



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2026

Hiilinielulaskennan epävarmuusanalyysi

**Annika Kangas, Juha Heikkinen, Hannu Hirvelä, Hannu Ilvesniemi,
Harri Kilpeläinen, Ilkka Leinonen, Aleksi Lehtonen, Lauri Mehtätalo,
Lorenzo Menichetti, Jukka-Pekka Myllykangas ja Antti Wall**



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2026

Hiilinielulaskennan epävarmuusanalyysi

**Annika Kangas, Juha Heikkinen, Hannu Hirvelä, Hannu Ilvesniemi,
Harri Kilpeläinen, Ilkka Leinonen, Aleksi Lehtonen, Lauri Mehtätalo,
Lorenzo Menichetti, Jukka-Pekka Myllykangas ja Antti Wall**

Viittausohje:

Kangas, A., Heikkinen, J., Hirvelä, H., Ilvesniemi, H., Kilpeläinen, H., Leinonen, I., Lehtonen, A., Mehtätalo, A., Menichetti, L., Myllykangas, J.-P. & Wall, A. 2026. Hiilinielulaskennan epävarmuusanalyysi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2026. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 67 s.

Annika Kangas ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-8637-5668>



ISBN 978-952-419-152-4 (Verkojulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-152-4>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Annika Kangas, Juha Heikkinen, Hannu Hirvelä, Hannu Ilvesniemi, Harri Kilpeläinen, Ilkka Leinonen, Aleksi Lehtonen, Lauri Mehtätalo, Lorenzo Menichetti, Jukka-Pekka Myllykangas ja Antti Wall

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2026

Julkaisu vuosi: 2026

Kannen kuva: Annika Kangas

Tiivistelmä

Annika Kangas¹, Juha Heikkinen², Hannu Hirvelä², Hannu Ilvesniemi², Harri Kilpeläinen¹, Ilkka Leinonen², Aleksi Lehtonen², Lauri Mehtätalo¹, Lorenzo Menichetti², Jukka-Pekka Myllykangas² ja Antti Wall³

¹ Luonnonvarakeskus, Joensuun toimipiste

² Luonnonvarakeskus, Helsingin toimipiste

³ Luonnonvarakeskus, Kokkolan toimipiste

MMM:n rahoittamassa Hiilinielujen epävarmuusanalyysi -hankkeessa analysoitiin Suomen ja Ruotsin kasvihuonekaasuinventarioiden eroja sekä eroja Nasan satelliittimittauksiin perustuvaan hiilinielujen seurantaan. Lisäksi analysoitiin Suomen kasvihuonekaasuinventariossa viime vuosina tehtyjä menetelmä- sekä aineistomuutoksia ja niiden vaikutuksia hiilinieluarvioiden muuttumiseen. Muutoksia on tehty erityisesti biomassamalleihin ja -kertoimiin sekä turvemaiden päästöjä kuvaaviin malleihin, ja erityisesti turvemaiden mallia on tarpeen kehittää edelleen. Lisäksi tarkasteltiin tulevaisuuteen kohdistuvien Mela-skenaarioiden laskentaa, ja laskennan muutosten vaikutusta puuston kasvuun, hakkuumahdollisuuksiin sekä hiilinielunusteisiin.

Vuosikymmeniä käytössä olleen Melan alkupuuston tuottamistavan on havaittu johtavan kasvun yliarvioon etenkin pitkällä aikavälillä, ja siksi sovellettu menetelmä uusittiin kokonaan VMI13 hakkuumahdollisuusarvioiden julkistamisen yhteydessä. Muutos vähensi selvästi arvioita tulevien vuosien kasvusta ja hiilinielusta. Lisäksi Mela:ssa käytetty tapa laskea puuston biomassa on uudistettu niin, että biomassakertoimet perustuvat viimeiseen VMI:hin, minkä seurauksena laskelmien perusteella saadut hiilinieluarviot vastaavat hyvin kasvihuonekaasuinventaarion saatuja arvoja.

Laskelmien käyttöä metsäpolitiikan suunnitteluun ja päätöksiin vaikeuttaa se, että kasvihuonekaasuinventaarion menetelmämuutokset vaikuttavat myös menneiden vuosien hiilinieluihin. Siten jokainen menetelmämuutos potentiaalisesti muuttaa tilannekuvaa hiilinieluista, ja uusia muutoksia on jo nyt näköpiirissä. Projektin paljasti myös tarpeen perusteellisesti validoida kaikki metsäpolitiikan formuloimiseen sovelletut kasvusimulaattorit.

Asiasanat: hiilinielu, maaperä, malli, Mela-ohjelmisto, skenaario

Abstract

Annika Kangas¹, Juha Heikkinen², Hannu Hirvelä², Hannu Ilvesniemi², Harri Kilpeläinen¹, Ilkka Leinonen², Aleksi Lehtonen², Lauri Mehtätalo¹, Lorenzo Menichetti², Jukka-Pekka Myllykangas² and Antti Wall³

¹Natural Resources Institute Luke, Joensuu Unit

² Natural Resources Institute Luke, Helsinki Unit

³ Natural Resources Institute Luke, Kokkola Unit

In the project "Uncertainty analysis of carbon sinks" funded by the Ministry of Agriculture and Forestry the differences between the Swedish and Finnish greenhouse gas inventories were analyzed, as well as differences to the Nasa satellite-based assessments of greenhouse gas sinks were. From the analysis, the reasons for the different results were inferred. In addition, the data- and method changes in the Finnish greenhouse gas inventory were analyzed, and their effect of the carbon sinks/sources were assessed. Such changes include the changes in the biomass models as well as in the models estimating the emissions from drained peatlands. There is a need to further develop the models for these drained peatlands. In addition, there the scenario analyses based on Mela growth simulator were analyzed, and the effects of the changes on the estimated growth, harvest potential and carbon sinks assessed.

An overestimation of growth in long term has been detected, due to the initial data generation routines that have been used for decades, and the method for generating this initial data was completely reconstructed before publishing the MELA calculations of NFI13 data. This change markedly reduced the predicted future growth. In addition, the approach for calculating tree biomasses was renewed so that the biomass expansion factors are based on the most recent NFI. After these changes, the predictions based on Mela correspond well to the values reported by the greenhouse gas inventory.

The usage of the greenhouse gas inventories in formulating forest policies is hindered by the fact that any methodological change also changes the carbon sink/source estimates of past years. Thus, each methodological change can radically change the perceived situation regarding the sinks, and new method changes can already be anticipated. The project also revealed a clear need to comprehensive validation of all growth simulators used in policy calculations.

Key words: carbon sink, soil, model, Mela-simulator, scenario

Sisällys

1. Tausta	6
2. Nykyinen Suomen kasvihuonekaasuinventaariorio	8
3. Laskennassa tehdyt muutokset	10
3.1. Turvemaiden maaperä.....	10
3.2. Kivennäismaiden maaperä.....	12
3.3. Biomassamallit- ja kertoimet kasvihuonekaasuinventaarioriossa	12
3.4. MELA-ohjelmisto skenaariolaskennoissa.....	14
3.5. Biomassamallit ja -kertoimet skenaariolaskennoissa.....	16
3.6. Maaperän hiili skenaariolaskennoissa	17
4. Vertailu muihin laskentatapoihin.....	18
4.1. Suomen kasvihuonekaasulaskennan erot verrattuna NASA:n tekemiin satelliittimittauksiin .	18
4.2. Globaalit ekosysteemitason mallit	20
4.3. Suomen kasvihuonelaskennan erot Ruotsin vastaavaan laskentaan.....	21
4.4. Maaperän hiilitaseiden epävarmuusanalyysit.....	24
4.5. Maaperämallien vertailu	25
5. Muutosten vaikutus hiilinieluarvioihin	32
5.1. Turvemaiden uuden laskentamenetelmän vaikutus	32
5.2. Skenaariolaskennat	34
5.3. Biomassamallit ja -kertoimet.....	38
6. Kasvihuonekaasulaskennat politiikan työvälineenä	41
6.1. Skenaariolaskennat	41
6.2. Maaperämallit ja -mittaukset.....	42
6.3. Poliittisen ohjauksen mahdollisuudet.....	45
7. Johtopäätökset.....	51
Viitteet.....	55
Liite A: Karikesyötteen epävarmuus kivennäismailla	61

1. Tausta

Annika Kangas

Luonnonvarakeskus (Luke) tuottaa vuosittain maankäyttösektorin ja maataloussektorin kasvi-huonekaasuinventaarion tulokset. Tammikuun 15. päivä 2025 julkaistujen ennakkotulosten mukaan Suomen metsät olivat vuoden 2010 31,5 Mt CO₂ ekvivalenttitonin nielusta muuttuneet 1,12 Mt CO₂ ekv. päästökseksi. Tarkemmassa analyysissä osoittautui, että vain Lapissa metsät olivat edelleen merkittävä hiilinielu ja että useimmissa muissa maakunnissa metsät olivat kääntyneet päästölähteiksi. Muutoksen syynä olivat ensisijaisesti maaperän päästöt: ne olivat kasvaneet niin suuriksi, ettei puuston hiilinielu pystynyt niitä kompensoimaan. Päästöt olivat kasvaneet erityisesti ojitetuilla turvemaidella, mutta myös kivennäismaat olivat muuttuneet päästölähteiksi.

Osittain muutos nielusta päästölähteeksi oli seurausta puuston kasvun ja poistuman kehitymisestä ajassa, osittain menetelmien muutoksista. Menetelmämuutosten vaikutus näkyy selvimmän siinä, että aiemmin julkaistujen inventointien tulokset muuttuvat taannehtivasti: jokainen menetelmän muutos vaikuttaa koko aikasarjaan. Esimerkiksi vuoden 2019 nielu arvioitiin vuoden 2021 raportissa (Lounasheimo ym. 2021, Luken tilastot) olevan 15.79 Mt CO₂ ekv, kun vuoden 2025 raportissa (Siikavirta ym. 2025, Luken tilastot) samaisen vuoden nielu oli enää 6,08 Mt CO₂ ekv.

Tulosjulkistuksen jälkeen laskentamenetelmään on edelleen tehty uusia muutoksia. Näiden muutosten seurauksena kivennäismaat muuttuivat jälleen nieluksi (Taulukko1). Siten uusimmissa, vielä julkaisemattomissa tuloksissa Suomen metsät ovat jälleen kääntyneet nieluksi, mutta nielu on hyvin pieni, 0,2 Mt CO₂ ekv.

Myös Ruotsissa metsien hiilinielut ovat viime vuosina pienentyneet, esimerkiksi elävän puuston nielu on vuoden 1991 39 Mt CO₂:sta tipahtanut vuoden 2022 17 Mt CO₂:een (NIR Se submission s. 96). Syyksi arvioitiin muun muassa puuston hidastunut kasvu, ja kasvanut luonnonpoistuma sekä hakkuupoistuma. Viimeisimmän julkaistun inventaarion mukaan Ruotsin metsät ovat kaikkiaan 31 Mt CO₂ nielu. Ruotsin ja Suomen nielujen välillä oleva ero ei ole juurikaan pienentynyt vuosien saatossa, vaan nielujen pieneneminen on tapahtunut molemmissa maissa suunnilleen samalla tavoin.

Luke tuottaa myös vuosittain erilaisia skenaariolaskelmia siitä, miten hakkuumäärien tai metsänhoidon muutos vaikuttaa tuleviin hiilinieluihin. Myös skenaarioiden tuloksissa on toisinaan ollut dramaattisikin muutoksia arvioissa tulevasta hiilinieluista.

Muutosten syyt ovat pääosin tiedossa, mutta kaikkien osalta ei ole tiedossa miten suuri on kunkin yksittäisen tekijän vaikutus, tai mikä on eri tekijöiden yhteisvaikutus. Erityisesti maaperän päästöjen osalta laskennassa on suuria epävarmuuksia, eikä tämän epävarmuuden merkitys ole selvää. Laskentaan on myös vuosien mittaan tehty lukuisia muutoksia, ja uusiakin muutoksia on näköpiirissä. Laskentaan tehdyt muutokset sekä epävarmuudet yhdessä aiheuttavat sen, että erilaisten politiikan ohjauskeinojen vaikuttavuutta on vaikea ennakoita.

MMM:n rahoittamassa Hiilinielujen epävarmuusanalyysi -hankkeessa perehdytään sekä maaperän että puuston kasvihuonekaasulaskennan epävarmuuksiin ja laskennan muutosten vaikutuksiin. Työssä tarkastellaan myös muutoksia tulevaisuuteen suuntaavien skenaarioiden

laskennassa, ja niiden vaikutuksia hiilinieluihin. Muutoksia ja malleja tarkastellaan muutos kerrollaan, jotta voidaan löytää merkittävimmät epävarmuuden lähteet. Työssä arvioidaan mahdollisuuksien mukaan myös sitä, missä määrin hiilinielujen muutokset ovat seurausta laskennan muutoksista ja missä määrin metsänhoidon tai ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta. Tavoitteena on saatujen tulosten perusteella arvioida sitä, onko käytettävissä olevilla laskentamalleilla mahdollista luotettavasti todentaa erilaisten politiikan ohjauskeinojen vaikuttavuutta epävarmuuden vallitessa. Lisäksi arvioidaan, mitä mahdollisia ongelmakohtia laskennoissa on, ja millaisilla toimilla nämä ongelmakohdat olisi mahdollista tulevaisuudessa korjata.

2. Nykyinen Suomen kasvihuonekaasuinventaariorio

Annika Kangas

Kasvihuonekaasuinventariossa puuston varasto, sen kasvu sekä luonnonpoistuma saadaan Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koela-aineistoihin perustuen. Kullakin koelalla mitatuille koepuille lasketaan tilavuudet sekä biomassat soveltuvilla malleilla. Tilavuuden laskennassa käytetään Laasasenahon (1982) tilavuusmalleja. Puiden biomassa (kanto ja juuret, oksat, lehdet ja neulas) on vuoteen 2025 saakka laskettu Repolan (2008, 2009) biomassamalleilla, ja rungon biomassa Repolan (2007) tiheysmallilla. Tiheysmallia käytettäessä rungon tilavuus kerrotaan tiheydellä, jolloin saadaan biomassa. Uusimmissa tuloksissa käytössä ovat Repolan ym. (2025) julkaisemattomat, uudet biomassamallit.

Koepuiden biomassan ja tilavuuden suhteesta saadaan ns. biomassakerroin (BCEF eli biomass conversion and expansion factor). Se lasketaan erikseen elävälle puustolle, kasvulle, luonnonpoistumalle sekä hakkuupoistumalle. Kun biomassakertoimella kerrotaan VMI:sta saatu tilavuus jollekin ositteelle, saadaan kyseisen ositteen biomassa. Tilavuuden kasvu saadaan pysyviltä koelaloilta kahden mittauskerran tilavuuksien erotuksena ja luonnonpoistuma mittausjaksoilla kuolleiden puiden tilavuutena. Toteutuneiden hakkuuiden tilavuus puolestaan saadaan tilastoista. Kaikkien ositteiden tilavuudet muunnetaan edelleen biomassaksi kyseisen ositteen biomassakertoimilla. Puuston hiilinielu saadaan kasvun ja poistuman sisältämien hiilimäärien erotuksena, hiilidioksidiksi muunnettuna.

Yksinkertaisimmillaan metsämaan ojitettujen turvemaiden CO₂-päästöt lasketaan kertomalla turvekangastyyppittäinen päästökerroin vastaavan tyyppin pinta-alalla. Päästökerroin on maanpäällisen ja maanalaisen karikesyötteen ja turpeen hajoamisen erotus. Maanalainen karike on puuston ja muun kasvillisuuden juurista syntyvä karike. Karikkeen määrän arviointi puolestaan perustuu ositteittaisiin biomassavarastoihin ja kariketuohtokertoimiin. Kun ositteen (kuten lehdet ja neulas) kokonaisbiomassa kerrotaan kariketuohtokertoimella, saadaan ennuste syntyvän karikkeen määrästä.

IPCC:n 2013 Wetlands Supplement -ohje antaa keskimääräiset päästökertoimet (Tier 1 malli) borealiselle vyöhykkeelle ravinteikkaille ja ravinneköyhille metsämaan ojitetuille turvemaille. Koko maan keskimääräinen päästökerroin on näiden pinta-alalla painotettu keskiarvo. EUn hallintoasetuksen 2023/839 mukaan kaikkien maiden pitää siirtyä Tier 2 malliin viimeistään vuonna 2028, ja Tier 3 malliin viimeistään vuonna 2030. Suomessa tätä Tier 1 mallia ei ole käytetty, vaan Suomen KHKI-laskennassa käytettiin vuoteen 2023 saakka Minkkinen ym. (2007) julkaisuun perustuvia päästökertoimia (Tier 2). Vuonna 2023 siirryttiin käyttämään uudemman, Alm ym. (2023) julkaisun mukaisia kertoimia (Tier 3). Ojittamattomia turvemaita ei IPCC:n ohjeiden mukaisesti sisällytetä laskelmiin, koska niiden päästöt ja nielut ovat luontaisia, eivätkä ihmistoimien seurausta. Ojitetuilla turvemaille on hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös typpioksiduuli- (N₂O) ja metaanipäästöjä (CH₄), jotka tyypillisesti raportoidaan hiilidioksidiekvivalentteina.

