YK 1992) että Pariisin ilmastopuolustuksesta. Pariisin sopimuksen artikla 2 toteaa, että sopimus pannaan täytäntöön oikeudenmukaisuutta noudattaen sekä mm. 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 määrittäystapoja.²

Euroopan maista Britannia on ensimmäinen, joka hahmotti päästövähennystavoitteensa yksipuolisesti jo paljon ennen Pariisin ilmastopuolustusta sitoutuen 80 % 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 sopuoinnussa 1,5 asteen globaalin

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

²

lämpenemisen tavoitteen kanssa. (Suomen ilmastopaneeli 2021; Ollikainen ym. 2019). Vuonna 2022 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 CO₂ 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. Inventariolaskenta toimii esimerkiksi myös EU:n ilmastopolitiikan suunnittelun perustana ja Pariisin ilmastopöytäkirjan 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 CO₂, CH₄, N₂O ja F-kaasut. IPCC:n laskema hiilibudjetti sen sijaan on määritelty pelkästään hiilidioksidille, mutta hiilibudjetin suuruuteen vaikuttavat tehtävät oletukset muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen sekä aerosolien päästöistä tulevaisuudessa (Lamboll ym. 2023, Rogeli ym. 2018). Muiden kuin CO₂-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 CO₂-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 CO₂-päästöjen, muiden kuin CO₂-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 inventariolaskennan 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 CO₂-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-CO₂-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 sopusoinnussa 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 ilmastomuutoksen epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin nettopäästöjen laskentaan. ESABCC:n suositukset EU:n päästöbudjetiksi perustuvat sekä CO₂- että muiden kuin CO₂-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, maksukyvyn tai historiallisen vastuun huomioimisen) johdettavia päästöbudjetteja tarkasteltiin myös ESABCC:n raportissa, mutta ne olivat selvästi pienempiä kuin toteuttamiskelpoiksi 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 CO₂-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 CO₂-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 EPÄSUORIEIN NIELUVAIKUTUSTEN JA MUIDEN KUIN CO₂-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 CO₂-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 CO₂:n osuuden sisältävä hiilibudjetti on puolestaan jäljelle jäävä osuus, joka saadaan, kun päästöbudjetista vähennetään tulevaisuuden muut kuin CO₂-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, *inventariolaskennan suora sovellus*. Siinä hiilibudjettiin nojaava päästövähennyspolku lasketaan käyttämällä kasvihuonekaasuinventaarion mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä, kun hiilibudjettiin sovitetaan myös muut kuin CO₂-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.

Inventariolaskennan 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 CO₂-päästöjen kehityksestä globaalilla ja kansallisella tasolla, sillä muut kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöt kuluttavat osan päästöbudjetista ja tulevaisuuden oletetut aerosolipäästöt vaikuttavat päästöbudjetin suuruuteen. Jotta vaihtoehtoisia laskentatapoja voidaan kehittää, on syytä tarkastella, mikä merkitys muilla kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöillä ja epäsuorilla nieluvaikutuksilla on.

2.1 MUUT KUIN CO₂-PÄÄSTÖT

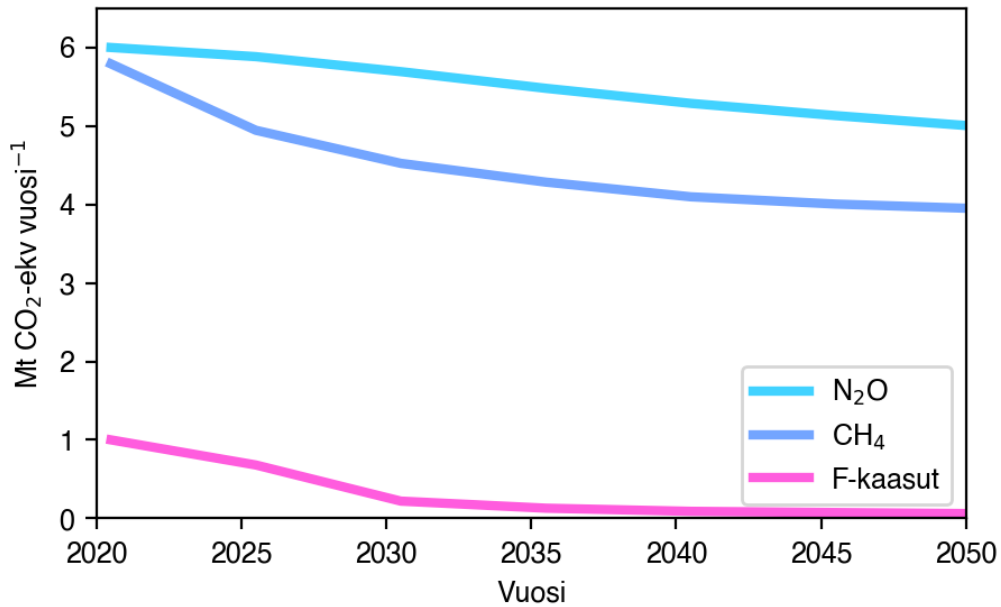
Muut kuin CO₂-päästöt muodostavat suuren haasteen päästö- ja hiilibudjettien määrittelyssä. Samaan lämpötilavaikutukseen johtavien skenaarioiden muiden kuin CO₂-päästöjen kokonaismäärä riippuu eri kasvihuonekaasujen ja aerosolityyppien keskinäisestä jakaumasta sekä niiden ajallisesta jakautumisesta (aerosolien tapauksessa myös maantieteellisestä jakaumasta). Esimerkiksi lähellä vuotta 2050 päästetyllä metaanilla on huomattavasti suurempi lämpötilavaikutus vuonna 2050 kuin vuonna 2020 päästetyllä metaanilla. Tämän vuoksi tulevaisuuden muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen kansallista osuutta ei voida yksikäsitteisesti ja suoraviivaisesti määrittellä

kuten hiilibudjetin tapauksessa, sillä muiden kuin CO₂-kasviuonekaasupäästöjen osalta päästöjen syntyajankohdalla on väliä. 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 CO₂-päästöjen lämmittävä vaikutus muuttuu ajan kuluessa, koska metaani ja erityisesti aerosolit ovat lyhytikäisiä ilmakehässä.

Ilmastopolitiikassa muut kuin CO₂-kasviuonekaasujen päästöt yhteismitallistetaan yleensä CO₂:n kanssa käyttämällä GWP100-kerrointa (Pierrehumbert 2014). GWP100-kerroin kertoo, kuinka moninkertaisesti verrattuna yhteen tonniin CO₂: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.