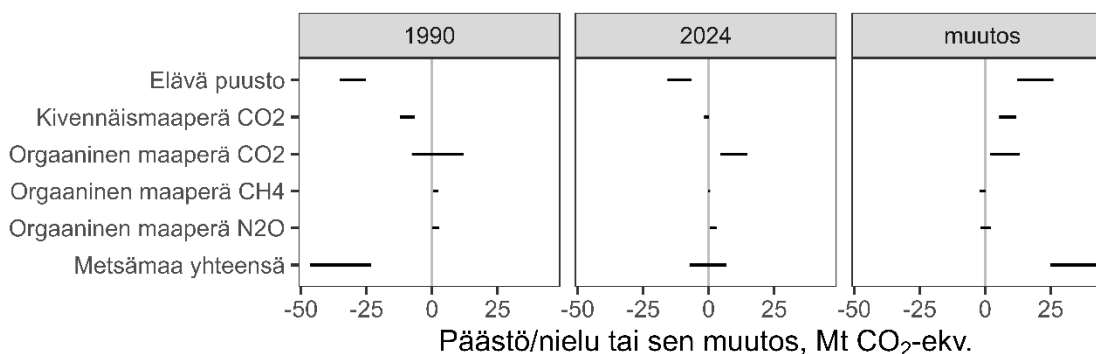
Kivennäismailla laskennassa on käytetty Yasso07 mallia (Tuomi ym. 2011a, b). Myös turvemaille sovelletaan Yasso07 mallia hakkuutähteiden ja luonnonpoistuman osalta, koska ne eivät sisälly Alm ym. (2023) mallien ositteisiin. Yasso07-mallin syötteenä on puuston biomassan perusteella ennustettu karikesyöte sekä VMI:ssä mitattu luonnonpoistuma.

Laskennan tuloksena saadaan hiilinielut tai -päästöt puubiomassalle, sekä orgaanisille että kivennäismaille. Kaikille komponenteille lasketaan myös epävarmuusarvio, joka koostuu otannasta johtuvasta epävarmuudesta, käytettyjen mallien parametriestimaattien epävarmuudesta ja jäännösvaihtelusta sekä mallien syöttötietoihin liittyvästä epävarmuudesta. Uusimman laskelman mukaan Suomen metsät ovat pieni nielu (Taulukko1), joskin epävarmuus on niin suurta, että varmuudella ei voida tietää, ovatko metsät nielu vai päästö.

Taulukko 1. Uusimman hiilinielulaskelman tulos.

Komponentti	Hiilivaraston muutos, Mt CO ₂ -ekv.	Epävarmuus, %	95 % luottamusväli.	
Elävä puusto	11,1	41,4	6,5	11,1
Kivennäismaat	0,8	125,4	-0,2	0,8
Orgaaniset maat	-9,7	53,0	-14,9	-9,7
Yhteensä	0,2	2 883	-6,9	0,2

Tulokset ovat epävarmimmat orgaanisten maiden (ojitetut turvesuot) suhteen (Kuva 1), ja kivennäismaiden maaperän epävarmuus on puolestaan vähäisempää kuin esimerkiksi elävän puuston arvion epävarmuus.



Kuva 1. Kuvassa negatiiviset arvot kuvaavat nielua (1990, 2024) tai nielun vahvistumista (muutos), ja positiiviset arvot päästöä (1990, 2024) tai päästön lisääntymistä / nielun heikentymistä (muutos). Viivan leveys kuvaa kyseisen komponentin luottamusväliä.

3. Laskennassa tehdyt muutokset

3.1. Turvemaiden maaperä

Antti Wall ja Annika Kangas

Merkittävin muutos turvemaiden kasvihuonekaasujen laskennassa on ollut siirtyminen Minkinen ym. (2007) julkaisun menetelmästä Alm ym. (2023) julkaisussa kuvattuun laskentamenetelmään. Tavoitteena oli menetelmä, joka kuvastaisi realistisemmin olosuhteiden vaikutusta päästöihin. Vanha malli perustui ainoastaan kahden suomalaisen (Vesijako ja Kivalo) sekä yhden virolaisen (Väätsa) suokohteen mittauksiin. Ensin mainitut edustavat boreaalista ja viimeksi mainittu hemiboreaalista vyöhykettä. Tätä ns. Tier-2 mallia pidettiin ongelmallisena, mm. koska uutta maanpäällistä kariketta oletetaan mallissa syntyvän yhtä paljon kuin sitä vuosittain hajoaa, eikä maanalaisen karikesyötteen kasvun oleteta lisäävän maaperän hajoamista. Lisäksi pintakasvillisuuden kariketuotos oletettiin vakioksi ajan suhteen, ts. sen muutosta latvuston sulkeutuessa ja kuivatuksen edetessä ei huomioitu.

Uusi laskentamenetelmä noudattaa kansainvälisen ilmastomuutospaneelin laskentaohjeistusta (IPCC 2006) ja sitä täydentävää kosteikkoliitettä (IPCC 2014). Maaperän hiilidioksidin päästöjen ja poistumien yhteydessä lasketaan myös karikkeen ja kuolleen puun hiilidioksidin taseet osana maaperän tasetta. Laskentamenetelmä on ollut käytössä vuoden 2023 inventaarioraportista alkaen ja on hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) laskentamenetelmäportaikon korkeimmassa tason Tier-3 luokassa. Laskenta perustuu VMI:n puustoaineistoihin, poistumatilastoihin, empiiriseen orgaanisen aineen (turve, karike) hajotusmalliin, Ilmatieteen laitoksen lämpötila-aineistoihin sekä hakkuutähteiden ja luonnonpoistumasta syntyvän karikesyötteen osalta Yasso07 maahiilimallinnukseen.

Maaperän hiilidioksidipäästöt arvioidaan turpeen ja karikkeen hajoamisen (R_{Het}) ja puiden ja aluskasvillisuuden karikesyötteen vuosittaisena erotuksena, jolloin tuloksena saadaan pinta-alayksikkökohtainen päästökerroin (EF):

$$EF = R_{Het} - \frac{44}{12}(I_P + I_K + I_L + I_H)$$

jossa I_P on elävän puuston maanpäällinen ja maanalainen karikesyöte, I_K pintakasvillisuuden karikesyöte, I_L luonnonpoistuman karikesyöte ja I_H hakkuupoistuman karikesyöte. 44/12 on hiilidioksidin ja hiilen moolimassojen suhde, jolla muunnetaan orgaanisen aineksen hiili hiilidioksidiksi. Turpeen ja karikkeen hajoaminen sisältää maanalaisen ja maanpäällisen elävän puuston karikkeen, luonnonpoistuman karikkeen, pintakasvillisuuden karikkeen ja hakkuupoistuman karikkeen hajoamisesta vapautuvan hiilidioksidin.

Turpeen ja karikkeen hajoaminen lasketaan empiiristen regressiomallien avulla, jotka käyttävät dynaamisina selittäjinä puuston pohjapinta-alaa (m^2/ha) ja kasvukauden (touko-lokakuu) lämpötilaa. Mallien aineisto koostuu turvekangastyypit kattavasta 68 mittauskoelasta, joiden hiilidioksiditasetta mitattiin kahden vuoden ajan (Ojanen ym. 2010, 2013). Kyseiset kohteet ovat ns. häiriöttömiä pintoja, eivätkä sisällä kohteita, joissa olisi ollut joko pääte- tai harvennushakkuu hiljattain. Aineistosta puuttuvat myös päätehakkuiden jälkeiset uudisojitukset, sekä erilaiset maanmuokkaukset. Mallit eivät sisällä hakkuutähteen ja luonnonpoistuman

karikkeesta vapautuvaa hiilidioksidia ja siksi näiden karikesyötekomponenttien hajoaminen lasketaan Yasso07-maaperämallin avulla.

Kasvillisuuden kariketuotos koostuu elävän puuston maanpäällisestä karikkeesta, puuston ja varpujen hienojuurten karikkeesta (läpimitta < 2 mm), pintakasvillisuuden karikkeesta (poislukien varpujen hienojuuret), luonnonpoistuman karikkeesta ja hakkuutähteen karikkeesta. Karikkeen biomassan oletetaan sisältävän 50 % hiiltä. Puuston karikesyöte lasketaan kertomalla puuston ositteittain biomassa (runkopuu, kuori, oksat, lehvästö, kanto ja paksujuuret) kunkin ositteen kariketuotantokertoimella. Puuston ja varpujen hienojuurten biomassa lasketaan puuston pohjapinta-alan ja varpujen peittävyuden perusteella regressiomalleilla turvekangastyyppittäin. Pintakasvillisuuden maanpäällinen ja maanalainen kariketuotos lasketaan regressiomalleilla, joissa puuston pohjapinta-ala on selittävä tekijä (Ojanen ym. 2014). Hakkuutähteen karike koostuu lehvästä, oksista, hukkapuusta ja kannoista. Hakkuutähteen määrä perustuu hakkuupoistuman tilastoon. Luonnonpoistuman runkotilavuus perustuu VMI:n tuloksiin ja luonnonpoistuman biomassakomponenttien karikeositteet ovat samat kuin elävällä puustolla.

Metsämaan ojitettujen turvemaiden CO₂-nettotase Suomen metsämaan pinta-alle lasketaan kertomalla turvekangastyyppittainen (n) päästökerroin (EF) vastaavan turvekangastyyppin pinta-alalla (A).

$$CO_2\text{tase} = \sum_n (A \times EF)_n$$

Metsämaan pinta-alana käytetään FAO:n metsämaan määritelmän mukaista pinta-alaa (FRA 2020).

Ojanen ja Minkkinen (2019) osoittivat, että ojitettujen soiden CO₂ päästöt häiriöttömältä sarjalta riippuvat kasvupaikan ravinteisuudesta ja pohjavedenpinnan tasosta. Kaikissa aiemmissä tutkimuksissa pohjaveden pinnan tason sisällyttäminen malliin ei kuitenkaan merkittävästi parantanut turpeen hajoamista kuvaavan mallin selitysasetta (Ojanen ym. 2013). Alm ym. (2023) mallia onkin julkisuudessa kritisoitu siitä, että vesitaloutta ei ole mallissa selittävänä muuttujana, vaan on oletettu, että puuston pohjapinta-ala kuvaa elävän puuston vaikutuksen vesitalouteen. Tämä on ongelmallista jo siksi, että ilman vedenpinnan tason sisällyttämistä malliin on mahdotonta myöskään arvioida tai todentaa vedenpinnan nostamisen vaikutusta hiilinieluihin.

Perusteluna pohjaveden pinnan tason jättämiseen pois mallista oli, että ei katsottu olevan mahdollista tuottaa vuodesta 1990 alkaen sellaista aikasarjaa pohjaveden pinnan tasosta, että mallin soveltaminen olisi mahdollista. Professori Laurén (pers. komm.) on kuitenkin sitä mieltä, että hydrologian konstruointi olisi jälkikäteenkin mahdollista mallinnuksen avulla, jolloin KHK-vaihtoa mallinnettisiin ennustetun vedenpinnan tason avulla.

Toiseksi mallia on kritisoitu siitä, että lämpötilan muutoksen vaikutusta on kuvattu aineistolla, jossa lämpötila ei vaihtelee ajassa, vaan tilassa. Tällöin on mahdollista, että mallissa lämpötila kuvaa ilmastomuutoksen vaikutuksen lisäksi tai asemesta koealojen eroja sijainnin ja muiden ominaisuuksien suhteen.

Kolmanneksi mallissa maaperällä ei ole hiilivarastoa eikä karikkeen ja turpeen hajoamisessa syntyvä CO₂ päästö (R_{Het}) ei riipu hajotettavan orgaanisen aineen määrästä kuten

kivennäismailla käytettävässä Yasso07 mallissa. Tämän seurauksena on riski, että mahdolliset systemaattiset virheet joko karikesyötteen tai hajotuksen tasossa tai näiden ajallisessa trendissä heijastuvat suoraan mallinnettuihin päästökertoimiin ja Suomen ojitettujen turvemaiden CO₂ taseeseen.

3.2. Kivennäismaiden maaperä

Annika Kangas

Viime vuosina laskennassa ei ole ollut kivennäismaan osalta erityisen merkittäviä muutoksia. Vuonna 2015 mallin parametrit vaihdettiin globaaleista pohjoismaisiin, mutta muutoksen vaikutus ei ollut merkittävä. Vuonna 2019 laskennassa käytettävä lämpötila muutettiin 30 vuoden liukuvaksi keskiarvoksi, ja lämpötila laskettiin koko maalle rasterina. Aiemmin lämpötila oli pidemmän aikavälin keskiarvo. Laskennan tulokset annetaan viiden vuoden liukuvina keskiarvoina.

Uudempia Yasso-versioita on kehitetty, mutta niitä ei ole KHK-laskennassa aiemmin testattu. Jari Liskin (Pers. komm.) mukaan Yasso07 on edelleen perusteltu valinta boreaalisen alueen mallintamiseen, koska se on eri malliversioista parhaiten verifioitu suhteessa maaperämittauksiin tällä alueella.

3.3. Biomassamallit- ja kertoimet kasvihuonekaasuinventaariossa

Annika Kangas

Puiden biomassan laskennassa on kasvihuonekaasuinventaarion osalta tapahtunut viime vuosina kaksi merkittävämpää menetelmämuutosta. Aiemmin KHKI-laskennassa oli käytetty Repolan ns. viiden selittäjän mallia, mutta koska VMI:ssä ei enää mitata kaikkia mallin tarvitsemia selittäjiä, oli tarpeen siirtyä ns. kolmen selittäjän malliin. Tammikuussa 2025 julkaistuissa tuloksissa sovelletussa mallissa oli puun läpimitan ja pituuden lisäksi selittäjänä puun latvuksen pituus, mutta ei enää kuoren paksuutta ja puun sädekasvua. Vielä merkittävämpi muutos on se, että uusimmissa kasvihuonekaasuinventaarion tuloksissa sovelletaan kokonaan uutta, Repolan ym. (2025 käsikirjoitus) biomassamallia.

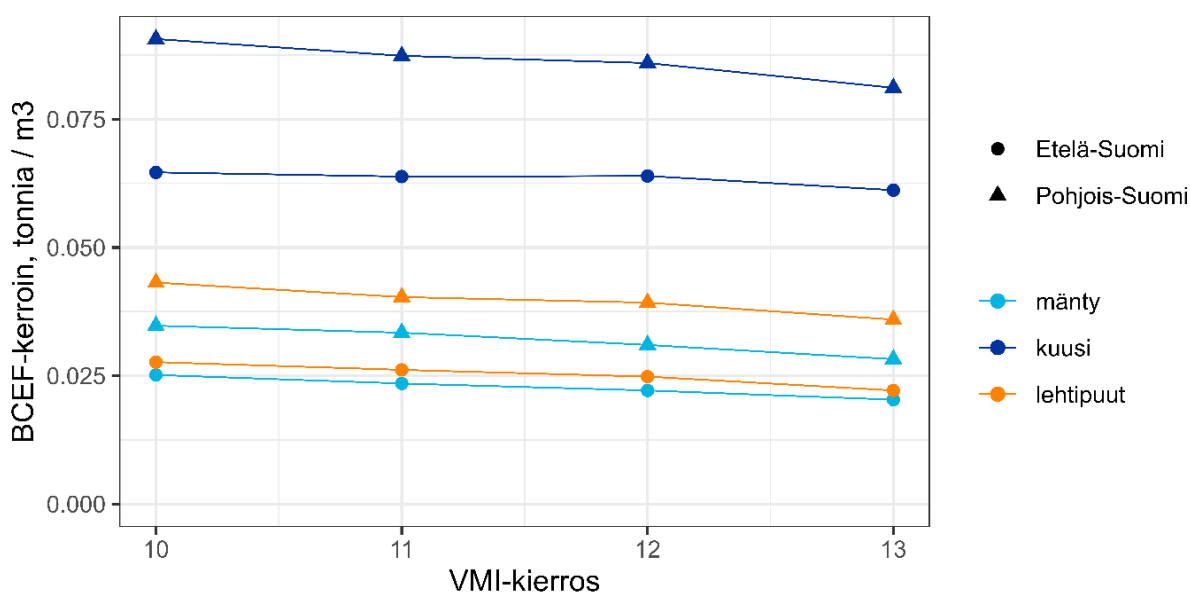
Biomassamallit oli tarpeen uusia, koska vertailu eri laskentatapojen (koko puun biomassamalli versus ositteittaiset biomassamallit) ja eri malliversioiden (em. 3 ja 5 selittäjän mallit ja MELA-ohjelmistossa (Hirvelä ym. 2017) sovellettava 2 selittäjän malli) välillä paljasti mallien toimivan jossain määrin epäloogisesti: esimerkiksi eri biomassaositteiden ennusteiden summa ei vastannut kokonaisbiomassamallin ennustetta, eivätkä eri malleilla laskettujen biomassojen keskiarvot tietyssä aineistossa vastanneet toisiaan.

Biomassamalleja käytetään kasvihuonekaasuinventoinnissa VMI:n koepuiden biomassan laskemiseen. Koska malleja ei voida soveltaa lukupuille, joista on mitattu ainoastaan puulaji ja läpimitta, tulokset yleistetään lukupuille erityisillä biomassakertoimilla. Biomassakerroin on koepuun biomassan ja tilavuuden suhde. Kun sillä kerrotaan lukupuiden tilavuus, saadaan niille biomassan ennuste, ja tämän jälkeen voidaan laskea VMI-koealan biomassa ja edelleen alueittaiset keskiarvot.

Biomassakertoimet lasketaan erikseen puuston varastolle (eli eläville puille), hakkuupoistumalle, luonnonpoistumalle sekä kasvulle. Kasvihuonekaasulaskennassa sovelletaan kullekin em. ositteelle alueellisia (Etelä- ja Pohjois-Suomi), keskimääräisiä kertoimia puulajeittain. Mitauksissa on todennettu, että elävän puuston biomassakertoimet vaihtelevat läpimittaluokittain, ja eri inventointien välillä läpimittaluokittaisissa kertoimissa voi olla suurtakin vaihtelua. Koska kertoimet lasketaan VMI:n koepuutietojen perusteella ja yleistetään edelleen saman VMI:n lukupuille samoilla alueilla, keskiarvoistus ei kuitenkaan vaikuta tuloksiin kasvihuonekaasuinventoinnissa.

Tämän lisäksi tuloksiin vaikuttaa myös aineistomuutos: kun uudet VMI13 tulokset julkistettiin, niiden perusteella laskettiin myös uudet biomassakertoimet. VMI10 jälkeen biomassakertoimet ovat muuttuneet varsin maltillisesti, mutta säännönmukaisesti alaspäin (Kuva 2). Viimeisin muutos oli aikaisempia isompi, koska VMI13:ssä havaittiin, että puiden latvukset ovat lyhyempiä kuin aikaisemmissa inventoinneissa (Korhonen ym. 2024).

Kun biomassamallit- ja kertoimet muuttuvat, muuttuu myös karikesyöte maaperään, koska niiden syntyminen on mallinnettu biomassan avulla. Karikesyöte vaikuttaa olennaisesti maaperän CO₂ taseeseen niin kivennäismailla kuin turvemilla. Karikesyöte eri ositteissa (lehdet ja neulaset, oksat, juuret jne.) arvioidaan kertomalla kunkin ositteen biomassa kunkin kariketyypin kiertonopeudella (Muukkonen 2004, Muukkonen ja Lehtonen 2004). Myös luonnonpoistuma sekä hakkuutähteet ja pintakasvillisuus tuottavat karikesyötettä, joskin niiden merkitys on elävän puuston karikesyötettä vähäisempi.



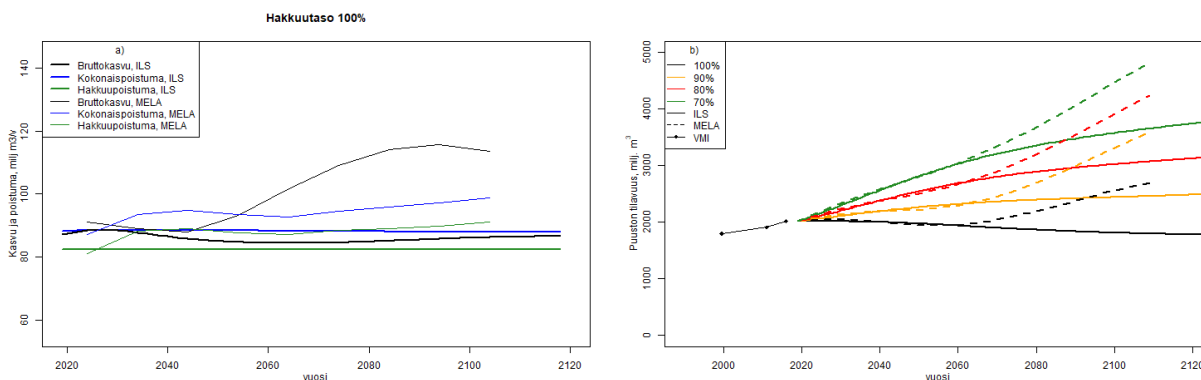
Kuva 2. Esimerkki biomassakertoimista ja niiden muutoksesta ajassa. Lehvästön biomassakertoimien muutos VMI10-VMI13.

3.4. MELA-ohjelmisto skenaariolaskennoissa

Lauri Mehtätalo, Annika Kangas, Hannu Hirvelä ja Harri Kilpeläinen

MELA-ohjelmistoa on viime vuosina hyödynnetty muun muassa useissa energia- ja ilmasto-suunnitelmien sekä maankäyttösektorin ilmastosuunnitelmien valmisteluun liittyvissä skenaariolaskelmissa (Aakkula ym. 2019, Koljonen ym. 2020, Maanavilja ym. 2021, Ollila ym. 2022, Silfver ym. 2024, Koljonen ym. 2024, Koljonen ym. 2025a, Koljonen ym. 2025b). Metsien skenaariolaskenta on näissä hankkeissa toteutettu MELA2016-ohjelmistoversiolla (Hirvelä ym. 2017), jota on täydennetty teknisillä kapasiteettilajennuksilla aikaisempaa laajempien laskentatarpeiden mahdollistamiseksi. Lisäksi HIISI-hankkeessa (Maanavilja ym. 2021) tarkistettiin kivennäismaiden metsien lannoitusmallin (Kukkola ja Saramäki 1983) toiminta ja lisättiin MELA-ohjelmistoon turvemaiden tuhkalannoitusmalli (Hökkä ym. 2012). Näitä metsien lannoitusmalleja on hyödynnetty myös HIISI-hankkeen jälkeen laadituissa skenaariolaskelmissa. Yllä mainittujen skenaariolaskelmien välillä on eroja metsänkäsittelyissä ja niiden intensiteetissä, mutta varsinaiset puuston kasvu- ja kehitysmallit sekä kasvutason kalibrointi ovat olleet samat kaikissa skenaarioissa viime vuosina. Lisäksi talouslaskennan perusteena käytetyissä aines- ja energiapuun kantohinnoissa sekä puunkorjuun ja metsänhoitotöiden yksikkökustannuksissa voi olla eroja skenaarioiden välillä.

Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportissa ”Suomen ja EU:n metsien kehitysskenaariot” (Vauhkonen 2024) tarkasteltiin Suomen rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsien kasvun ja hakkuumäärien yhteyttä ikäluokkasimulaattorilla, jossa simuloinnin pohjana olivat ositekohtaiset ikäluokkajakaumat ja kasvukäyrät (Mehtätalo ym. 2025). Vertailu MELA-laskelmien tuloksiin osoitti, että metsien alkutilanne ja hakkuumäärät olivat molemmilla tavoilla hyvin lähellä toisiaan, mutta noin 30 vuoden simuloinnin jälkeen MELA-laskelmat ennustivat puuston kasvuun lisäystä, jolle ei ole löydettävissä uskottavaa selitystä (Kuva 3). Havainnon pohjalta asiaa alettiin selvittää.



Kuva 3. Ikäluokkasimulaattorilla (ILS) ja MELA-ohjelmistolla arvioidut puuston vuotuiset tilavuuskasvut, kokonaispoistumat ja hakkuupoistumat puuntuotannon metsämaalla suurimmalla ylläpidettävissä olevalla hakkuutasolla (vas), sekä ikäluokkasimulaattorin ja MELA-ohjelmiston tuottamat runkokuun tilavuuden kehitysarviot eri hakkuutasoilla (oik). (Vauhkonen ym. 2024).

Kasvun yliarvion syyksi selvisi vuosikymmeniä käytössä ollut tapa tuottaa MELA-ohjelmiston laskentapuusto VMI-aineistoista. Menetelmässä laskentapuustona käytetään sellaisenaan kaikkia VMI:ssä mitattuja lukupuuta, ja laskentayksikkönä on metsikkökuvio. VMI-koelaloista n.

20 % osuu kuvion rajalle. MELA:n aineistonmuodostuksessa kaikki koealalle yltäneet metsikkökuviot tuottivat yhden laskentayksikön. Puustotietoja laskettaessa laskentayksikön hehtaarikohtaiset puustotunnukset (esim. pohjapinta-ala ja runkoluku) saadaan summaamalla kuviolta mitattujen lukupuiden edustamia tietoja. Pinta-alan laskennassa kuvio, jossa sijaitsee koealan keskipiste, sai painoksi koealan painon ja muiden ns. sivukuvioiden painona käytettiin arvoa 0, jolloin pinta-alat täsmäävät VMI:n tuloksiin. Samoin puuston kokonaismäärät ja hehtaarikohtaiset arvot aluetasolla (esim. kuvioiden pohjapinta-alojen summa) ovat täsmälleen samat kuin VMI-tulokset. Menetelmän vahvuutena voidaankin pitää sitä, että laskentapuusto vastasi lähtötilanteessa täsmälleen VMI:n tuloksena saatua puustoa.

Monelle kuviolle ulottuvien koealojen käsittely aiheutti kuitenkin kasvumallin toimintaan epäloogisuutta, koska metsikön tiheys vaikuttaa puiden väliseen kilpailun kuvaukseen. Jaetulta koealalta muodostetut laskentayksiköt näyttäytyivät kasvumallille harvempina kuin ne todellisuudessa ovat, joten niiden puuston määrän ennuste kasvoi ajan kuluessa epärealistisen suureksi. Ongelman paljastuttua vuoden 2024 lopulla Luonnonvarakeskuksessa päätettiin, että VMI13-tuloksiin perustuvat hakkuulaskelmat julkaistaan vasta sitten, kun MELA-ohjelmiston uusi aineistomuodostusmenetelmä on käytettävissä.

Uudessa aineistonmuodostusmenetelmässä laskenta-aineiston muodostamisessa hyödynnetään sekä VMI:ssä kuvioiden puusto-ositteille arvioituja keskitunnuksia (keskiläpimitta, pohjapinta-ala ja keskipituus) että lukupuiden mitattuja läpimittoja ja pituuksia. Koska vaadittava tietosisältö on käytettävissä vain VMI-koealojen keskipistekuviolta, laskenta-aineisto perustuu vain niihin. Metsikön puuston määrä ja keskitunnukset saadaan ensisijaisesti kuviotason mittauksista, mutta kokojakauman ja pituusikäyrän estimoinnissa hyödynnetään myös luku- ja koepuiden mittauksia. Koska metsikkötason mittaukset eivät ole täysin harhattomia, tulokset skaalataan maakunta- ja puulajitasolla niin, että maakunnan puiden pohjapinta-ala, keskipituus ja keskiläpimitta täsmäävät VMI-koealojen lukupuista estimoitujen harhattomien arvojen kanssa. Näin saatu puuston kuvaus vastaa maakuntatasolla VMI:ssä mitattujen puiden rakennetta, ja lisäksi jokaisella laskentayksiköllä on lähes maastossa arvioidun kaltainen puusto. Tarkemmin menetelmä on kuvattu käsikirjoituksessa Mehtätalo ym. (2026).

Vanha aineistonmuodostusmenetelmä oli ongelmallinen myös pienten puiden kuvauksen kanssa. VMI-koealoilta luettujen pienten puiden edustama hehtaarikohtainen runkoluku voi olla todella suuri. Näidenkin arvio aluetasolla on harhaton, mutta kaikki Suomen pieniläpimittaiset puut keskittyvät harvoille koealoille. Vanhassa menetelmässä tämä ongelma oli ratkaistu rajoittamalla kuviotason runkolukuja ja pakottamalla MELA-laskelmissa taimikoille taimikonhoito aina, kun se oli puustotietojen perusteella mahdollinen. Uudessa aineistonmuodostusmenetelmässä runkolukuja ei rajoiteta.

Uuteen aineistonmuodostusmenetelmään ja VMI13-aineistoon perustuvat hakkuulaskelmat julkaistaan niiden valmistuttua MELA-tulospalvelussa. Samassa yhteydessä julkaistaan myös vanhaan aineistonmuodostusmenetelmään perustuva vertailulaskelma. Lisäksi julkaistaan Luonnonvarakeskuksen strategisen hankkeen "Hakkuulaskelmien monipuolistaminen" tuloksena suurimman ylläpidettävissä olevan hakkuukertymän arvioita myös muilla korkokannoilla kuin aiemmin käytetyllä 4 % korolla. Tavanomainen 4 % korkokanta on perusteltu siksi, että sen ajatellaan vastaavan sitä, miten tavanomainen kohtuullista taloudellista tuottoa tavoitteleva metsänomistaja toimii. Alhaisemmat korkokannat on otettu mukaan laskelmiin siksi, että esimerkiksi ekosysteemipalveluiden ja hiilimarkkinoiden kehittyminen voisi tulevaisuudessa tuottaa metsänomistajalle lisätuloja, joiden saaminen edellyttää pidempiä kiertoaikoja ja/tai

korkeampaa puuston kasvatustiheyttä, mikä tarkoittaa alhaisempaa metsään sidotun pääoman tuottoa puhtaasti puuntuotannon tulovirtojen kautta tarkasteltuna.

Alhaisempien korkokantojen laskelmien loogisen toimivuuden vuoksi simulointikautta pidenttiin 50 vuodesta 130 vuoteen. Kausi koostuu viidestä kymmenvuotiskaudesta ja niitä seuraavista neljästä kaksikymmenvuotiskaudesta. Tämä on maksimimäärä laskentakausia, joka nykyisellä MELA-ohjelmistolla voidaan toteuttaa. Tulokset raportoidaan kuitenkin vain kolmelle ensimmäiselle kymmenvuotiskaudelle; myöhemmät kaudet ovat laskelmassa siksi, että puuston tila laskentakauden lopussa aiheuttaa mahdollisimman vähän heijastevaikutuksia kolmelle ensimmäiselle kaudelle. Nämä heijastevaikutukset syntyvät esimerkiksi MELAn optimointitehtävän muotoilun ja pitkien kiertoaikojen kautta.

Laskenta-ajan pidennys vaikuttaa erityisesti alhaisemmilla korkokannoilla saatujen hakkuukertymien kehitykseen ajassa: liian lyhyellä laskentajaksolla hakkuukertymät jäävät pysyvästi alhaiselle tasolle, mikä ei ole loogista, ja laskentakauden pidentäminen nosti niitä. Todellisuudessa hakkuupoistuman tulisi korkokannasta riippumatta jossain vaiheessa nousta tasolle, joka vastaa talousmetsien kasvun ja luonnonpoistuman erotusta. Koska metsien kasvu on sitä suurempi mitä alhaisempaa korkokantaa käytetään ja laskelmien mukaan luonnonpoistuma ei korkovaatimusta alennettaessa lisääny yhtä paljon kuin kasvu nousee, tulisi pitkän aikavälin hakkuumahdollisuuksien myös pitkällä aikavälillä olla suurimmillaan alhaisinta korkovaatimusta käytettäessä. Tämä ei laskelmissa käytetyllä suunnittelukauden pituudellakaan täysin toteudu. Siksi alhaisimmilla korkokannoilla lasketuissa tuloksissa myös käytetty 130 vuoden simulointikausi on liian lyhyt ja hakkuumäärät ovat luultavasti aliarvioita.

3.5. Biomassamallit ja -kertoimet skenaariolaskennoissa

Annika Kangas, Hannu Hirvelä ja Harri Kilpeläinen

Skenaariolaskennan osalta toinen merkittävä muutos hiilinielujen laskennassa on se, että MELA-ohjelmistolla aiemmin Repolan (2008, 2009) kahden selittäjän biomassamalleilla ja varastonmuutosmenetelmällä lasketusta puuston hiilinieluarviosta siirryttiin KEITO-hankkeessa (Koljonen ym. 2025a) soveltamaan samaa kasvu-poistumamenetelmää ja samoja biomassakertoimia kuin KHKI-laskennassa. Lisäksi maaperän kasvihuonekaasujen laskennassa on tapahtunut muutoksia sekä KEITO-hankkeessa että sitä aikaisemmassa PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024). Varastonmuutosmenetelmä (puuston hiilivaraston erotus kahden eri ajanhetken välillä) ja kasvu-poistumamenetelmä (puuston kasvun ja poistuman erotus) antavat saman tuloksen puuston hiilinieluille silloin, kun puusto ja käytetyt biomassakertoimet menetelmissä ovat täysin identtiset (Taulukko 2). Muussa tapauksessa menetelmät voivat tuottaa erilaiset tulokset. Kasvu-poistumamenetelmän sekä yhtenevien biomassakerrointen käyttöön siirryttiin KHK-inventaarion sekä skenaarioiden yhteensopivuuden ja sitä kautta myös laskelmien tulkittavuuden ja käyttökelpoisuuden parantamiseksi.