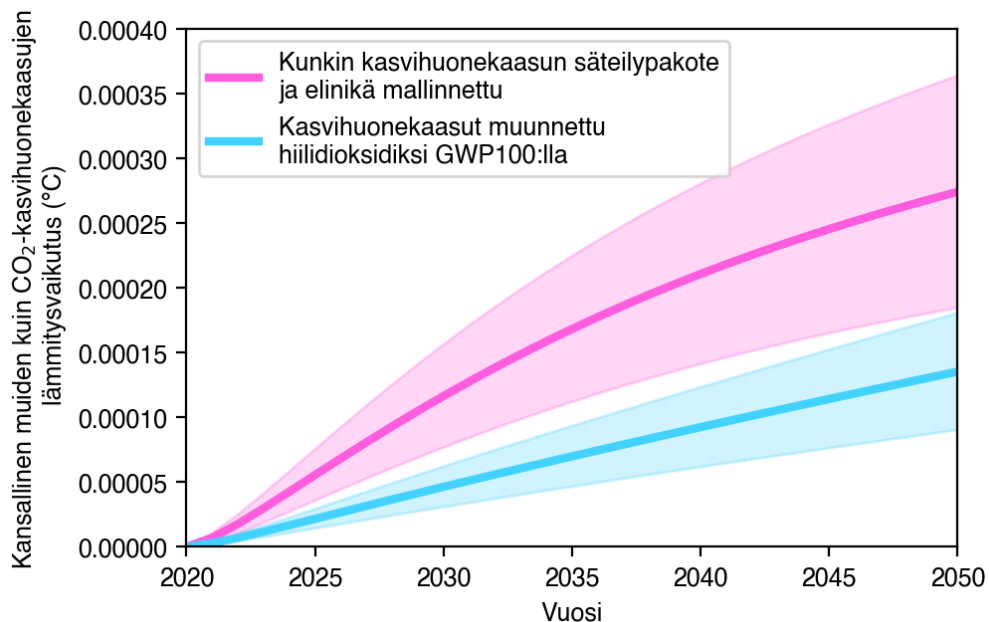
GWP100 ei kuitenkaan kuvaa päästöjen lämpötilavaikutuksen suhdetta 100 vuoden päästä. Tällä aikavälillä osa ilmaston lisälämpenemisestä on ehtinyt sitoutua valtameriin, ja sitoutuneen lämmön määrä riippuu eri tavalla kaasujen eliniästä ja lämmitysvaikutuksesta kuin GWP:n mittaama kumulatiivinen lämmitysvaikutus. Tämän takia huomattavasti tarkemman arvion eri muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasviuonekaasupäästöille ja WAM-skenaariota Suomen LULUCF-sektorin muille kuin CO₂-kasviuonekaasupäästöille (liite 5). Tässä raportissa tähän WAM-CN- ja WAM-skenaariion yhdistelmään viitataan selkeyden vuoksi nimellä WAM-CN. WAM-CN-skenaariosta on laskettu yhteen kaikkien sektoreiden muut kuin CO₂-kasviuonekaasupäästöt kullekin vuodelle 2020–2050. Tätä muiden kuin CO₂-kasviuonekaasujen kokonaispäästömäärää ajan suhteen käytetään tämän raportin analyysissä. Kuva 1 esittää laskennassa käytettyjen kaikkien sektoreiden yhteenlaskettuja muita kuin CO₂-kasviuonekaasupäästöjä CO₂-ekvivalentteina GWP100-kertoimia käyttäen.



Kuva 1: Suomen ei-CO₂-kasvihuonekaasujen päästöt GWP100-kertoimien avulla CO₂-ekvivalenteiksi (CO₂-ekv.) muunnettuna WAM-CN-skenaariossa.

Kuvassa 2 puolestaan havainnollistetaan, miten muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen muuntaminen CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasujen (CH₄, N₂O, F-kaasut) lämmittävä vaikutus mallinnettuna FaIR 2.1 -mallilla (Leach ym., 2021) kunkin kasvihuonekaasun säteilypakote ja elinikä huomioiden ja 2) muuntamalla kaasut ensin CO₂-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 CO₂-päästöt ja -nielut kuluttavat tai kasvattavat jäljellä olevaa hiilibudjettia samoin kuin fossiiliset CO₂-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 n. 7 Gt CO₂ v⁻¹ pienemmät kuin hiilibudjetin taustalla olevien menetelmien mukaan (Grassi ym. 2023). Ero on merkittävä, sillä esimerkiksi fossiiliset CO₂-päästöt olivat vuonna 2022 arviolta 37 Gt CO₂ v⁻¹.

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 CO₂-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 inventariolaskentaan perustuvan ilmastopolitiikan pohjalla. Globaalilla päästöbudjetin laskenta vuosille 2020–2050 on kuvattu liitteessä 1.

Epäsuorat nieluvaikutukset eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO₂-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 CO₂ v⁻¹ vuosina 2000–2020 ja -14 Mt CO₂ v⁻¹ vuosina 2020–2050 (ks. tarkemmin liite 3).

Sanotun nojalla epäsuorat nieluvaikutukset ja muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävä vaikutus voidaan sovittaa päästö- ja hiilibudjettien laskentaan usealla tavalla. Taulukon 1 mukainen nelikenttä havainnollistaa sovitustapojen vaihtoehtoja.

Taulukko 1: Nelikenttä eri vaihtoehdoille sovittaa inventaariolaskennan ja ilmastotieteen määrittelemien päästötavoitteiden välisiä ristiriitoja muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen ja epäsuoran nielun suhteen joko kansallisella tai globaalilla tasolla.

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

Ylin vasen ruutu (tapa 1) sovittaa globaalin päästöbudjetin sekä epäsuorien nieluvaikutusten että muiden kuin CO₂-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 CO₂-päästöt ja kaikkien sektoreiden muut kuin CO₂-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 sellainen arvio päästöbudjetille, joka olisi yhteensopiva kasvihuonekaasuinventaarion mukaisten CO₂-päästöjen kanssa. Vastaavasti kummassakin tavassa joko globaaliin tai kansalliseen päästöbudjettiin lisätään korjaustermi, jotta kasvihuonekaasuinventaarion mukainen päästöbudjetti on yhteensopiva eksplisiittisesti mallinnetun

muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen vuoden 2050 lämmittävän vaikutuksen kanssa³ (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 CO₂-kasvihuonekaasuskenaarioon ja tarkempaan ilmastomallinnukseen perustuva (negatiivinen) sovitusermi, jotta kansallisella tasolla voidaan suoraan käyttää muiden kuin CO₂-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-CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasuille lasketaan vastaavasti kuin Tavassa 1, mutta käyttäen oletettua kansallista muut kuin CO₂-kasvihuonekaasuskenaariota.

Tavat 1 ja 2 ratkaisevat epä johdonmukaisuuden, joka aiheutuu erosta kasvihuonekaasuinventaarion ja globaalien hiilenkiertomallien tavassa käsitellä LULUCF-sektorin netto-CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöjä oikeudenmukaisuusperiaatteiden perusteella, kuten tässä raportissa tehdään.

³ Muiden kuin CO₂-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 CO₂-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.⁴

Muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen lämmittävään vaikutukseen liittyy luonnontieteellistä epävarmuutta skenaarioepävarmuuden lisäksi. Tätä epävarmuutta voidaan mallintaa hyödyntämällä muihin kuin CO₂-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.

⁴ 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 TARKASTELETAESSA 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-CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasujen päästöt vuosille 2020–2050. LULUCF-nettopäästöiksi kasvihuonekaasuinventaarion mukaisella määritelmällä (sisältää sekä suorat että epäsuorat ihmisperäiset nieluvaikutukset) oletettiin Ilmastopaneelin edellisten raporttien tapaan –21 Mt CO₂-ekv v⁻¹, josta keskimäärin 2,7 Mt CO₂-ekv v⁻¹ tulkittiin WAM-CN-skenaario mukaisesti muiksi kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöiksi. Tällöin LULUCF-sektorin netto-CO₂-päästöiksi laskettiin –23,7 Mt CO₂ v⁻¹ (negatiiviset arvot tarkoittavat nielua) ja kumulatiivisesti vuosille 2020–2050 –735 Mt CO₂.

Taulukossa 2 määritetään välivaiheittain kullakin laskentatavalla (inventariolaskennan suora sovellus, tapa 1 ja tapa 2) Suomen kasvihuonekaasuinventaarion kanssa yhteensopivaksi sovitettu 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** CO₂ 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 CO₂. Inventariolaskennan suora sovellus perustuu Ilmastopaneelin aiempien raporttien ratkaisuun käyttää globaalia CO₂: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** CO₂-ekv. Ero inventariolaskennan suoran sovelluksen globaaliin päästöbudjettiin kuvaa suurin piirtein muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen osuutta globaalissa päästöbudjetissa. Tavassa 1 globaali päästöbudjetti sovitetaan inventariolaskennan kanssa yhteensopivaksi lisäämällä siihen LULUCF-sektorin sovitustermi, joka on suuruudeltaan vuosien 2020–2050 globaalien epäsuorien nieluvaikutusten summa –151 Gt CO₂ (laskenta, ks. liite 3), ja muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen sovitustermi –362 Gt CO₂-ekv. Muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasujen osalta myöhemmässä vaiheessa kansallisella tasolla. Inventaarion suorassa sovelluksessa sovittamista ei tehdä ollenkaan. Tämän tuloksena taulukossa 2 kaikki kolme laskennan pohjalla olevaa globaalia päästöbudjettia poikkeavat toisistaan: 500 Gt CO₂-ekv., 363 Gt CO₂-ekv. ja 875 Gt CO₂-ekv.

Kukin globaali hiilibudjetti jyvitetään Suomelle samassa suhteessa kuin Ilmastopaneelin (2021) raportissa (79 Mt CO₂ / 336 000 Mt CO₂ ≈ 0,235 ‰). Inventariolaskennan suoralla sovelluksella saadaan Suomen päästöbudjetiksi ennen kansallisen tason sovituksia 118 Mt CO₂-ekv., tavalla 1 85 Mt

CO₂-ekv. ja tavalla 2 206 Mt CO₂-ekv.⁵ Tavan 2 muiden kuin CO₂-kasviuonekaasujen sovitustermi kansallisella tasolla on –292 Mt CO₂-ekv. Korjaustermi on lähes yhtä suuri kuin muiden kuin CO₂-kasviuonekaasujen yhteismäärä (318 Mt CO₂-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 CO₂-ekv. epäsuorien nieluvaikutusten huomioimisesta kansallisella tasolla. Näin saadaan inventaariolaskennan suoralla sovelluksella Suomen sovitetuksi päästöbudjetiksi **118 Mt CO₂-ekv.**, tavalla 1 **85 Mt CO₂-ekv.** ja tavalla 2 **–523 Mt CO₂-ekv.** Tavan 2 päästöbudjetin negatiivinen arvo tarkoittaa, että GWP100:lla yhteismitallistettuja kasviuonekaasupäästöjä pitäisi nettona poistaa ilmakehästä vuosien 2020–2050 välillä.

Hiilibudjetit saadaan vähentämällä päästöbudjeteista muiden kuin CO₂-kasviuonekaasujen yhteismäärä 318 Mt CO₂-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 CO₂-kasviuonekaasujen yhteismäärä GWP100:n avulla. Näin Suomen sovitetuksi hiilibudjetiksi (sisältäen ainoastaan CO₂:n) saadaan inventaariolaskennan suorassa sovelluksessa **–200 Mt CO₂-ekv.**, tavalla 1 **–233 Mt CO₂-ekv.** ja tavalla 2 **–841 Mt CO₂-ekv.**

Ei-LULUCF-sektoreille voidaan laskea hiilibudjetti vähentämällä hiilibudjetista LULUCF-sektorin CO₂-nettopäästöt (–735 Mt CO₂-ekv.) inventaariolaskennan mukaisesti.

Inventaariolaskennan suora sovellus antaa Suomelle suurimman ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjetin vuosille 2020–2050 (535 Mt CO₂). Tämä määrä vastaa hieman yli 14 vuoden fossiilisia CO₂-päästöjä vuoden 2020 tasolla (37,6 Mt CO₂ v⁻¹) ja sallisi tarkastelujaksolla keskimäärin 17,3 Mt CO₂ v⁻¹ päästöt. Se on vain hieman suurempi kuin tavalla 1 määritetty hiilibudjetti (503 Mt CO₂), joka sallisi keskimäärin 16,2 Mt CO₂ v⁻¹ päästöt. Merkillepantavaa on, että tapa 2 johtaa negatiiviseen ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjettiin (–106 Mt CO₂). 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 CO₂ v⁻¹ LULUCF-sektorin ulkopuolella. On hyvä huomata, että laskenta perustuu oletukseen, että samaan aikaan LULUCF-sektorin netto-CO₂-päästöt olisivat –23,7 Mt CO₂ v⁻¹ kasviuonekaasuinventaarion laskentatavalla, joten kokonaisuudessaan Suomen netto-CO₂-päästöt olisivat keskimäärin –27,1 Mt CO₂ v⁻¹. Liitteessä 2 esitetyt laskentatavat 3 ja 4 tuottavat hiilibudjetit, jotka asettuvat näiden kahden (tapa 1 ja tapa 2) väliin.

⁵ 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 CO₂-ekv.) laskennan välivaiheet vuosille 2020–2050 kolmella eri tavalla laskettuna. Taulukon yläosa näyttää globaalin tason laskennan ja alaosa kansallisen. Luvut on ilmoitettu yksikössä Mt CO₂-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 ₂ - kasvihuonekaasujen sovitus globaalilla tasolla		-362 000	
Sovitettu globaali päästöbudjetti	500 000	363 000	875 000
Suomen osuus globaalista päästöbudjetista (0,235 ‰)	118	85	206
LULUCF-laskennan sovitus kansallisella tasolla			-438
Muiden kuin CO ₂ - kasvihuonekaasujen sovitus kansallisella tasolla			-292
Suomen sovitettu päästöbudjetti	118	85	-523
Suomen muut kuin CO ₂ - kasvihuonekaasupäästöt (kaikki sektorit)	318	318	318
Suomen hiilibudjetti (kaikki sektorit)	-200	-233	-841
Suomen CO ₂ -päästöt (LULUCF)	-735	-735	-735
Suomen hiilibudjetti (ei- LULUCF)	535	503	-106

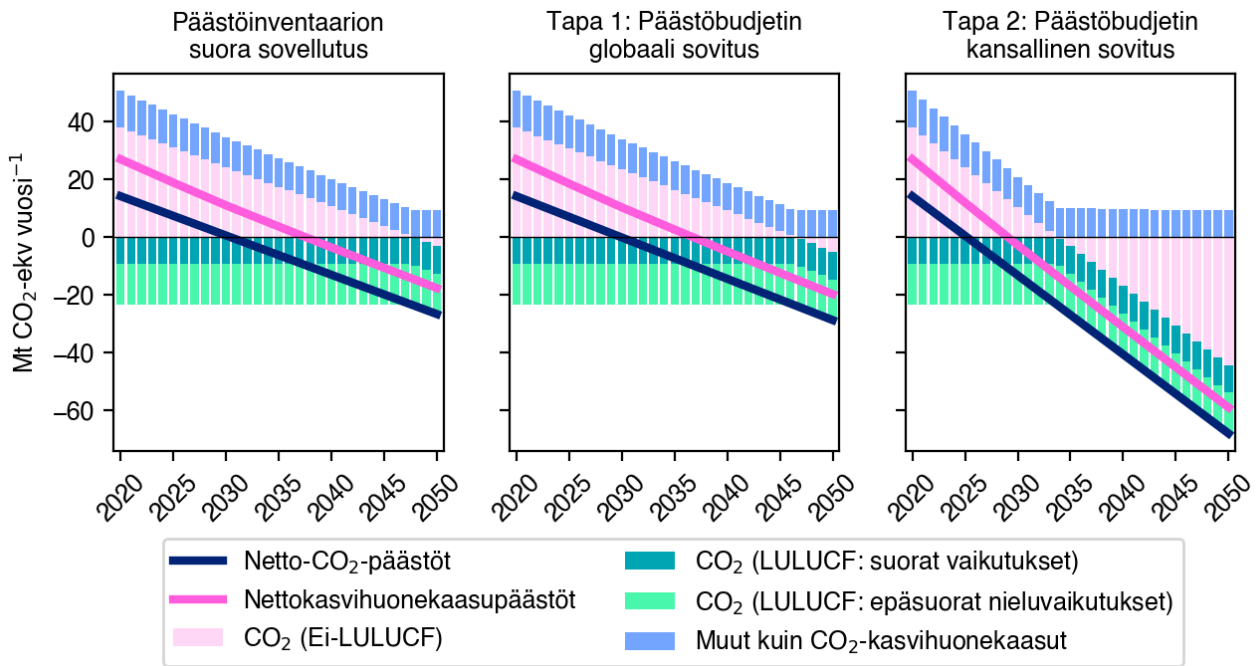
4. SUOMEN PÄÄSTÖVÄHENNYSPOJUN TARKASTELU VUOSILLE 2020–2050