Aikaisemmissa skenaarioanalyysissä on selvitetty, miten suuri merkitys puuston hiilinieluarvioiden laskennan muutoksella on ollut. MALUSEPO-hankkeessa (Koljonen ym. 2020) todettiin, että ero on merkittävä ja että esimerkiksi vuoden 2020 osalta KHK-inventaarion biomassakertoimien käyttö tarkoitti 11 Mt CO₂-ekv:n eli noin 36 % pudotusta hiilinieluissa verrattuna Melan sisäisillä biomassakertoimilla saatuihin arvioihin (Taulukko 2).

Biomassakertoimet vaihtelevat puuston rakenteen mukaan. Siten esimerkiksi keskimääräisiin hakkuupoistuman kertoimiin vaikuttavat toteutunut hakkuiden kohdentuminen (kuten energiapuuhakkuiden ja harvennusten osuus kaikista hakkuista). Koska nykyisin skenaarioissa sovelletaan vakiokertoimia, tämän vaihtelun merkitys oli tarpeen selvittää.

Taulukko 2. Puuston hiilinielut MALUSEPO WEM-skenaariossa laskettuna varastonmuutosmenetelmällä ja kahdella eri tavalla kasvu-poistumamenetelmällä, Mt CO₂-ekv. Koljonen ym. (2020). MELA-ohjelmistolla kasvu- ja poistumamenetelmällä saadut biomassakertoimet tuottavat saman hiilinielun kuin varastonmuutosmenetelmällä, mutta selvästi poikkeavan kuin KHK:n biomassakertoimilla saatu.

	2020	2030	2035	2040	2050
MALUSEPO-WEM (varastonmuutos MELA-aineistosta lasketuilla biomassakertoimilla)	-30,64	-25,00	-26,66	-28,01	-34,43
MALUSEPO-WEM (kasvu-poistuma MELA-aineistosta lasketuilla biomassakertoimilla)	-30,64	-25,00	-26,66	-28,01	-34,43
MALUSEPO-WEM (kasvu-poistuma KHK-inventaarion biomassakertoimilla)	-19,47	-13,78	-15,40	-16,73	-24,09

3.6. Maaperän hiili skenaariolaskennoissa

Annika Kangas, Harri Kilpeläinen ja Hannu Hirvelä

PEIKKO-hankkeessa (Koljonen ym. 2024) maaperän kasvihuonekaasujen laskennassa siirryttiin Alm ym. (2023) julkaisussa kuvattuun laskentamenetelmään, jolla on huomattava vaikutus turvemaiden kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistumien laskentaan. Uusi laskentamenetelmä oli käytössä myös KEITO-hankkeessa (Koljonen ym. 2025a, Koljonen ym. 2025b). Toinen merkittävä muutos KEITO-hankkeen skenaariolaskennassa oli se, että maaperän kasvihuonekaasujen laskennassa skenaariovuosille ei enää käytetä 30 viime vuoden lämpötilakeskiarvoa, vaan 10 viime vuoden keskiarvoa. Trendinomaisesti lämpenevässä ilmastossa 30 viime vuoden keskiarvo tuottaa tulevaisuuden skenaariovuosille epätodennäköisen alhaisen lämpötilaennusteen. Muutoksen tavoitteena oli siis tuottaa aiempaa realistisempia arvioita.

4. Vertailu muihin laskentatapoihin

4.1. Suomen kasvihuonekaasulaskennan erot verrattuna NASA:n tekemiin satelliittimittauksiin

Annika Kangas

Eräs mahdollisuus seurata kasvihuonekaasupäästöjen kehittymistä on tehdä pitoisuusmittauksia suoraan ilmakehästä. Mittauksia voidaan tehdä esimerkiksi maan pinnalla olevista mittaustorneista (esim. Suomessa Sodankylän mittausasema) tai satelliittien avulla. Hiilinielujen monitoroinnissa käytettävä OCO-2 satelliitti mittaa valon tiettyjen aallonpituuksien imeytymistä ilmakehän hiilimolekyyleihin, ja tämän perusteella laskee hiilidioksidin määrän ilmakehässä. Alueelliset CO₂ päästöt/nielut johdetaan edelleen ilmakehän pitoisuusmittauksista (tornit, satelliitit) ns. inversiomalleilla hyödyntäen ilmakehämalleilla ja säähavainnoilla saatua tietoa ilmavirtauksista (esim. Byrne ym. 2022). Monilla tutkimusryhmillä on olemassa oma mallinsa, ja esimerkiksi Byrne ym. (2022) julkaisussa on raportoitu eri tutkimusryhmien tulosten mediaani. Julkaisun tulokset on laskettu viidestä eri aineistosta / aineistoyhdistelmästä.

Satelliittimittauksiin perustuvissa päästö/nieluarvioissa on runsaasti vuosien ja alueiden välistä vaihtelua esimerkiksi sään vaihtelujen takia. KHK-inventaariossa lyhytaikaisen (esim. vuosien välisen) säävaihtelun vaikutus pyritään häivyttämään, sillä ensisijaisena tarkoituksena on tarkastella KHK-taseiden keskinäisiä suuruusluokkia ja pitkäaikaismuutoksia. Esimerkiksi Yasso07 mallin (Rantakari ym. 2012) syötteenä ovat joko vuosittaiset tai kuukausittaiset keskilämpötilat, ja turvemaamallin syötteenä touko-lokakuun edeltävän 30 vuoden liukuva keskiarvo (Alm ym. 2023). Vastaavasti puuston kasvu ja luonnonpoistuma arvioidaan VMI-mittausten perusteella, ja se kuvaa viiden vuoden keskiarvoa.

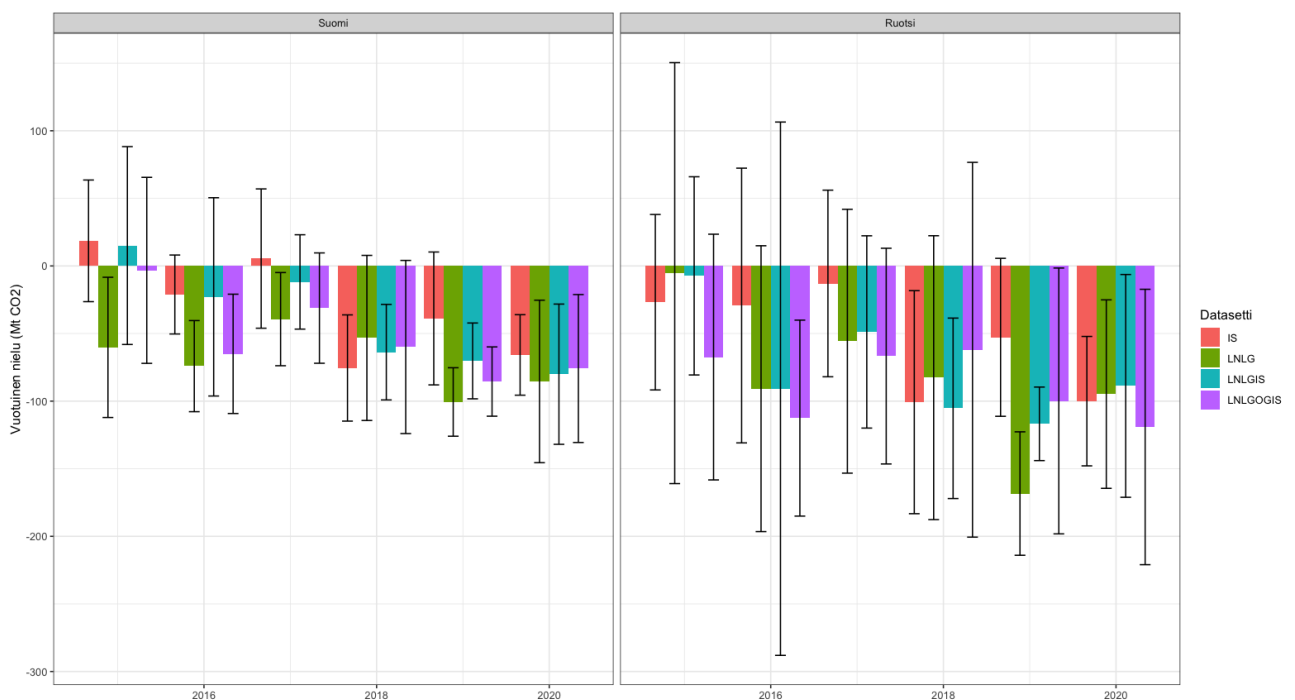
Byrne ym. (2022) julkaisussa käsitellään pelkästään hiilidioksidia (CO₂), vaikkakin vastaavia analyysejä voidaan tehdä myös muista kasvihuonekaasuista, kuten metaanista (Worden ym. 2022). Verrattuna IPCC:n (IPCC 2006) ohjeiden mukaiseen KHK-inventaariolaskentaan pelkkä hiilidioksidin huomioiminen tarkoittaa, etteivät laskelmat ole suoraan vertailukelpoisia. Toinen suuri ero verrattuna IPCC:n ohjeiden mukaiseen LULUCF-sektorin päästölaskentaan on, että IPCC:n ohjeiden mukaan huomioidaan vain ihmisen vaikutuksen alaiset maa-alueet. Siten esimerkiksi ojittamattomat suot (joita on noin 5 miljoonaa hehtaaria) tai luontaiset vesialueet (joita on noin 10 % maapinta-alasta) eivät kuulu laskennan piiriin, mutta ne tyypillisesti huomioidaan satelliittimittauksiin perustuvissa analyyseissä. Toisaalta monissa maissa IPCC:n ohjeiden mukaisen laskutavan ulkopuolella ovat myös suojellut metsät, mutta Suomessa ne ovat KHK-inventaariossa mukana.

Kolmas merkittävä ero ilmakehämittauksiin perustuvissa arvioissa (mm. Byrne ym. 2022) ja IPCC:n ohjeiden mukaisissa laskennoissa on, että ensin mainitut huomioivat myös hiilen lateeraalisen liikkeen, eli puun ja puutuotteiden kansainvälisen kaupan. IPCC:n ohjeiden mukaisesti puuston hakkuu lasketaan välittömästi päästökseen Suomessa, ja puusta tuotettujen hyödykkeiden hajoaminen on myös laskennallisesti Suomen päästö. Sen sijaan NASA:n analyyseissä hiilen tuonti ja vienti (rehu, ruoka, puu, puutuotteet) huomioidaan kauppatilastojen mukaisesti (Deng ym. 2022). Siten IPCC:n mukaisessa laskennassa hakkuiden lisääntyminen tarkoittaa aina päästöjen kasvua, mutta NASA:n laskelmissa lisääntyneet hakkuut voivat lisätä hiilen

nettovientiä, jolloin päästöt laskevat. NASA:n laskelmissa huomioidaan myös jokien mereen tai järveen kuljettama hiili.

Ilmakehämittauksista ei ole suoraan mahdollista erotella fossiilisen energian polttamisen tuottamia päästöjä maankäyttösektorin päästöistä, vaan ne erotellaan olettamalla, että fossiilienergian tuottamista päästöistä on olemassa virheetön tai epävarmuudeltaan pieni alueellinen ja ajallinen jakauma (Oda ym. 2019). Kartta tuotetaan jakamalla kansallisen tason tilastot päästöistä esimerkiksi 1 km · 1 km ruutuihin mallien avulla. Tällaisissa malleissa selittäjinä voi olla esimerkiksi alueen asukasmäärä, alueen yöllinen valaistus, ja mallien epävarmuudet ovat suuria. Myös tuonti ja vienti jaetaan 1° · 1° ruutuihin, ja myös niiden sijainnissa on epävarmuuksia.

Onkin huomattavaa, että sekä Suomessa että Ruotsissa ilmakehän pitoisuusmittauksiin ja inversiomallinnukseen perustuva trendi on eri suuntainen kuin IPCC:n ohjeiden mukaisesti laskettu trendi (Kuva 4). NASAn tulosten mukaan sekä Suomen että Ruotsin maankäyttösektori ovat vuonna 2015 voineet jo olla päästölähteitä, koska laskentaan liittyvien epävarmuuksien seurauksena tulosten luottamusväli sisältää myös nollakohtan. Tällöin ei ole mahdollista varmasti edes sanoa, onko tarkasteltava maa ollut päästö vai nielu. Nämä tulokset perustuvat uusimpiin julkaistuihin tuloksiin, mutta uudempi analyysi on tulossa. Uusimpien tulosten mukaan satelliittimittauksissakaan Suomen nielu ei enää olisi kasvava (Kielo Isomäki, pers. komm.).



Kuva 4. Ilmakehän pitoisuusmittauksiin ja inversiolaskentaan perustuva nielu- ja päästöarvio Suomelle ja Ruotsille. Kuvassa on neljä eri aineistoa (IS = maasta käsin tehdyt havainnot, LNGL = satelliittimittaukset maan päältä, LNGLIS = molemmat edellä mainitut, LNGLGOIS = edellä mainittujen lisäksi myös satelliittimittaukset meren päältä), ja pylväskuvina vuotuinen nielu eri aineistoihin perustuen Suomessa ja Ruotsissa (Byrne ym. 2022). Musta pystyviiva kuvaa tuloksen luottamusväliä. Negatiiviset arvot kuvaavat nieluja, positiiviset päästöjä.

Käytettyjen eri inversiomallien väliset erot, ilmakehämittausten alueellinen resoluutio ja satelliittimittausten ajallinen kattavuus (esim. pilvisen tilanteet, talviaika) ovat myös huomattavia epävarmuuden lähteitä. Byrne ym. (2022) itse suosittelivat mallinsa soveltamista mantereen kokoisilla alueilla. Mikäli maakohtaisia tuloksia lasketaan, tarkasteltavien maiden suositellaan olevan vähintään Ranskan tai Espanjan kokoisia.

Ilmakehän CO₂ ja metaanin pitoisuusmittauksiin perustuva inversiolaskenta on periaatteessa menetelmällisesti yhdenmukainen tapa arvioida eri maiden päästöjä/nieluja. Menetelmien epävarmuudet ovat kuitenkin yhä varsin suuria eivätkä tulokset mahdollista eri maankäyttömuotojen ja päästölähteiden erottamista samalla tavoin kuin IPCC:n ohjeiden mukaisessa laskennassa. Tämä rajoittaa niiden käyttöä esim. poliittisten ohjauskeinojen vaikutusten kvantifiointissa. Laskennassa ei ole myöskään mahdollista erotella ihmisen toiminnasta aiheutuvia päästöjä luontaisista päästöistä.

4.2. Globaalit ekosysteemitason mallit

Annika Kangas

On olemassa myös useita globaaleja ekosysteemimalleja, joilla on tehty hiilinielulaskelmia. Vertailuissa on todettu, että esimerkiksi Suomen osalta KHK:n raportoimat hiilitaseet ja niiden ajallinen muutos on jossain määrin yhteensopiva em. ekosysteemimallien tuottaman keskimääräisen arvion kanssa (ns. TRENDY – ensemble; Trends in net land-atmosphere carbon exchanges). Ekosysteemimallien väliset erot ovat kuitenkin merkittäviä, ja epävarmuudet suuria, joten eroista ei voi vetää pitkälle meneviä johtopäätöksiä (Isomäki ym. 2024). Myös esimerkiksi Grassi ym. (2023) raportoivat, että kansallisten KHK-inventaarien ja globaalien keskiarvomallin välillä oli noin 6.7 Gt CO₂/v ero: kun kansallisissa inventaareissa tulos oli -1.9 Gt CO₂ nielu, keskiarvomallin mukaan tulos oli 4.8 Gt CO₂ päästö. Ero selittyi esimerkiksi erilaisilla määritelmillä siitä, mikä on ihmistoiminnan vaikutuksen piirissä olevaa eli hoidettua metsää ja mikä ei. Sekä satelliitti että inversiomittaukset soveltuvat parhaiten globaaliin tarkasteluun kasvihuonekaasupäästöistä, ja ne ovat käyttökelpoisia esim. IPCC raporttien tausta-aineistoina.