Kumulatiivisten päästöjen laskemisen jälkeen päästövähennyspolut hahmoteltiin siten, että ei-LULUCF-sektoreiden kumulatiiviset CO₂-päästöt eivät ylittäneet niille laskettua vuosien 2020–2050 hiilibudjettia. Erilaisia tapoja jakaa päästöt eri vuosille on rajattomasti, mutta tässä valittiin yhtenevästi Ilmastopaneelin lähestymistavan kanssa ei-LULUCF-sektoreiden CO₂-päästöjen lineaarinen väheneminen vuoden 2020 tilanteesta. Osana ratkaisua LULUCF-sektorin nettopäästöt pidettiin vakiona. Edellä kuvatulla menetelmällä lasketut vuosittaiset CO₂-päästöt sekä LULUCF-sektorilla että muilla sektoreilla on esitetty Kuva 3. Kuva 3 LULUCF-sektorin netto-CO₂-päästöt (-23,7 Mt CO₂ v⁻¹) on ilmoitettu kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisesti kaikille kolmelle tavalle.⁶ Vuoden 2020 CO₂-päästöt ovat 37,6 Mt CO₂ v⁻¹ tilastoitujen päästöjen mukaiset (Tilastokeskus 2023b), mutta muut kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöt ovat WAM-CN-skenaariosta (skenaarion päästöt vuodelle 2020 ovat hyvin lähellä tilastoituja). Inventariolaskennan suoralla sovelluksella laskettuna (kuvan 3 vasen paneeli) vuosittaiseksi CO₂-päästövähennystarpeeksi ei-LULUCF-sektoreilla yhteensä saadaan 1,4 Mt CO₂ v⁻¹. Tavalla 1 vuosittaiset päästövähennystarpeet ovat 1,4 Mt CO₂ v⁻¹ ja tavalla 2 laskettuna 2,7 Mt CO₂ v⁻¹ eli peräti kaksinkertainen inventariolaskennan suoraan sovellukseen verrattuna.

Tässä raportissa ei tehty ei-LULUCF-sektoreiden netto-CO₂-päästöjen sisällä erottelua fossiilisten päästöjen ja lisäisten poistojen (teknologisten nielujen) välillä. Ei-LULUCF-sektoreiden netto-CO₂-päästöt ovat inventariolaskennan suoralla sovelluksella laskettuna vuonna 2050 -3,2 Mt CO₂ v⁻¹. Jos brutto-CO₂-päästöt muilta sektoreilta olisivat nollassa, tarvittaisiin siis tämän verran lisäisiä poistoja eli käytännössä teknologisia nieluja. Vertailun vuoksi, Ilmastopaneelin (2021) raportin 95 %:n päästövähennyspolun mukaiset lisäiset poistot olivat -2,6 Mt CO₂ v⁻¹ vuonna 2050. Tapojen 1 ja 2 vuoden 2050 netto-CO₂-päästöt muilta sektoreilta olivat -5,2 Mt CO₂ v⁻¹ ja -44,5 Mt CO₂ v⁻¹ 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, ja päästöbudjetissa pysymiseksi olisi erittäin todennäköisesti halvempaa vähentää WAM-CN-skenaariota enemmän muita kuin CO₂-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-CO₂-päästöt. Ilmastopaneelin (2021) raportin hahmottelemassa 95 %:n päästövähennysurassa ja Suomen ilmastolaissa hiilineutraalius (eli kasvihuonekaasujen nettonollapäästöt) saavutetaan vuonna 2035. Tässä raportissa inventariolaskennan suoralla sovelluksella vastaava vuosi on 2038 (ks. kuvan 3 vasemmanpuoleisen paneelin oranssi viiva) johtuen suuremmasta päästöbudjetista (118 Mt CO₂ vs. 79 Mt CO₂) ja muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen suhteellisesti pienemmistä vähennyksistä WAM-CN-skenaariossa verrattuna Ilmastopaneelin aiempien raporttien kaikkien kasvihuonekaasujen vähennyksiin (muita kuin CO₂-kasvihuonekaasuja ei aiemmissa raporteissa eritelty). Tavoilla 1 ja 2 lasketut vuodet kasvihuonekaasujen nettonollapäästöjen saavuttamiselle ovat 2037 ja 2029. Nettonolla-CO₂-päästöt (kuvan 3 siniset viivat) saavutettiin ennen kasvihuonekaasujen nettonollapäästöjä.

⁶ Liitteessä 4 Kuvassa 10 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-CO₂ pidetään vuosien 2020–2050 keskiarvon tasolla vakiona –23,7 Mt CO₂ v⁻¹. Nielut ja nettopäästöt sekä muut kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöt on esitetty kasvihuonekaasuinventaarion määritelmän mukaan siten, että suorat vaikutukset ja epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorilla huomioidaan nettopäästöissä.

Edellä annetut nettonollavuodet perustuivat kasvihuonekaasuinventaarion laskennan mukaisiin LULUCF-sektorin nettopäästöihin ja kaikkiin kasvihuonekaasupäästöihin. IPCC:n arviointiraporteissa käytetään globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin netto-CO₂-päästöjä, joten sillä tavalla 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 nettonollakasvihuonekaasupäästöt⁷ saavutetaan globaalilla tasolla keskimäärin vuoden 2070 jälkeen ja nettonolla-CO₂-päästöt vuoden 2050 jälkeen (Calvin ym. 2023). Käyttäen globaalien hiilenkiertomallien laskentatavan mukaisia LULUCF-sektorin nettopäästöjä IPCC:n raporttien mukaisesti nettonollakasvihuonekaasupäästöt saavutetaan inventaarion mukaista laskentatapaa myöhemmin: vuonna 2048 inventaariolaskennan suoralla sovelluksella, vuonna 2047 tavalla 1 ja vuonna 2034 tavalla 2. Vastaavasti nettonolla-CO₂-päästöt saavutetaan näille kolmelle tavalla vuosina 2041, 2040 ja 2031 (ks. liitteen 4 kuvan 8 oranssit ja siniset 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

⁷ Tämä eroaa Suomessa vakiintuneesta hiilineutraalius-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 CO₂-päästöjen nettonollapäästöjä.

niiden jyrkkyyteen ja sitä myöten esimerkiksi siihen, milloin hiilineutraalius saavutetaan kullakin laskentatavalla. Tämän ohella HIISI-hankkeen WAM-CN-skenaarion oletus muiden kuin CO₂-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.

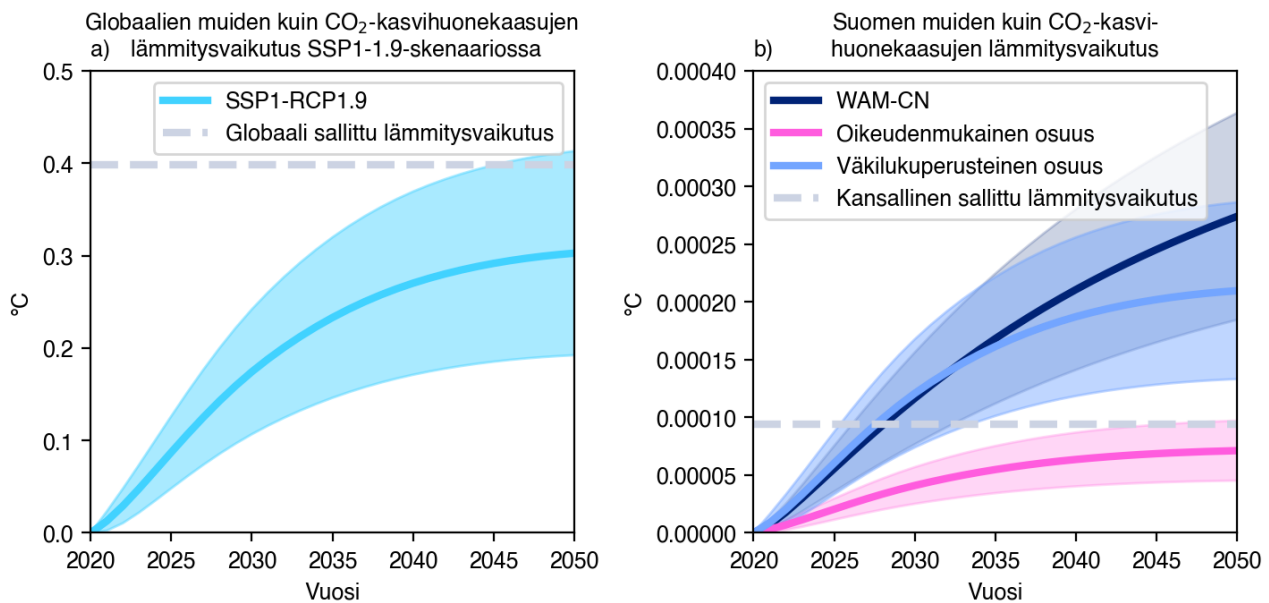
4.1 SUOMEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN ILMASTOVAIKUTUS

4.1.1 Muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus

Tässä raportissa käytetyn WAM-CN-skenaarion (ks. liite 5) mukaiset muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöt ovat suuremmat ja niiden suhteelliset päästövähennykset vuosina 2020–2050 pienemmät kuin Suomen oikeudenmukaiseksi katsottava osuus globaaleista muista kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöistä 1,5 asteen skenaarioissa.

WAM-CN-skenaarion muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen suhteellisen korkeaa tasoa voidaan havainnollistaa myös vertaamalla niiden lämmittävää vaikutusta Suomen oikeudenmukaiseen osuuteen SSP1-RCP1.9-skenaariossa muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävästä vaikutuksesta.

Globaalilla tasolla SSP1-RCP1.9-skenaariossa vuodesta 2020 päästettyjen muiden kuin CO₂-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 oranssilla viivalla Kuva 4b. Suomen muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus (kuvan 4b sininen 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 CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävää vaikutusta pitää kumota negatiivisilla CO₂-päästöillä (ks. luku 3).



Kuva 4: Muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus a) globaalilla ja b) Suomen tasolla. Väritetyt alueet kuvaavat 95 % luottamusväliä perustuen FalR-mallin simulaatioparveen. Harmaa katkoviiva esittää 1,5 asteen tavoitteen mukaista suurinta sallittua tulevaisuuden kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutusta vuonna 2050 Suomen tasolla. Oikeudenmukainen ja väkilukuperusteinen osuus tarkoittavat osuutta globaalista muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmittävästä vaikutuksesta.

Lisäksi muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen suhteellisen suurta määrää WAM-CN-skenaariossa havainnollistaa se, että niiden lämmittävä vaikutus on suurempi kuin väkilukuun suhteutettu osuus globaalien muiden kuin CO₂-päästöjen vaikutuksesta SSP1-RCP1.9-skenaariossa (vihreä viiva Kuva 4b). Eli WAM-CN-skenaariota mukainen muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen 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 CO₂-kasvihuonekaasut pienentävät tarpeettoman paljon hiilibudjettia tavoissa 1 ja 2. Vaikka tässä työssä ei tehty kustannustehokkuusanalyysia, niin oletettavasti olisi halvempaa vähentää muita kuin CO₂-kasvihuonekaasuja WAM-CN-skenaariota enemmän kuin saavuttaa tapojen 1 ja 2 hiilibudjettien vaatimia CO₂-päästövähennyksiä ja teknologisia nieluja.

4.1.2 Päästövähennyspolkujen kokonaisvaikutus globaaliin keskilämpötilaan

Edellä esitettyjen hiilibudjettien ja päästövähennyspolkujen perustana on Suomen oikeudenmukainen osuus kasvihuonekaasupäästöjen 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. Kasvihuonekaasuinventaarion laskentatavan mukaisilla LULUCF-sektorin netto-CO₂-päästöillä ei ole samanlaista suoraviivaista yhteyttä lämpötilan muutokseen. Tulokset on esitetty Kuva 5. Vasemmanpuoleinen y-akseli kuvaa Suomen kasvihuonekaasupäästöjen 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.

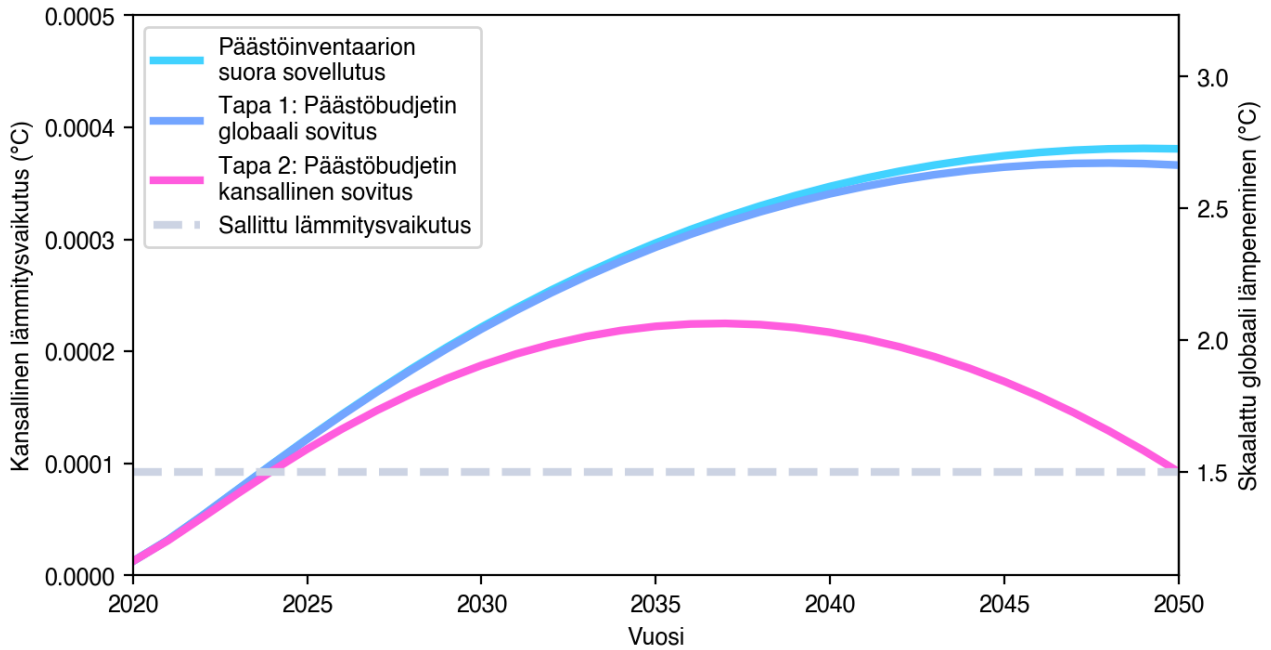
Koska Suomen jäljellä oleva päästöbudjetti kuluu nykypäästöillä muutamassa vuodessa, kaikki kolme (inventariolaskennan suora sovellus, tapa 1 ja tapa 2) päästövähennyspolkua johtavat sen ylitykseen 2020-luvulla. Tämän raportin päästövähennystavoitteet perustuvat globaaliin vuoden 2050 lämpötilatavoitteeseen 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 mK⁸, 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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

⁸ 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-kasviuonekaasupäästöjen lämmittävä vaikutus yksinkertaisen ilmastomallin avulla ja epäsuorat nieluvaikutukset nojaten Grassi ym. (2021, 2023) tutkimuksiin. Tavassa 1 päästöbudjetin sovitus epäsuorien nieluvaikutuksien ja muiden kuin CO₂-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^[Ollikainen ym. 2019] 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 vaativat 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 CO₂-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 ilmastopaneeli on ns. bottom-up -sopimus, sen osapuolet määrittelevät itse kansallisen reilun panoksen sen toteuttamiseen. Olisi tärkeitä analysoida, mikä hahmotetuista laskentatavoista vastaisi

⁹ 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.