Metsien hiilitaseita voidaan arvioida myös suoran kaasuvuomittauksin eddy covariance -torneilla. Suomessa torneja on tällä hetkellä noin nelisenkymmentä, joista metsissä alle 15. Nykyinen verkosto on riittämätön kattamaan mm. kasvupaikkaan, ilmastoon, puulajeihin ja metsänhoitotapoihin liittyvää merkittävää vaihtelua. Mastoja siis tarvittaisiin spatiaalisen vaihtelun kattamiseen paljon, mutta niiden rakentaminen ja ylläpito on kallista. Datan hyödyntäminen kansallisen hiilinielun arviointiin vaatii merkittävää lisätutkimusta ja menetelmäkehitystä. Eddy-covariance tornit tuottavat tietoa koko metsäekosysteemin hiilitaseesta, jolloin esimerkiksi puuston ja maaperän hiilinielun erottamiseen tarvitaan joko empiirisiä tai prosessimalleja.

4.3. Suomen kasvihuonelaskennan erot Ruotsin vastaavaan laskentaan

Annika Kangas

Ruotsissa maaperän hiilitase perustuu kivennäismaiden osalta mittauksiin. Mittauksia on tehty VMI:n yhteydessä 10 vuoden syklillä. Ensimmäinen maaperäinventointi tehtiin Ruotsissa jo 1980-luvulla, ja tällä hetkellä on menossa viides maaperäinventointi. Vuosittain mitataan noin 11 000 koealaa, joista noin 4 500 on kivennäismailla. Maaperästä mitataan pintakerros, joka sisältää esimerkiksi lehti- ja neulaskarikkeen lukuun ottamatta mittaavuonna syntyneitä karketta. Pintakerroksen alta näytteitä otetaan kolmelta eri syvyydeltä.

Yksittäisen koealan osalta käytetään hiilinielun estimaattina kahden mittauskerran välistä erotusta. Mikäli koeala esimerkiksi on mitattu vuosina 2012 ja 2022, vuosittainen muutos saadaan jakamalla mittausten erotus tasan eri vuosille. Mikäli koealaa ei ole mitattu ennen vuotta 2012, tai vuoden 2022 jälkeen, käytetään samaa arvoa myös aiemmille/myöhemmille vuosille. Jos koeala on mitattu kolme kertaa, estimoitu muutos on havaitun kahden muutoksen painotettu keskiarvo (NIR Se submission 2024 Annex, s. 127). Mittauksia siis ekstrapoloidaan sekä taakse- että eteenpäin, ja siten yksittäisen koealan mittaustulos säilyy vakiona vuosia, ja muutoksia tapahtuu vain, kun koealalle tehdään uusi mittaus.

Koko maan muutos maaperän hiilitaseessa saadaan laskemalla kaikkien mitattujen koealojen hiilivaraston muutoksen keskiarvo. Koska vain kymmenesosa koealoista mitataan vuosittain, koko maan tulos muuttuu suhteellisen hitaasti. Raportoitu maaperän hiilinielu saadaan tasoitamalla yksittäisten vuosien aikasarja vielä regressiomallilla, jolloin saatu muutos on koko vuodesta 1990 alkavan mittaussarjan keskimääräinen trendi. Siitä huolimatta yksittäisen mittaavuoden lisäys aikasarjaan aiheuttaa ajoittain suuriakin muutoksia hiilinieluihin. Tämä johtuu siitä, että maaperämittaukset sisältävät paljon otannasta johtuvaa satunnaisvaihtelua. Ruotsin maaperähiilinielujen arviot ovat siis voimakkaasti ajallisesti keskiarvoistettuja, kun taas Suomessa on kuvattu viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa. Jos Suomen tuloksia keskiarvoistettaisiin yhtä paljon kuin Ruotsissa, Suomen tulokset olisivat lähempänä Ruotsin tuloksia: pitkän ajan trendin raportoiminen poistaisi sekä nielujen että päästöjen huippukohtat.

Turvemailla valtaosa maaperästä on orgaanista ja toistettujen maaperänäytteiden tuloksista ei voida arvioida varaston ajallista muutosta. Ruotsi soveltaa ojitettujen turvemaiden maaperäpäästöjen laskennassa ajassa muuttumattomia Tier-1 kertoimia (IPCC 2013 Wetlands Supplement), jolloin turvemaiden vuotuisiin päästöihin vaikuttaa ainoastaan turvemaiden pinta-ala. EU kuitenkin edellyttää, että Tier 1 malleista siirrytään Tier 2 tai 3 tasolle tulevaisuudessa. Suomessakin olisi voitu tähän saakka käyttää vastaavaa mallia, mutta tällöin päästöt olisivat koko tarkastelukauden olleet likimain nykyisellä, korkealla tasolla (ks. Kuva 11).

Kuolleet puut, puumainen karike ja kannot mitataan VMI:hin pohjautuen varastonmuutosmenetelmällä. Ruotsissa oksien karkkeen laskemiseksi ei ole olemassa samanlaisia kertoimia kuin Suomessa, vaan laskenta perustuu asiantuntija-arvioon (NIR Se submission 2024 Annex, s. 123). Suurten oksien biomassan on Ruotsissa arvioitu olevan noin 15 % kuolleen puun määrästä. Kuolleeseen puuhun lasketaan Ruotsissa kaatuneet puut, pötkelöt, kannot ja juuret 2 mm läpimittaan saakka. Kaatuneilla puilla pitäisi olla vähintään 100 mm läpimitta ja niiden pituuden vähintään 1,3 metriä. Pienemmät kappaleet, joissa läpimitta on välillä 10–100 mm, lasketaan kuuluvaksi karkeaan karkkeeseen.

Taulukko 3. Lahoasteluokat Ruotsin VMI:ssä.

Lahoaste-luokka	Luokkien selitykset
0	Tuore kuollut puu. Puut ovat äskettäin kuolleet, eivätkä ole vielä kuivuneet.
1	Kiinteä kuollut puu. Rungon tilavuudesta enemmän kuin 90 % on kiinteää puuta, ja rungolla on kova ulkokuori. Puuaine on vähäisessä määrin hajottajaorganismien vaikutuksen alainen.
2	Osittain lahonnut puu. Rungon tilavuudesta noin 10–25 % on pehmeää, mutta loppu on kiinteää.
3	Lahonnut puu. Rungon tilavuudesta 26–75 % on pehmeää tai erittäin pehmeää.
4	Erittäin lahonnut puu. Rungon tilavuudesta 76–100 % on pehmeää tai hyvin pehmeää. Työkalu (kuten veitsi) voidaan työntää kappaleen läpi. Puussa voi kuitenkin olla kiinteä ydinosa.

Maanpäällinen kuollut puu muutetaan hiileksi lahoasteluokittain. Ruotsin VMI:ssä lahoppuut luokitellaan eri lahoasteisiin (Taulukko 3, Sandström ym. 2007). Kullekin luokalle on mitatuista aineistoista tuotettu keskimääräinen puuaineen tiheys ja sille epävarmuus. Epävarmuutta laskelmiin aiheutuu muun muassa siitä, että lahoasteluokitus, vaikkakin se perustuu maastossa tehtyihin arvioihin, on sinänsä epävarma. Kunkin luokan sisällä voi olla suurta vaihtelua lahoasteessa. Lisäksi lahoaste voi esimerkiksi vaihdella eri rungon osissa (Didion ym. 2014). Tässä lähestymistavassa yksittäisen kuolleen puun hiilen määrä laskee portaittain, kun puu siirtyy lahoasteelta seuraavalle asteelle. Esimerkiksi männyn puuaineen tiheys lahoasteluokittain on kuvattu taulukossa 4 (Sandström ym. 2007).

Taulukko 4. Puuaineen tiheys lahoasteluokittain Ruotsin VMI:ssä.

	Tiheys, kaikki männyt		Tiheys, talousmetsien männyt		Tiheys, suojelualueitten männyt	
0	0.3343	(0.009)	0.3360	(0.008)	0.3273	(0.029)
1	0.3078	(0.005)	0.3128	(0.006)	0.2812	(0.011)
2	0.2502	(0.006)	0.2521	(0.006)	0.2434	(0.015)
3	0.2287	(0.007)	0.2226	(0.008)	0.2685	(0.013)
4	0.1687	(0.008)	0.1577	(0.009)	0.2077	(0.012)
Yhteensä	0.2389	(0.004)	0.2384	(0.004)	0.2411	(0.011)

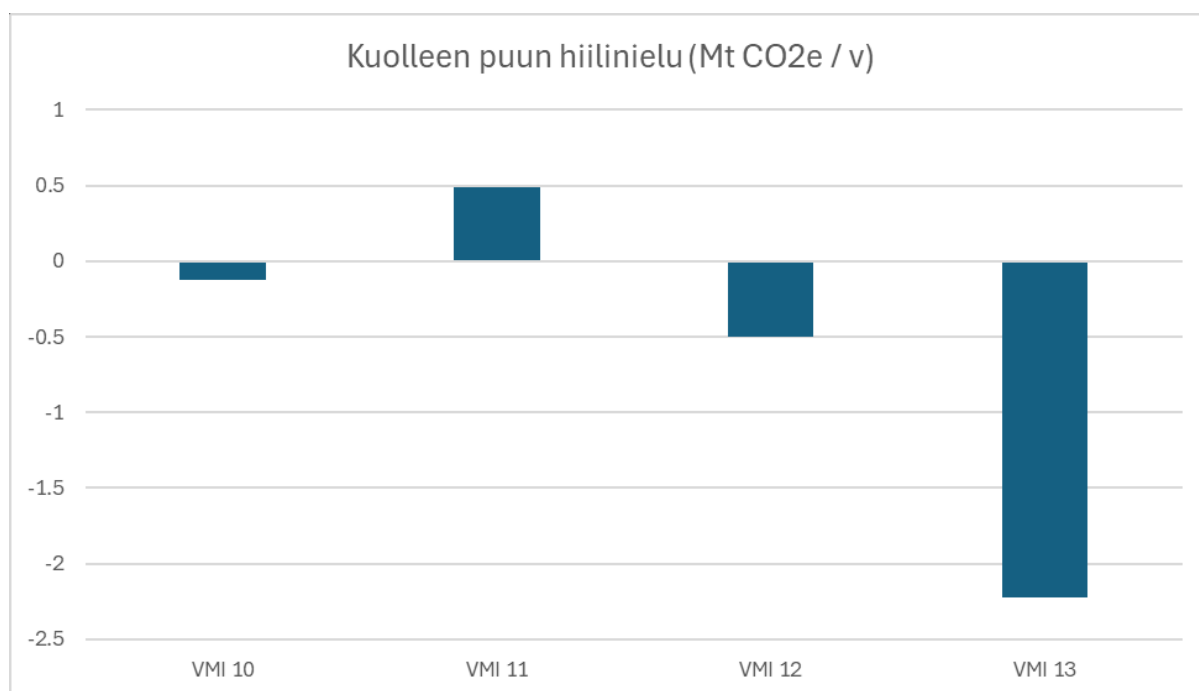
Pienemmille karikkeille, joita vuosittain putoaa elävästä puustosta (lehdet ja neulaset ja < 2 mm juuret) sen sijaan on olemassa empiirinen malli (Berg ym. 1999a, 1999b). Tämä pienempi karike on mukana vuosittaisessa raportissa, mutta sitä ei käytetä lähtötietona maaperämallille, kuten Suomessa tehdään. Oletus on, että tämä vuotuinen karike on putoamisvuoden jälkeen osa maaperän hiilivarastoa, joka mitataan maaperämittauksissa.

Hakkuupoistuma lasketaan epäsuorasti VMI:n koalamittauksista laskemalla ensin puuston tilavuuden kasvu, muuntamalla se hiileksi, ja vähentämällä lopputuloksesta elävän puuston hiilivaraston muutos (NIR Se submission 2024 Annex, s. 121). Koska VMI:n mittaukset tehdään viiden vuoden välein, vuotuiset hakkuupoistuman muutokset eivät näy tuloksissa toisin kuin Suomessa, vaan ne ovat jakson keskimääräiset hakkuut. Hakkuutähteitä ei erikseen arvioida, kuten Suomessa, vaan niiden arvioidaan sisältyvän aiemmin mainittuihin karikkeen estimaatteihin (maaperämittausten karike, karkea karike, vuotuinen pienen karikkeen kertymä). Hakkuupoistuman tilavuuden perusteella ennustetaan edelleen maanalainen juuribiomassa

biomassakertoimilla, jotka saadaan valtakunnan metsien inventoinnin koepuiden tilavuuksien ja biomassojen perusteella (Peterson & Ståhl 2006, Marklund 1988). Yhtä maanpäällisen rungonosan kuutiometriä kohden oletetaan olevan 184 kiloa juurten ja kantojen kuivamassaa (NIR Se submission 2024 Annex, s.121). Kantojen ja juurten hajoaminen ajassa ennustetaan Melin ym. (2009) malleilla.

Kuollut puu on Ruotsin NIR-raportin mukaan lisääntynyt laskenta-aikana vuoden 1990 tasosta nykypäivään noin 133 %, ja siten myös suurten oksien oletettu karikesyöte maaperään on vastaavasti kasvanut. Vastaavasti Suomessa karikesyöte on biomassan funktio, ja kun biomassakertoimet ovat pienentyneet, myös karikesyöte on pienentynyt. Tämä ero voi osaltaan myös selittää eroja hiilinieluarvioissa Suomen ja Ruotsin välillä.

Suomen käyttämässä mallinnuslähestymistavassa lahoaminen on jatkuva prosessi. Mallinnuslähestymistavassa on mahdollista, että malli ennustaa kappaleiden lahoavan todellista nopeammin tai hitaammin, riippuen vallitsevista olosuhteista (esimerkiksi makaako runko maata vasten tai ei, ja onko kasvupaikka kostea vai ei), koska Yasso07 ei ota huomioon tällaisia olosuhde-eroja. Tämä selittänee myös sen, että empiirisessä testissä pystykuolleiden puiden hajoamisnopeus oli yliarvioitu, mutta kuolleiden maapuiden ei (Didion ym. 2014). Lisäksi Yassoon syötetään kuollut puu jakeittain (hieno: lehdet ja hienoituuret ja karkea: oksat, rungot, kannot ja karkeat juuret), jolloin malli ei huomioi jakeen sisäistä vaihtelua esimerkiksi kappaleiden koossa, vaikka on tiedossa, että läpimitaltaan suuret kappaleet lahoavat hitaammin kuin pienet.



Kuva 5. Kuolleisiin puihin sitoutuneen hiilen määrän muutos VMI:ssä, kun kaikkien puiden lahoaste oletetaan yhtä suureksi.

Koska Yasso07 juuri suurimpien karikeositteiden osalta sisältää suuria epävarmuuksia, osa hiilinieluarvioiden erosta voi selittyä sillä, että Suomessa on kuolleille puille käytössä malli, ja Ruotsissa varastonmuutos menetelmä. Jos Suomessakin siirryttäisiin suurempien karikeositteiden osalta Ruotsin malliin, VMI:ssä havaittu kuolleen puun tilavuuden kasvu (Korhonen ym.

2024) indikoisi tämän ositteen osalta selkeää nielua, mikäli oletetaan, että lahoaste on kaikilla puilla sama (Kuva 5). Tällaisen laskentatavan käyttöönotto edellyttäisi, että kuolleen puun hiilivaraston muutosta seurattaisiin Ruotsin tapaan lahoasteluokituksen ja kunkin luokan keskimääräisen hiilisisällön mukaan. Tällä hetkellä tätä mitattua lahopuuvarastoa ei huomioida laskennassa mitenkään, mutta menetelmäkehitys lahopuuvaraston huomioimiseksi on käynnissä. Toisin sanoen, kullakin mittaushetkellä havaittu uusi luonnonpoistuma menee Yasso07-mallin syötteeksi, mutta maastossa pidempään säilyvää lahopuuvarastoa ei erikseen huomioida. Niiden huomioiminen vaatii uuden menetelmän kehittämistä.

4.4. Maaperän hiilitaseiden epävarmuusanalyysit

Juha Heikkinen

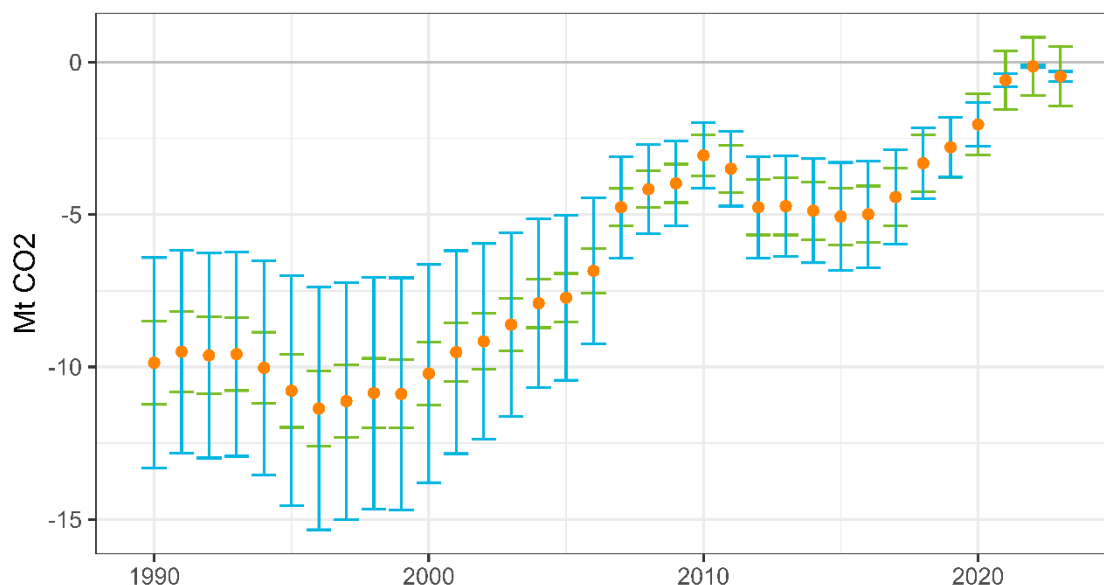
Osana kasvihuonekaasuinventaariota on raportoitu elävän puuston sekä kivennäismaametsien ja metsäojitettujen turvemaiden maaperän hiilitasearvioiden epävarmuudet perusvuoden 1990 ja viimeisimmän raportointivuoden osalta. Arvioissa onoitu ottaa huomioon maaperämallien parametreihin ja karikesyötteeseen liittyvät epävarmuudet.

Epävarmuuden mittarina käytetään IPCC:n ohjeistuksen (IPCC 2006, vol. 1, luku 3) mukaista suuretta

$$U = \frac{100 (D/2)}{|X|},$$

missä X on tasearvio ja D sen 95 %:n luottamusvälin pituus. Kivennäismaiden osalta on vuodesta 2014 lähtien raportoitu sama suhteellinen epävarmuus, 31,5 %, mikä on perustunut julkaisussa Lehtonen & Heikkinen (2016) esitettyihin, ensimmäistä Kioto-kautta 2008–2012 koskeviin epävarmuusanalyysihin. Kivennäismaiden maaperän nielut olivat tuolla jaksolla viimeisimmän inventaarion mukaan välillä 3,2–4,9 Mt CO₂ ja 31,5 %:n epävarmuusarvion voi olettaa riittävän hyväksi niiden vuosien osalta, joina nielut olivat samaa suuruusluokkaa (2007–2017), ja pessimistiseksi (epävarmuutta yliarvioiviksi) niiden osalta, joina nielut olivat suurempia (1990–2006). Vuodesta 2018 lähtien nettotaseen arviot ovat kuitenkin olleet niin lähellä nol-laa, että suhteellinen epävarmuus on väistämättä suurempi.

Lehtosen ja Heikkisen (2016) epävarmuusanalyysi on tässä hankkeessa päivitetty käyttäen vuoteen 2023 saakka ulottuvia aineistoja (Liite A). Tämän uuden analyysin mukaan nettotaseen 95 %:n luottamusväli sisältää arvon 0 vuosina 2021–2023 (Kuva 6). Toisin sanoen, vuoteen 2020 saakka kivennäismaiden maaperätase on näiden tulosten perusteella ollut tilastollisesti merkitsevästi nielun puolella, mutta vuosien 2021–2023 taseet eivät poikkeakaan nollasta tilastollisesti merkitsevästi. Uutta epävarmuusanalyysimenetelmää on sovellettu myös maaperämallien vertailuissa (Kuvat 7–10).



Kuva 6. Kivennäismaametsien maaperän hiilitasearviot ja niihin liittyvät 95 %:n luottamusvälit perustuen päivitettyihin epävarmuusanalyysihin (vihreät janat) ja vuodesta 2014 lähtien raportoituun 31,5 %:n vakioepävarmuuteen (turkoosit janat). Tulokset perustuvat uusiin biomassamalleihin.

Ojitettujen turvemaiden hiilitaseeseen liittyvästä epävarmuudesta on tehty perusteelliset arviot vuosille 1990–2021 (Alm ym. 2023, liite A). Tasearvion luottamusvälin pituus on koko tuon jakson ajan ollut samaa suuruusluokkaa (Alm ym. 2023, kuva A1). Vuodelle 2021 arvioitiin 8,0 Mt CO₂:n nettopäästö ja 66,2 %:n epävarmuus (Alm ym. 2023, taulukko A9), mikä vastaa 95 %:n luottamusväliä 2,7–13,3 Mt CO₂. Vuoden 2023 päästöarviolle, 11,3 Mt CO₂, samanpituisen luottamusväli olisi 6,0–16,6 Mt CO₂. Vuosien 1990 ja 2021 välisen muutosarvion, 6,5 Mt CO₂:n lisäys päästöissä, epävarmuudeksi arvioitiin 46,0 % (Alm ym. 2023, taulukko A10), mikä vastaa 95 %:n luottamusväliä 3,5–9,5 Mt CO₂. Näiden tulosten perusteella ojitettujen turvemaiden maaperä on tilastollisesti merkitsevä päästölähde ja muutos vuodesta 1990 on tilastollisesti merkitsevä.

4.5. Maaperämallien vertailu

Lorenzo Menichetti, Jukka-Pekka Myllykangas ja Alekski Lehtonen

Suomen KHK-inventaariossa sovelletaan kivennäismaametsille Yasso07 maaperämallia käyttäen ns. skandinaavista parametrিসointia (Rantakari ym. 2012). Kyseinen skandinaavinen parametrিসointi on laadittu Yasso07 mallille siten että kalibroinnissa on hyödynnetty pohjoismaisia karikke-, lahopuu- ja maaperäaineistoja. Yasso07 maaperämallia on aikaisemmin verrattu seuraaviin maaperämalleihin kuten CENTURY ja Q malli (Ortiz ym. 2013, Ťupek ym. 2016, Ťupek ym. 2019).

Tässä työssä verrattiin seuraavia maaperämalleja: Yasso07, Yasso15, Yasso20 ja Q. Yasso07 mallia tässä vertailussa käytettiin sekä skandinaavisella (kuten KHK-inventaariossa), että globaalilla parametrিসoinnilla, kun taas Yasso15 simuloinnit perustuvat globaaliin parametrিসointiin (Viskari ym. 2020). Q mallin sovellus tässä työssä perustuu seuraaviin artikkeleihin (Ågren ym. 2001, Ågren and Bosatta 1996). Q mallia käytetään Ruotsissa skenaariotöissä ja se on

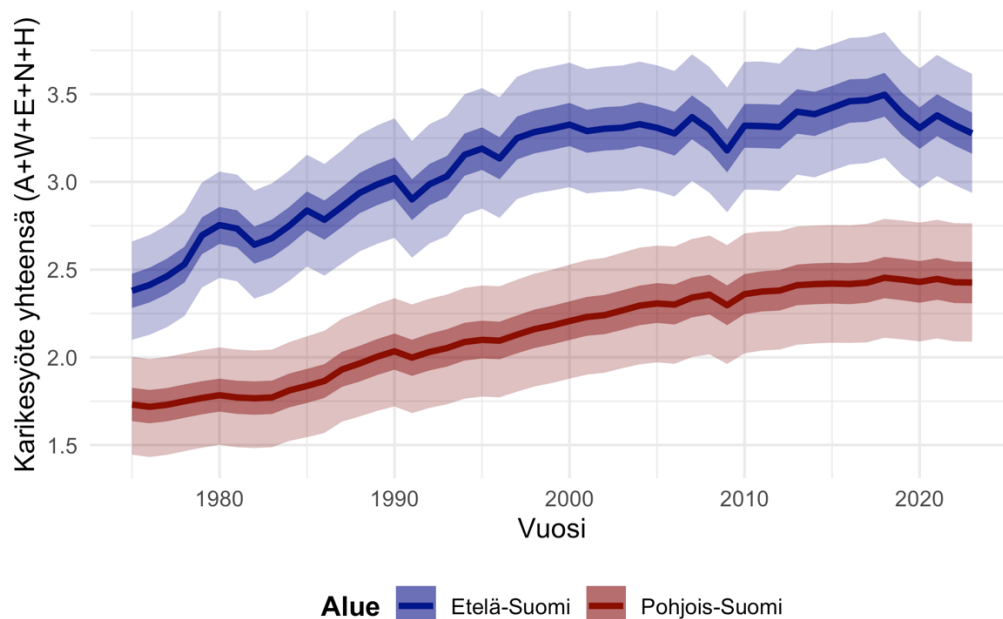
integroitu osaksi HEUREKA laskentajärjestelmää, jolla voidaan arvioida Ruotsin metsien tulevaa kehitystä. Lisäksi tässä työssä sovellettiin Yasso20 mallia (Viskari ym. 2022), jota ajettiin sekä kuukausittaisella, että vuosittaisella sääpakotteella.

Mallinnus tehtiin alueittain, eli Suomi jaetaan kahteen alueeseen: Etelä-Suomi ja Pohjois-Suomi. Tämä heijastaa alueiden välisiä eroja ilmasto-olosuhteissa, metsissä, maaperässä ja hoitokäytännöissä karkealla tasolla ja on yhdenmukainen KHK-inventaarion kanssa. Hiilivaraston muutoksen arvioinnissa käytetään alueellisia ilmastotietoja ja mallit alustettiin jakson 1960–1990 sääpakotteella. Alustuksessa käytettiin ensimmäisen 5 vuoden keskimääräistä karikesadantaa, joka perustuu VMI mittauksiin, biomassamalleihin ja kariketuotantokertoimiin perustuen Liski ym. (2006) lähestymistapaan ja KHK-inventaarioon, alkaen vuodesta 1972 Etelä-Suomelle ja vuodesta 1975 Pohjois-Suomelle. Q-malli alustettiin käyttämällä numeerista tasapainoajoa 1500 vuotta, jotta saatiin aikaan realistinen, ikärakenteinen alkuperäinen hiilivarasto. Tämä lähestymistapa valittiin, koska Q mallissa vuosittainen karikesyöte käsitellään erikseen ja karikkeista muodostuu suuri $n_{\text{vuodet}} * n_{\text{vuodet}}$ matriisi, jossa seurataan kunkin ositteen (puumainen pieni-, ja isokokoinen karike ja ei puumainen karike) hajoamista erikseen. Maaperän hiilivaraston muutokset, jotka on esitetty tässä vertailussa sisältävät kuolleen puun, aluskasvillisuuden, hakkuutähteiden ja elävän puuston tuottaman karikesadannan.

Karikesyötteet alueittain: MCMC-epävarmuusanalyysi

Yhtenäinen viiva = keskiarvo

Tumma nauha = 50% LV, Vaalea nauha = 95% LV



Kuva 7. Kokonaiskarikkeen määrä alueen mukaan (Etelä-Suomi ja Pohjois-Suomi), sekä ns. Markov Chain Monte Carlo (MCMC)-epävarmuusanalyysi (ks. Liite A). Tummat nauhat edustavat 50 %:n luottamusvälejä (25.–75. prosenttipisteet), vaaleat nauhat 95 %:n luottamusvälejä (2,5.–97,5. prosenttipisteet) ja viivat kaikkien iteraatioiden keskiarvoja.

Mallinnus suoritettiin seuraavissa vaiheissa: (i) alueellisten ilmastomuuttujien laskeminen 30 vuoden liukuvan keskiarvon perusteella lämpötilan ja sademäärän osalta, jotta voidaan ottaa huomioon pitkän aikavälin muutokset ja tasoittaa vuosien välisiä vaihteluita; (ii) tasapainotilassa olevan maaperän hiilivarastojen määrittäminen numeeristen tasapainoajojen avulla

(10 000 vuotta); (iii) ajassa vaihtelevien karikesyötöiden laskeminen useista lähteistä, mukaan lukien elävät puut, hakkuutähteet, luonnonpoistuma ja aluskasvillisuus (Kuva 7); (iv) simulointi maaperämallien avulla; ja (v) päästökertoimien (esim. hiilinielu tai -päästö per hehtaari) laskeminen mallinnettujen hiilivarastojen vuosittaisten muutosten perusteella; (vi) kokonaispäästöjen ja nielujen estimointi päästökertoimien ja pinta-alojen avulla.

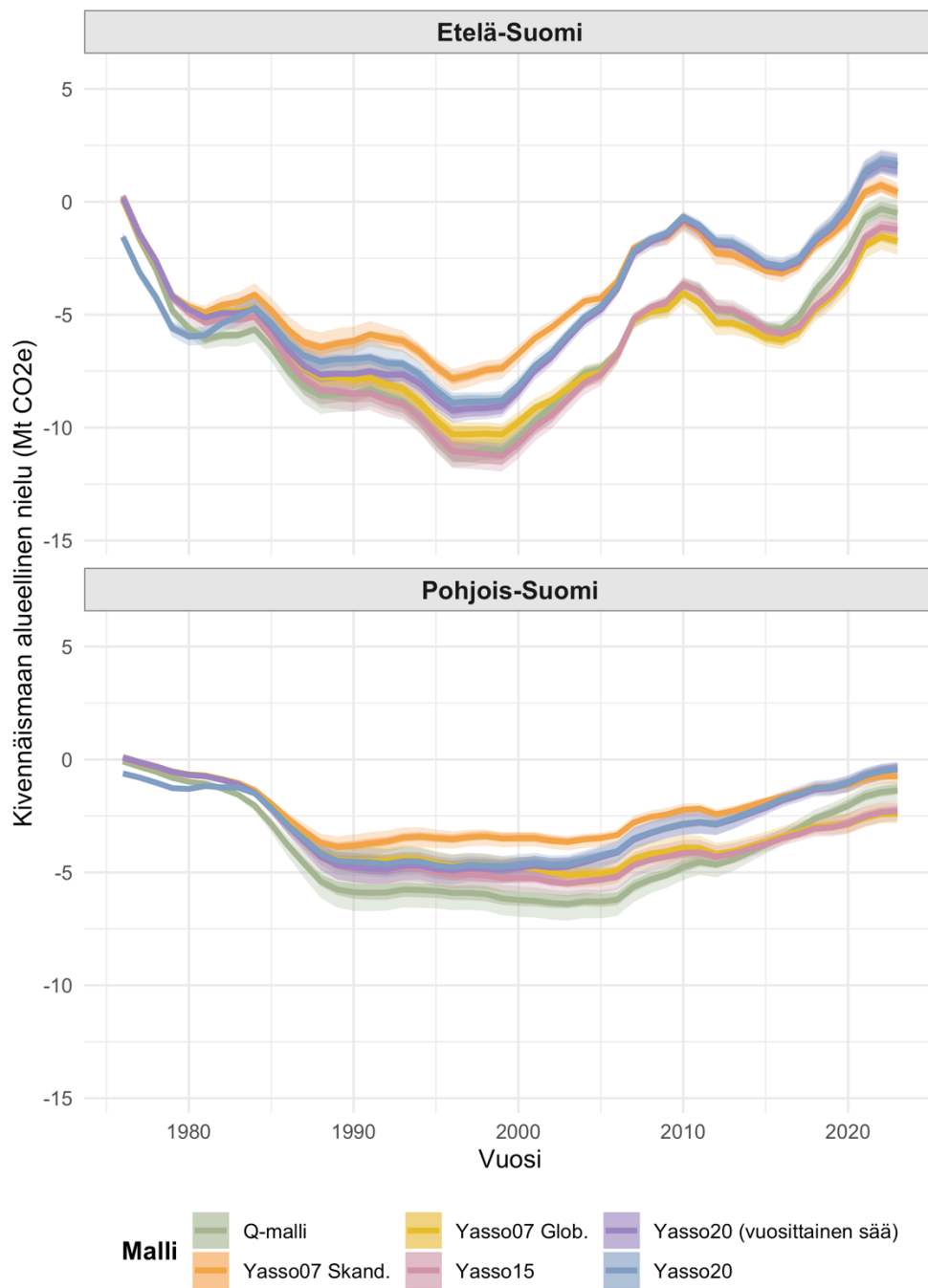
Mineraalimaiden osalta päästökertoimet lasketaan maaperän hiilivarastojen vuotuisena muutoksena, joka tasoitetaan käyttämällä viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa. Tämä lähestymistapa noudattaa Suomen kasvihuonekaasuinventaarion lähestymistapaa. Menetelmän epävarmuudet on kuvattu luvussa maaperän epävarmuuksista, ja tarkemmin liitteessä A.