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 kasvihuonekaasuinventariossa arvion epäsuorille nieluvaikutuksille. Tämä helpottaisi kasvihuonekaasuinventaarion 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 kasvihuonekaasuinventariossa. Vastaavasti myös globaaleja hiilenkiertomalleja voisi kehittää laskemaan maankäytön ihmisperäiset hiilinielut kasvihuonekaasuinventaarion mukaisen LULUCF-nielun mukaisesti.

Lopuksi on syytä todeta, että kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitallistaminen GWP100-periaatteen mukaan aliarvioi merkittävästi muiden kuin CO₂-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 nykymuotoisia ohjauskeinoja muiden kuin CO₂-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 CO₂. *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., Siegert, 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.

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/.

Tilastokeskus 2023b, November 8. *111k CO₂ 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/.

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.

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.

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.

LIITTEET

LIITE 1: TIETEELLINEN TAUSTA JA MENETELMÄT PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTIIEN LASKEMISEKSI

Globaalin hiilibudjetin tieteellistä taustaa

Hiilibudjetin määrittämisen, ilman että otetaan huomioon päästöjen ajallinen jakautuminen, tekee mahdolliseksi globaalin keskilämpötilan muutoksen ja kumulatiivisten CO₂-päästöjen välinen lähes lineaarinen riippuvuus (Transient Climate Response to cumulative CO₂ 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_j), muiden kuin CO₂-pakotteiden vaikutukseen^{CO₂}_{muut kuin CO₂} ja TCRE:hen (Rogelj ym., 2018). Hiilibudjetin taustalla on, että T_j voidaan esittää CO₂-päästöjen ja muiden kuin CO₂-pakotteiden vaikutusten summana:

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

CO₂:n aiheuttama lämpeneminen T_{CO₂} voidaan taas ilmaista kumulatiivisten CO₂ 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 CO₂-pakotteiden vaikutuksen arviointi perustuu yksinkertaisilla ilmastomalleilla tehtävään simulaatiopariin, jossa toisessa huomioidaan vain CO₂ ja toisessa kaikki pakotteet. Näiden simulaatioiden lämpötilan erotuksesta voidaan ensin laskea muiden kuin CO₂-pakotteiden vaikutus lämpötilaan ajan funktiona (esim. vuosille 1850–2100). Termi T_{muut kuin CO₂} puolestaan voidaan laskea edellisen kahden simulaation erotuksen muutoksena nykyhetkestä ajanhetkeen, jolloin CO₂-päästöt menevät nettonollaan. Termi T_{muut kuin CO₂} ei siis ole muiden kuin CO₂-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 CO₂-pakotteista. IPCC:n laskelmat perustuvat muiden kuin CO₂-pakotteiden keskimääräiseen lämpötilavaikutuksen T_{muut kuin CO₂} 1,5 asteen tavoitteen kanssa yhteensopivissa skenaarioissa.

Haasteita kansallisen muiden kuin CO₂-päästöjen huomioinnissa hiilibudjettikehikossa

Globaalin hiilibudjetin jakaminen kansallisiksi hiilibudjeteiksi siten, että myös muut kuin CO₂-päästöt jaettaisiin maittain, on haasteellista. Muut kuin CO₂-päästöt muodostavat suuremman ongelman luonnontieteellisesti, koska hiilibudjetti on määritelty vain CO₂-päästöille ja muille päästöille ei voida

määritellä yhtä yksinkertaista päästöbudjettia. Hiilibudjetin kaavassa oleva muut kuin CO₂-termi on muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen ja aerosolien aiheuttama lämpötilan muutos, eikä se sisällä suoraa tietoa päästöistä. Samaan lämpötilavaikutukseen johtavien skenaarioiden muiden kuin CO₂-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.

CO₂-päästöjen lämmittävää vaikutusta valittuna ajanhetkenä voidaan hyvin arvioida esiteollisesta kaudesta kyseiseen ajanhetkeen asti päästettyjen kumulatiivisten CO₂-päästöjen ja TCRE:n tulona (Allen ym. 2009, Matthews ym. 2009). Siten tapahtuneiden (tässä ennen vuotta 2020) CO₂-päästöjen lämmittävä vaikutus pysyy suurin piirtein ennallaan vuosisadan aikaskaalalla (MacDougall ym. 2020, Palazzo Corner ym. 2023). Ennen vuotta 2020 päästettyjen muiden kuin CO₂-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 CO₂-päästöjen kansallista osuutta ei voida suoraviivaisesti määritellä kuten hiilibudjetin tapauksessa.

Ilmastopolitiikassa muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen päästöt yhteismitallistetaan yleensä CO₂:n kanssa käyttämällä GWP100-kerrointa (Pierrehumbert 2014). GWP100-kerroin kertoo, kuinka moninkertaisesti verrattuna yhteen tonniin CO₂:a yhden tonnin päästö kasvihuonekaasua lämmittää ilmastoa 100 vuoden aikajänteellä. GWP-kerroin määrittää 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 lämmitysvaihtoksesta kuin GWP:n mittaama kumulatiivinen lämmitysvaihtoksesta. Tämän takia huomattavasti tarkemman arvion eri muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasupäästöjen skenaarion pohjalta voidaan laskea kansallinen hiilibudjetti. Työssä käytetään Ilmastopaneelin hahmotteleman hiilineutraaluspulun kanssa yhteensopivan WAM-CN-skenaarion mukaisia muita kuin CO₂-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:

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

Yllä muun kuin CO₂-pakotteen muutoksen aiheuttama lämpeneminen jaetaan ensinnäkin erikseen ennen ja jälkeen vuoden 2020 päästettyjen muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen vaikutukseen sekä aerosolipakotteen muutoksen vaikutukseen.

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

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

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

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

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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-päästöistä $E_{2015-2019}$ (210 Gt CO₂) (ei toteutuneita Suomen päästöjä, koska oikeudenmukaisen osuus lasketaan vasta vuodesta 2020 alkaen):

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

Jos hiilibudjettiin tehdään tavan 1 mukainen sovitus globaalilla lisäämällä globaalit epäsuorat nieluvaikutukset $E_{\text{es,gl}}$ ja globaalien muiden kuin CO₂-kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksen korjaustermi $E_{\text{muut kuin } CO_2\text{-khh,gl}}$, saadaan hiilibudjetin kaavaksi:

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

Muiden kuin CO₂-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 CO₂-kasvihuonekaasuihin ja aerosoleihin liittyvät termit laskettiin FaiR 2.1 -mallilla (Leach ym. 2021, Smith 2022) Suomen muut kuin CO₂-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 ($\mu=1,65 \text{ °C} / 1000 \text{ Gt CO}_2$, $\sigma=0,68 \text{ °C} / 1000 \text{ Gt CO}_2$). 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 päästöbudjettiarvioissa 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 ₂ -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 ₂ -kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus vuonna 2050.	0,000274 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$T_{muut\ kuin\ CO_2-khk,t\geq 2020,gl}$	Globaalien 2020–2050 päästettyjen muiden kuin CO ₂ -kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus vuonna 2050.	0,30 °C	FaIR 2.1 -simulaatiot
$TCRE$	Maapallon keskilämpötilan nousu suhteessa kumulatiivisiin CO ₂ -päästöihin (Transient Climate Response to cumulative CO ₂ emissions)	0,450 °C / 1000 Gt CO ₂	(Calvin ym. 2023)
$E_{2015-2019}$	Toteutuneet globaalit CO ₂ -päästöt vuosina 2015–2019	210 Gt CO ₂	(Calvin ym. 2023)
$E_{es,gl}$	Globaalit epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin netto-CO ₂ -päästöihin 2020–2050	–151 Gt CO ₂	(Grassi ym. 2021, 2023) (ks. liite 3)
$E_{es,fi}$	Kansalliset epäsuorat nieluvaikutukset LULUCF-sektorin netto-CO ₂ -päästöihin 2020–2050	–438 Mt CO ₂	(Grassi ym. 2021, 2023) (ks. liite 3)

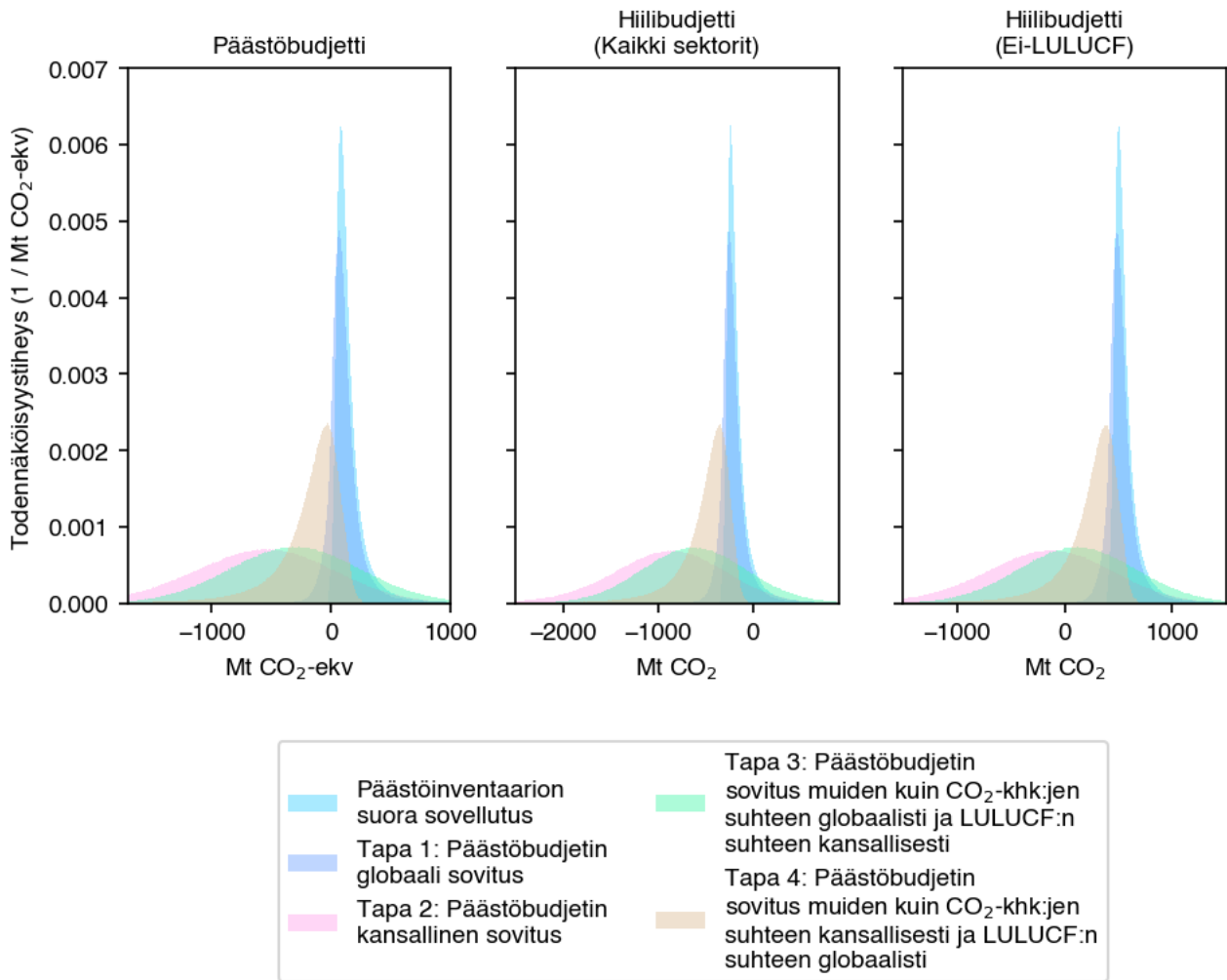
LIITE 2: PÄÄSTÖ- JA HIILIBUDJETTILASKELMIEN EPÄVARMUUSARVIOT

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 CO₂-kasvihuonekaasujen vaikutukselle. Inventaariolaskennan suoran sovelluksen epävarmuusanalyysi perustui ainoastaan TCRE:n ja globaalin muut kuin CO₂ 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 CO₂. Tarkempi analyysi olisi ollut mahdollista, jos IPCC:n raportin taustalaskelmat ja simulaatiot olisivat olleet käytettävissä.

Taulukko 4: Suomen päästö- ja hiilibudjettien (Mt CO₂-ekv.) laskennan välivaiheet vuosille 2020–2050 viidellä eri tavalla laskettuna. Taulukon yläosa näyttää globaalin tason laskennan ja alaosaa kansallisen. Luvut on ilmoitettu yksikössä Mt CO₂-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 ₂ -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 2 Kansallisella tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset ja kansalliset muut kuin CO ₂ -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 3 Kansallisella tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset ja globaalit muut kuin CO ₂ -kasvihuonekaasu päästöt.	Tapa 4 Globaalilla tasolla sovitettu epäsuorat nieluvaikutukset, kansalliset muut kuin CO ₂ -kasvihuonekaasu päästöt.
Globaali päästöbudjetti	500 000 (56 000, 2 830 000)	875 000 (182 000, 4 450 000)	875 000 (182 000, 4 450 000)	875 000 (182 000, 4 450 000)	875 000 (182 000, 4 450 000)
LULUCF-laskennan sovitus globaalilla tasolla		-151 000 (-259 000, -43 000)			-151 000 (-259 000, -43 000)
Muiden kuin CO ₂ -kasvihuonekaasujen sovitus globaalilla tasolla		-362 000 (-2 550 000, 6000)		-362 000 (-2 550 000, 6000)	
Sovitettu globaali päästöbudjetti	500 000 (56 000, 2 830 000)	363 000 (-521 000, 2 150 000)	875 000 (182 000, 4 450 000)	514 000 (-364 000, 2 300 000)	724 000 (18 500, 4 300 000)

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 ₂ -kasviuonekaasujen sovitus kansallisella tasolla			-292 (-2270, 31)		-292 (-2270, 31)
Suomen sovitettu päästöbudjetti	118 (13, 666)	85 (-123, 507)	-523 (-2110, 621)	-317 (-1400, 846)	-121 (-1370, 160)
Suomen muut kuin CO ₂ -kasviuonekaasupäästöt (kaikki sektorit)	318	318	318	318	318
Suomen hiilibudjetti (kaikki sektorit)	-200 (-305, 348)	-233 (-440, 189)	-841 (-2430, 303)	-635 (-1720, 528)	-439 (-1690, -157)
Suomen CO ₂ -päästöt (LULUCF)	-735	-735	-735	-735	-735
Suomen hiilibudjetti (ei-LULUCF)	535 (430, 1080)	503 (295, 924)	-106 (-690, 1040)	100 (-987, 1260)	296 (-952, 578)



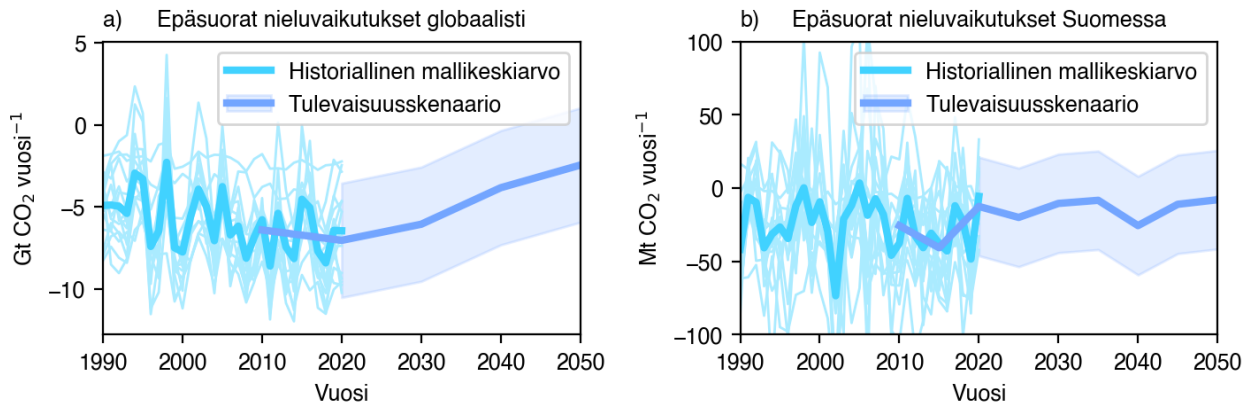
Kuva 6: Todennäköisyysjakaumat Suomen a) päästöbudjetille ja b) kaikkien sektoreiden hiilibudjetille ja c) ei-LULUCF-sektoreiden hiilibudjetille perustuen 10 000 000 realisaatioon.