Vertailun tulokset esitetään kuvassa 8. Sekä Yasso07, Yasso15, Yasso20, että Q malli tuottavat dynamiikaltaan hyvin samankaltaiset kehitykset maaperän hiilivaraston muutokselle. Kuitenkin siten, että Yasso07 (skand.) ja Yasso20 mallit päätyvät lähelle nollaa maaperänielun osalta viimeisille vuosille. Sekä Yasso15, Q että Yasso07 (glob.) tuottavat suuremman nielun kuin muut mallit jakson viimeisille vuosille. Q malli tuottaa erityisesti jaksolla 1995–2005 suuremman maaperänielun kuin muut mallit, Q mallin nielu pienenee kuitenkin enemmän kuin esim. Yasso15 maaperämallin jaksolla 2006–2023. Tasoero Yasso07 (glob.) ja Yasso07 (skand.) mallin välillä säilyy koko simuloidun jakson, alkaen jo ennen vuotta 1990. Ruotsalainen Q malli eroaa sekä Yasso07, että Yasso15 mallista siten että, se on herkempi karikesyötteen vaihtelulle. Q malli tuottaa Suomelle suurimman nielun jaksolle 1990–2000, mutta karikesyötteen kasvun trendin päättymisen jälkeen (noin vuosi 2000) metsien maaperänielu pienenee merkittävästi kaikkien maaperämallien mukaan.

Mineraalimaaperän hiilinielu: Perusskenaario

Yhtenäinen viiva = MCMC keskiarvo

Tumma nauha = 50% LV, Vaalea nauha = 95% LV

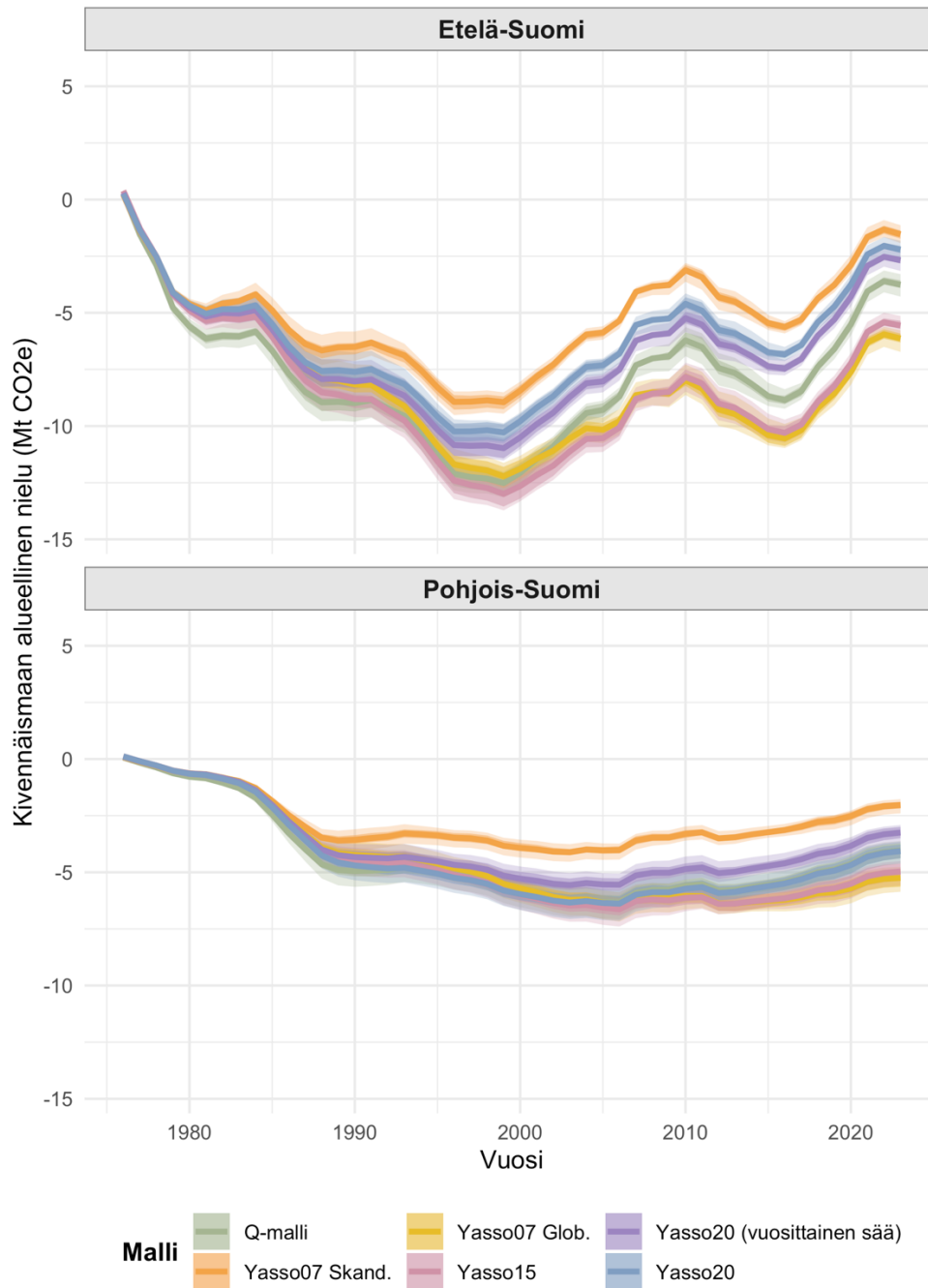


Kuva 8. Neljän eri maaperämallin (Yasso07, Yasso15, Yasso20 ja Q) ennustamat kokonaishiilidioksidipäästöt Etelä- ja Pohjois-Suomen kivennäismaille. Yasso07 mallia on sovellettu sekä skandinaavisella että globaalilla parametrisaatiolla. Yasso20 maaperä maaperämallia on käytetty sekä vuosittaisella, että kuukausittaisella sääaineistolla. Vaaleat alueet kuvaavat 95 %:n luottamusväliä (2,5–97,5 prosenttipisteet). Positiiviset arvot kuvaavat päästöä, negatiiviset nielu.

Mineraalimaaperän hiilinielu: Vakioilmasto

Yhtenäinen viiva = MCMC keskiarvo

Tumma nauha = 50% LV, Vaalea nauha = 95% LV

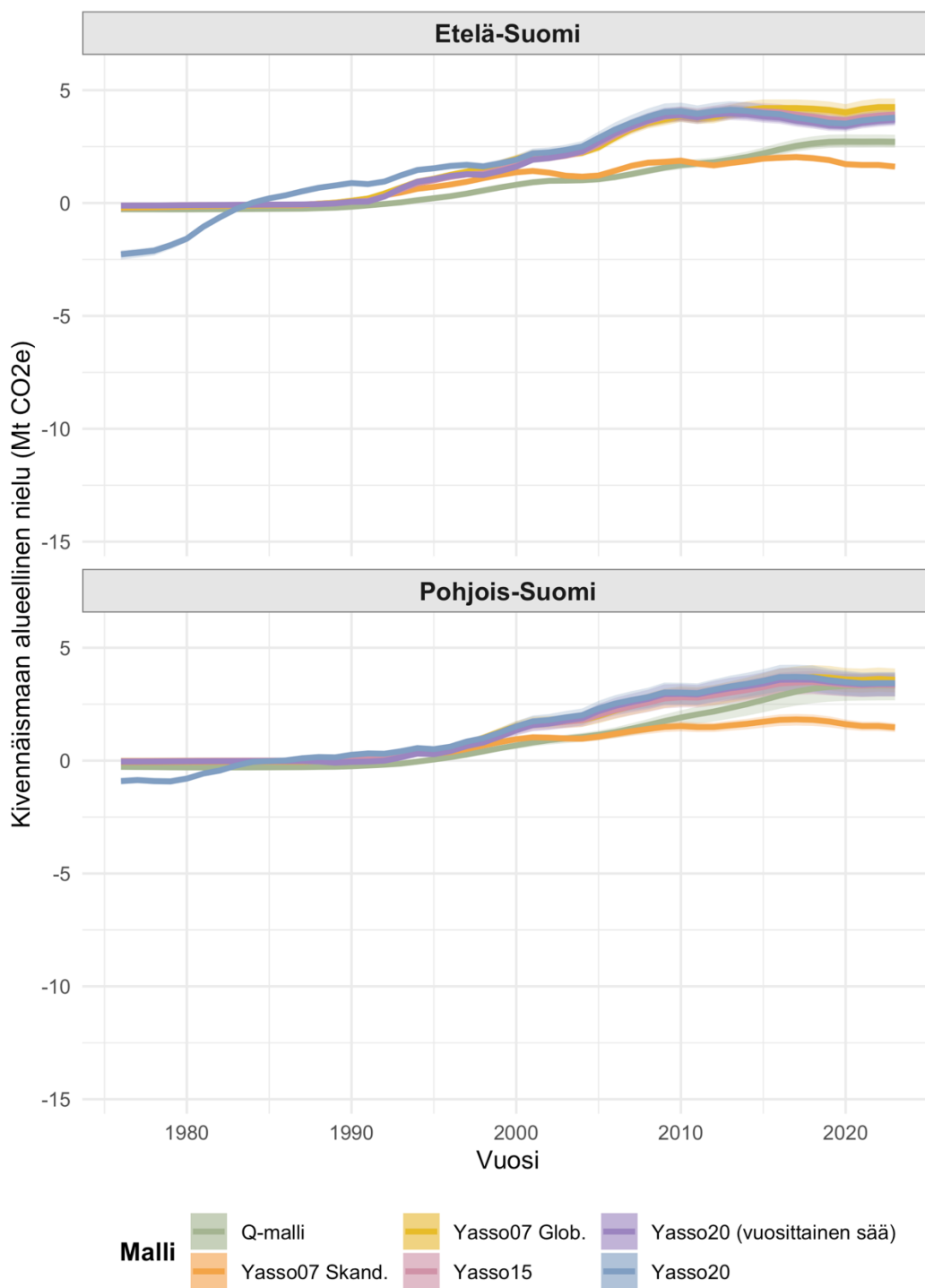


Kuva 9. Neljän eri maaperämallin (Yasso07, Yasso15, Yasso20 ja Q) ennustamat kokonaishiilidioksidipäästöt Etelä- ja Pohjois-Suomen kivennäismaille siten, että simuloinneissa on käytetty vakiosäätä. Yasso07 mallia on sovellettu sekä skandinaavisella että globaalilla parametri-saatiolla. Yasso20 maaperämallia on käytetty sekä vuosittaisella, että kuukausittaisella sääai-neistolla. Vaaleat alueet kuvaavat 95 %:n luottamusväliä (2,5–97,5 prosenttipisteet). Positiiviset arvot kuvaavat päästöä, negatiiviset nielua.

Mineraalimaaperän hiilinielu: Vakiokarikkeella

Yhtenäinen viiva = MCMC keskiarvo

Tumma nauha = 50% LV, Vaalea nauha = 95% LV



Kuva 10. Neljän eri maaperämallin (Yasso07, Yasso15, Yasso20 ja Q) ennustamat kokonaishiili-dioksidipäästöt Etelä- ja Pohjois-Suomen kivennäismaille siten, että simuloinneissa on käytetty vakiokarikesadantaa. Yasso07 mallia on sovellettu sekä skandinaavisella että globaalilla parametrisaatiolla. Yasso20 maaperämallia on käytetty sekä vuosittaisella, että kuukausittaisella sääaineistolla. Vaaleat alueet kuvaavat 95 %:n luottamusväliä (2,5–97,5 prosenttipisteet). Positiiviset arvot kuvaavat päästöä, negatiiviset nielua.

Malleja sovellettiin myös vakiodulla sääpakotteella (Kuva 9), siten että keskiarvoistettiin koko karikeaikasarjan jakson sääaineisto sekä vuosi-, että kuukausitasolle. Tämä vertailu kuvaa sitä, kuinka herkästi karike hajoaa vakiodun sään vallitessa. Karikkeen hajoaminen ilman sääolosuhteiden vaikutusta on suurinta malliversiossa Yasso07 (skand.), jota seuraa Yasso20 (vuositainen), sekä Q malli. Lisäksi malleja sovellettiin vakiodulla, koko karikeaikasarjan keskimääräisellä karikesyötteellä (Kuva 10). Tässä vertailussa malleista erottuvat Yasso07 (skand.) ja Q malli, jotka tuottavat muita malleja pienemmän maaperänielun vakiodulla karikesyötteellä. Tämä kuvaa sitä, että nämä mallit tuottavat pienemmän nielun samalla karikesyötteellä kuin muut mallit erityisesti aikasarjan lopussa.

Eri malliversioiden ja mallien vertaamisen tuloksena saatiin, että Yasso07 (Skand.) tuotti pienemmän hiilinielun verrattuna muihin malliversioihin, kun malleja sovellettiin vakiodulla säällä. Tämä viittaa siihen, että mallin Yasso07 (Skand.) hajoamista kuvaavat parametrit ja ositteiden väliset virrat ovat sellaiset, että ne tuottavat pienemmän hiilinielun kuin muut malliversiot. Toisaalta Yasso07 (Skand.) versio tuotti muita malliversioita pienemmän hiilipäästön tilanteessa, jossa karikesyöte oli vakioitu. Tämä kuvaa sitä, että muut mallit hajottavat orgaanista ainetta nopeammin kuin Yasso07 (Skand.) versio vakiodulla karikkeella.

Eri malliversioiden ja mallien hiilinieluestimaatit erosivat toisistaan, vaikkakin karikesyöteaikasarjasta johtuvat maaperän hiilinielun dynamiikka oli eri malliversioiden välillä samankaltainen. Nämä erot johtuvat todennäköisesti mallien erilaisista parametrisoinneista, erityisesti Yasson osalta, koska eri versioiden välillä ei ole suuria rakenteellisia eroja. Parametrisoinneista johtuvia eroja kuvaa hyvin vertailu kahden Yasso07-version välillä, joista skandinaaviseen parametrisointiin perustuva versio vaikuttaa hajottavan orgaanista ainetta nopeammin verrattuna globaaliin parametrisointiin. Aiemmissa tutkimuksissa (Ortiz ym. 2013) on havaittu, että orgaanisen aineen hajoaminen Q-mallissa on nopeampaa kuin Yasso07-mallissa (globaali parametrisointi). Myös Yasso20 mallia sovellettiin sekä vuosittaisella, että kuukausittaisella sääaineistolla ja mallien tuottamat tulokset erosivat toisistaan, kun malleja ajettiin vakiodulla säällä. Yasso20 malli on parametrisoitu kuukausittaisen sääaineiston avulla, joten on ymmärrettävää, että soveltaminen vuosittaisella aineistolla muuttaa mallin tuottamia tuloksia.

5. Muutosten vaikutus hiilinieluarvioihin

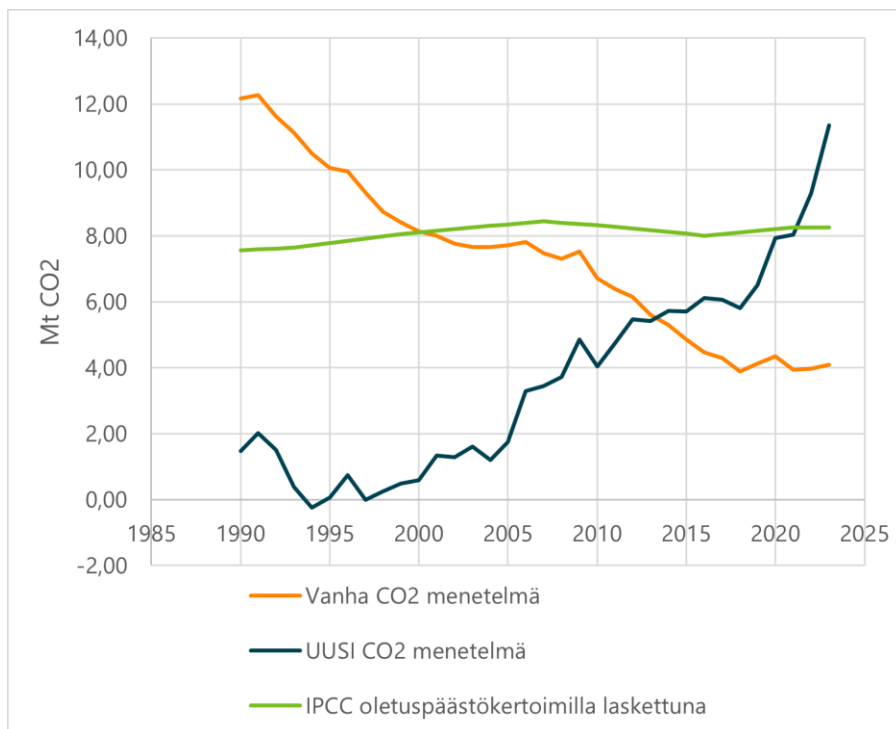
5.1. Turvemaiden uuden laskentamenetelmän vaikutus

Antti Wall

Turvemaiden laskentamenetelmän muutos vaikuttaa koko aikasarjaan alkaen vuodesta 1990. Uusi menetelmä tuottaa vuosien 1990–2023 aikasarjassa päästön kasvavan trendin alkaen 3,0 ja päättyen 11,3 Mt CO₂ vuodessa, kun taas vanhan menetelmän tuottamassa aikasarjassa vuotuiset päästöt pienenevät alkaen 12,1 päättyen 4,1 Mt CO₂. Aikasarjan alussa CO₂-päästö on uudessa menetelmässä 4,0 kertaa pienempi ja aikasarjan lopussa 2,8 kertaa suurempi vanhaan menetelmään verrattuna (Kuva 11). IPCC:n oletuspäästökertoimilla (Tier 1) laskettuna vuotuinen CO₂-päästö vaihtelee pelkästään ojitettujen turvemaiden pinta-alan muutosten takia ja päästö on aikasarjan alussa 5 kertaa suurempi verrattuna uuden menetelmän tuottamaan päästöön ja aikasarjan lopussa 0,7 kertaa pienempi.