LIITE 3: EPÄSUORAT NIELUVAIKUTUKSET

Hiilibudjetti määrittelee tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen enimmäismäärän tietylle globaalille keskilämpötilan nousulle esiteollisesta ilmastosta, kuten 1,5 asteelle. LULUCF-sektorin päästöt ja nielu kuluttavat tai kasvattavat jäljellä olevaa hiilibudjettia laskennallisesti samoin kuin fossiiliset CO₂-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 CO₂ v⁻¹ pienemmät kuin hiilibudjetin taustalla olevien menetelmien mukaan (Grassi ym. 2023). Ero on merkittävä, sillä esimerkiksi fossiiliset CO₂-päästöt olivat vuonna 2022 arviolta 37 Gt CO₂ v⁻¹. Mahdollisesti tärkein syy tälle erolle on eroavaisuus ihmisperäisen päästön sekä nielun määrittämistä seuraavissa laskentamenetelmissä. Kasvihuonekaasuinventaarioissa kaikki ihmiskäytössä olevilla mailla tapahtuvat päästöt ja nielut lasketaan ihmisperäisiksi. Globaaleiden hiilenkiertomallien määrittämisen mukaan taas ihmisperäisiksi lasketaan ainoastaan suorat vaikutukset, kuten hakkuut ja takaisinkasvu, mutta ei kasvaneesta CO₂-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 globaalille hiilibudjetin sallima määrä (Grassi ym. 2021). Tämän takia laskentamenetelmien erot tulisi sovittaa toisiinsa, jotta globaalilla 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) CO₂-pitoisuuden nousuun (Tagesson ym. 2020) sekä äärevien sääilmiöiden yleistymiseen (Schlesinger ym. 2016). Tässä raportissa epäsuorat nieluvaikutukset eli ilmastomuutoksen ja kasvaneen CO₂-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 CO₂-pitoisuuden vaikutus ihmiskäytössä olevan maan hiilinieluun) historiallisella ajanjaksolla 1990–2020 ja tulevaisuusskenaariossa (SSP2-1.9 a) globaalilla tasolla ja b) Suomessa. Harmaat ohuet viivat kuvaavat yksittäisten mallien tuloksia ja vaalean vihreä alue mallien historiallisen hajonnan perusteella laskettua 95 % luottamusväliä tulevaisuusskenaariolle.

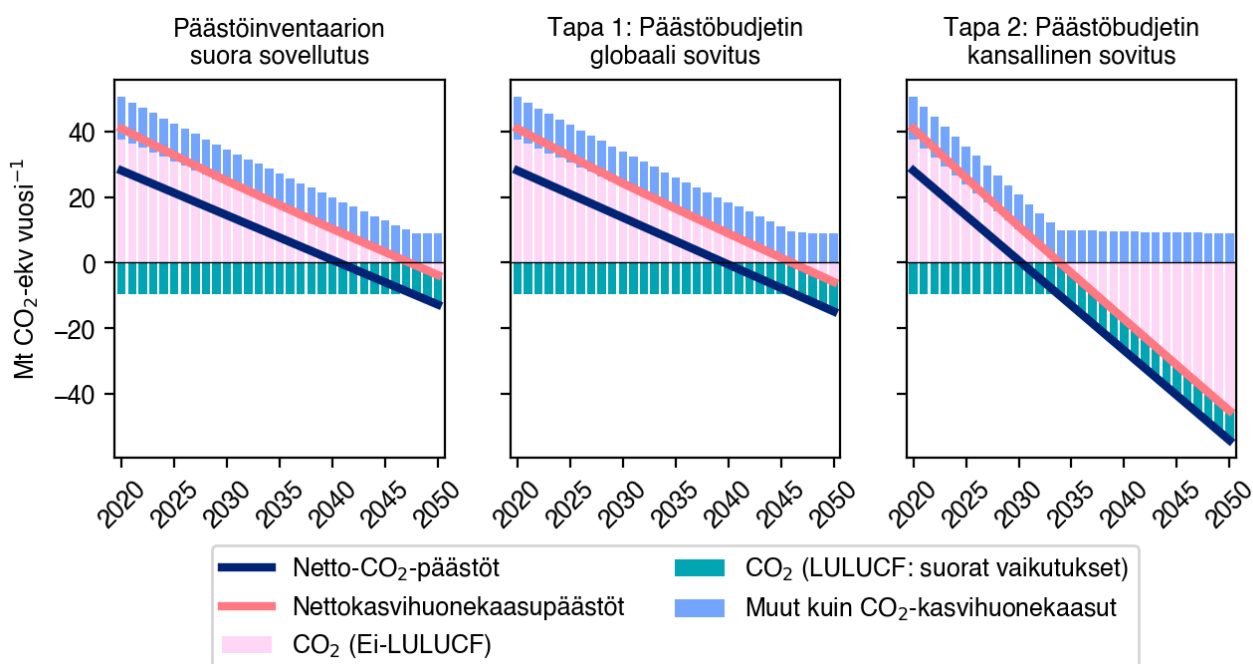
Tässä raportissa laskettiin aluksi epäsuorat nieluvaikutukset sekä Suomelle että globaalisti kaudelle 1990–2020 (Grassi ym. 2023) käyttämän 16 globaalien ekosysteemimallin tuloksien pohjalta (Kuva 7). Tulevaisuusskenaarion pohjana käytettiin (Grassi ym. 2021) mallintamia epäsuoria nieluvaikutuksia SSP2-RCP1.9-skenaariossa 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 kasvihuonekaasuinventaarioiden mukaan suurin osa (> 95 %) arvioiduista nieluista on metsissä, ja toisaalta myös sillä, että kasvihuonekaasuinventaarioissa ei kaikissa maissa raportoida muita kuin metsämaan nielua.

Suomen kasvihuonekaasuinventaariossa metsien CO₂-nielu on vaihdellut 2010-luvulla 37,9–17,2 Mt CO₂ v⁻¹. välillä. Vuonna 2021 metsien CO₂-nielu oli vain 7,4 Mt CO₂ v⁻¹, mikä teki LULUCF-sektorista ensimmäistä kertaa CO₂: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 CO₂-nettonielua noin 12 Mt CO₂ v⁻¹ (Tilastokeskus, 2023a). Kivennäismailla olevien viljelysmaiden CO₂-päästöt ovat 2010-luvulla olleet noin 0,5–1 Mt CO₂, eli varsin pienet kokonaispäästöihin ja -nieluun verrattuna. Epäsuorien nieluvaikutusten osuus kivennäismailla olevien viljelysmaiden CO₂-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 CO₂-päästöt vähennettyinä teknisillä nieluilla vastaavat taulukossa 2 esitettyjä tuloksia. LULUCF-sektorin CO₂-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 CO₂-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 CO₂-ekv. v⁻¹ LULUCF-sektorin nettopäästöiksi. Kun edellä mainituista nettopäästöistä vähennettiin WAM-skenaarion mukaiset muut kuin CO₂-kasvihuonekaasujen päästöt, saatiin LULUCF-sektorin CO₂-nettopäästöiksi vuosille 2020–2050 keskimäärin –23,7 Mt CO₂ v⁻¹. 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) CO₂-ekvivalenteiksi. Eri F-kaasuille ei ollut erittelyä, joten ne käsiteltiin ainoastaan CO₂-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.