Uuden menetelmän tuottama päästötrendi johtuu siitä, että turpeen hajoaminen kasvaa nopeammin kuin kariketuotos. Kariketuotoksen kasvu aikasarjassa johtuu pääasiassa puuston tilavuuden kasvusta, jota kuvaa puuston pohjapinta-alan kasvu. Turpeen hajoamisen kiihtymisen johtuu sekä puuston pohjapinta-alan (vähäinen vaikutus) että kasvukauden keskilämpötilan (suuri vaikutus) kasvusta. Menetelmän epävarmuudet on kuvattu seuraavassa luvussa, ja tarkemmin liitteessä A.

Vanhan menetelmän tuottama aleneva päästötrendi johtuu siitä, että turpeen ja maanalaisen karikkeen hajoaminen on vakio koko aikasarjassa vuodesta 1990 nykypäivään, vaikka lisääntyvä puuston määrä tuottaa kasvavan maanalaisen karikkeen syötteen maaperään. Vanhan menetelmän arvio maaperäpäästöistä on täysin epäuskottava tilanteessa, jossa turvekerroksen hajoaminen ojitamisen seurauksena havaitaan metsissä visuaalisesti. Vanha laskentatapa olisi tuottanut lähivuosina tilanteen, jossa ojitettujen soiden maaperään laskennallisesti kertyy hiiltä vain siitä syystä, että karikkeen hajoaminen oli vakioitu.



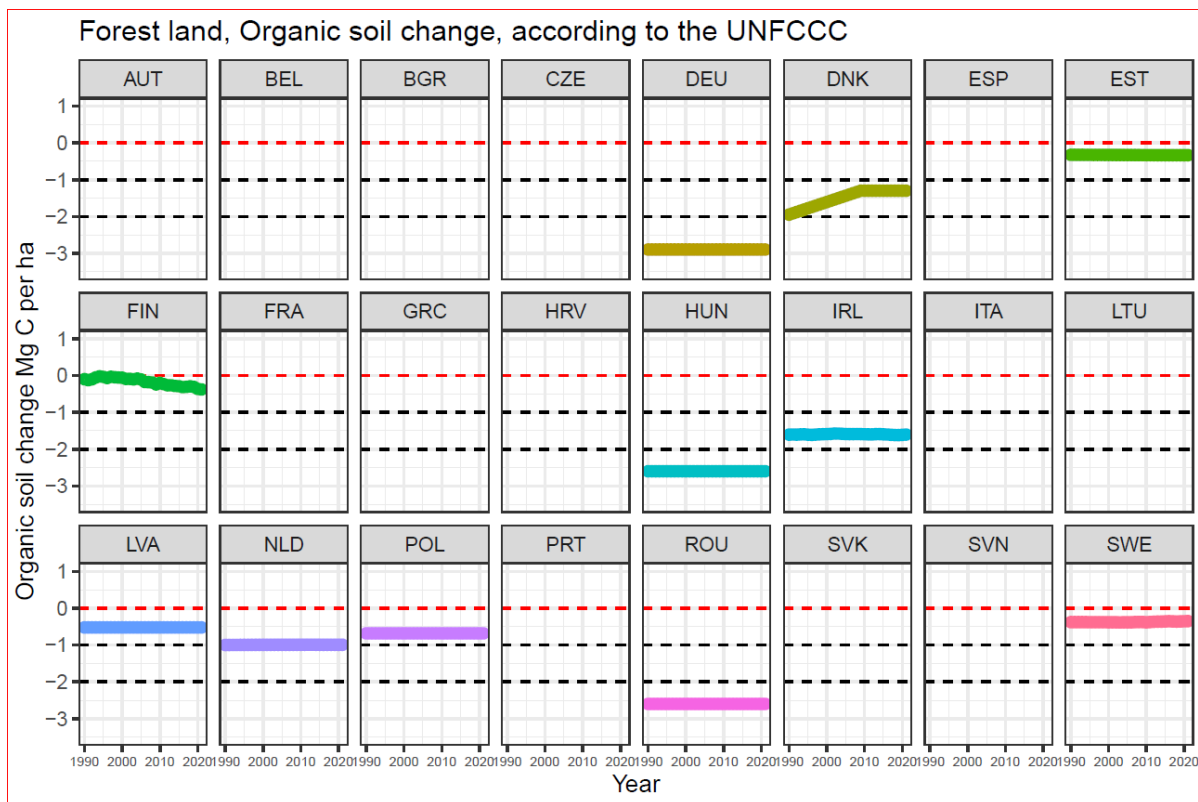
Kuva 11. Ojitettujen suometsien metsämaan maaperän CO₂-tase uudella ja vanhalla menetelmällä sekä IPCC:n oletuspäästökertoimilla laskettuna.

Taulukko 5. Ojitettujen suometsien päästöjä raportoivien maiden eri suoluokkien pinta-alalla painotettuja keskimääräisiä päästökertoimia.

Kansalliset päästökertoimet	t C/ha/v	IPCC oletuspäästökertoimet	t C/ha/v
Irlanti	0,59	Ruotsi	2,2
Latvia	0,52	Norja	0,76
Puola	0,68	Sveitsi	2,6
Venäjä	0,71	Saksa	2,6
Yhdistynyt kuningaskunta	2,0	Tanska	2,6
		Uusi-Seelanti	0,68

Suomen käyttämän uuden menetelmän tuottamassa aikasarjassa päästökerroin on aikasarjan alussa 0,1 t C/ha/v ja on aikasarjan lopussa 0,73 t C/ha. Vaikka päästökerroin on aikasarjan alusta moninkertaistunut, verrattuna muiden maiden käyttämiin päästökertoimiin, ovat erityisesti temperaattisen ilmastovyöhykkeen maiden oletuspäästökertoimet vielä tätäkin selvästi korkeampia (Taulukko 5). Suomen keskimääräinen päästökerroin on myös IPCC:n boreaalisen ilmastovyöhykkeen oletuspäästökertoimien 0,25 (ravinneköyhät maat) ja 0,93 (rehevät maat) t C/ha/v välissä.

Vain Suomen ja Tanskan malleissa on ollut ajallisia muutoksia päästöjen tasossa (Kuva 12), vaikka ilmaston lämpiäminen on väistämättä kiihdyttänyt turpeen hajoamista muuallakin kuin Suomessa. Kaikissa muissa maissa on käytetty vakiopäästökertoimia, joissa päästöjen muutokset riippuvat vain soiden pinta-alassa tapahtuvista muutoksista. Verrattuna yllä olevaan taulukkoon luvut ovat pienempiä, koska kuvassa on suhteutettu ojitettujen orgaanisten maiden hiilivaraston muutos orgaanisten maiden kokonaispinta-alaan, kun taas edellä olleet, suuremmat lukuarvot, on suhteutettu ojitettujen orgaanisten maiden pinta-alaan.



Kuva 12. Hehtaarikohtaisten päästöjen muutos ajassa Euroopan maissa

5.2. Skenaariolaskennat

Lauri Mehtätalo Annika Kangas, Hannu Hirvelä ja Harri Kilpeläinen

MELA-ohjelmiston uudella aineistonmuodostusmenetelmällä on merkittäviä vaikutuksia hakkuumahdollisuusarvioihin ja metsien tulevaan kasvuun 10 vuoden ja sitä pidemmällä aikavälillä (Taulukko 6). Tavanomaisessa 4 % korkokannalla lasketun suurimman ylläpidettävissä olevan hakkuukertymän laskelmassa (SY4%-laskelmassa) runkopuun vuotuinen hakkuukertymäarvio on 81,8 miljoonaa kuutiometriä kymmenvuotiskaudella 2021–2030 ja 83,7 miljoonaa kuutiometriä kolmannella kaudella 2041–2050. Aikaisempaa tasaisemmat kausittaiset hakkuumäärät viittaavat siihen, että jos metsien hakkuuta ohjaa 4 % korkovaatimus, niin metsät ovat 1950-luvulta alkaneen metsänhoitotapojen muutoksen jälkeen saavuttamassa tasapainotilaa, jossa hakkuumäärät voivat olla noin 83–84 miljoonaa kuutiometriä ja kasvu noin 95–100 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Jos metsänhoitoa ohjaisi alhaisempi korkovaatimus, niin metsät eivät ole vielä tasapainotilassa, ja lähitulevaisuuden hakkuumäärät ovat alhaisemmat: 3 % korkokannalla hakkuumäärät ylittävät 80 miljoonan rajan toisella kaudella, 2 % korkokannalla 3. kaudella ja 1 % korkokannalla hakkuumäärät eivät nouse 30 vuoden raportointijakson aikana niin korkealle, kuin ne nousivat pidemmällä raportointijaksolla. Vanhalla menetelmällä SY4% laskelmassa vuotuinen runkopuun hakkuukertymä nousee ensimmäisen kauden 80,9 miljoonasta kuutiometristä kolmannen kauden 88,2 miljoonaan kuutiometriin.

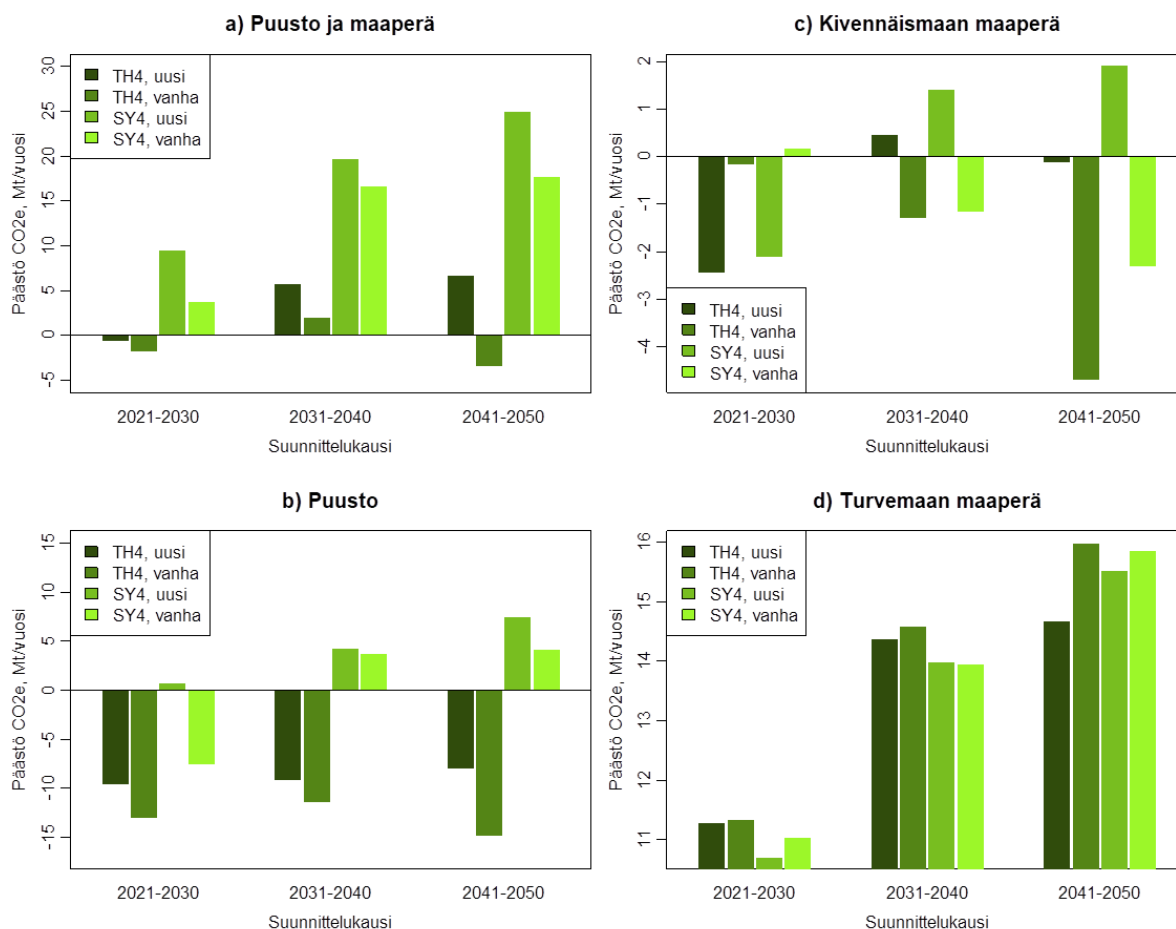
Sekä vanhalla että uudella menetelmällä metsien kasvun arvioidaan tavanomaisessa SY4% laskelmassa olevan ensimmäisellä kymmenvuotiskaudella noin 105 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Uuteen laskenta-aineistoon perustuvissa laskelmissa kasvun ennakoitaan kuitenkin taantuvan niin, että se on kolmannella kymmenvuotiskaudella vain 95 miljoonaa

kuutiometriä, kun vanhalla menetelmällä kasvu on 104 miljoonan kuutiometrin tasolla. Puuston vuotuinen kasvu taantuu kuitenkin sitä vähemmän mitä alhaisempaa korkokantaa laskelmassa käytetään, ja puuston kasvu on kolmannella kaudella 1 % korkokannalla 8,7 miljoonaa kuutiometriä korkeammalla tasolla kuin 4 % korkokannalla laskettuna.

Taulukko 6. Runkopuun vuotuiset tilavuuskasvut ja hakkuukertymät 1, 2, 3, 4 ja 5 prosentin korkokannoilla laadittujen suurimman ylläpidettävissä olevien hakkuukertymääarvioiden (SY1%, SY2%, SY3%, SY4% ja SY5%) mukaan sekä 4 prosentin korkokannalla lasketun ja vuosina 2021–2023 keskimäärin toteutuneisiin hakkuumääriin perustuvan arvion (TH4%) mukaan A) vanhalla ja B) uudella aineistonmuodostusmenetelmällä VMI13-aineistosta tuotettuun alkupuustoon perustuen.

	Vanha			Uusi		
	Runkopuun tilavuuskasvu, milj. m ³ /v					
	2021–2030	2031–2040	2041–2050	2021–2030	2031–2040	2041–2050
SY5%				104,5	99,0	94,2
SY4%	105,3	103,8	104,0	104,8	100,0	95,2
SY3%				105,5	102,0	97,5
SY2%				106,8	105,8	102,1
SY1%				107,1	107,0	103,9
TH4%	103,8	102,6	106,3	104,0	99,5	98,3
	Runkopuun hakkuukertymä, milj. m ³ /v					
SY5%				83,8	84,2	83,6
SY4%	80,9	87,7	88,2	81,8	84,1	83,7
SY3%				76,3	81,4	83,2
SY2%				63,8	70,1	82,4
SY1%				56,5	62,3	73,0
TH4%	74,3	74,4	74,5	74,0	74,0	74,0

Kun hakkuut pysyvät vuosina 2021–2023 keskimäärin toteutuneiden hakkuiden tasolla (TH4%-laskelma, kertymä n. 74 miljoonaa kuutiometriä vuodessa), uudella aineistonmuodostusmenetelmällä tehdyissä laskelmissa kasvu taantuu 98,3 miljoonaan kuutiometriin, kun vanha menetelmä ennakoii sen nousevan kolmannella kaudella nykyiseen verrattuna. Kasvun ja hakkuumäärien muutokset vaikuttavat merkittävästi etenkin puuston hiilitaseeseen mutta myös maaperän hiilitaseeseen (Kuva 13). Toteutuneiden hakkuiden skenaariossa metsien ennakoidaan kehittyvän n. 5 miljoonan hiilidioksidiekvivalenttonnin päästökseen, kun vanhalla aineistonmuodostusmenetelmällä sen ennakoitiin kehittyvän samansuuruiseksi nieluksi.



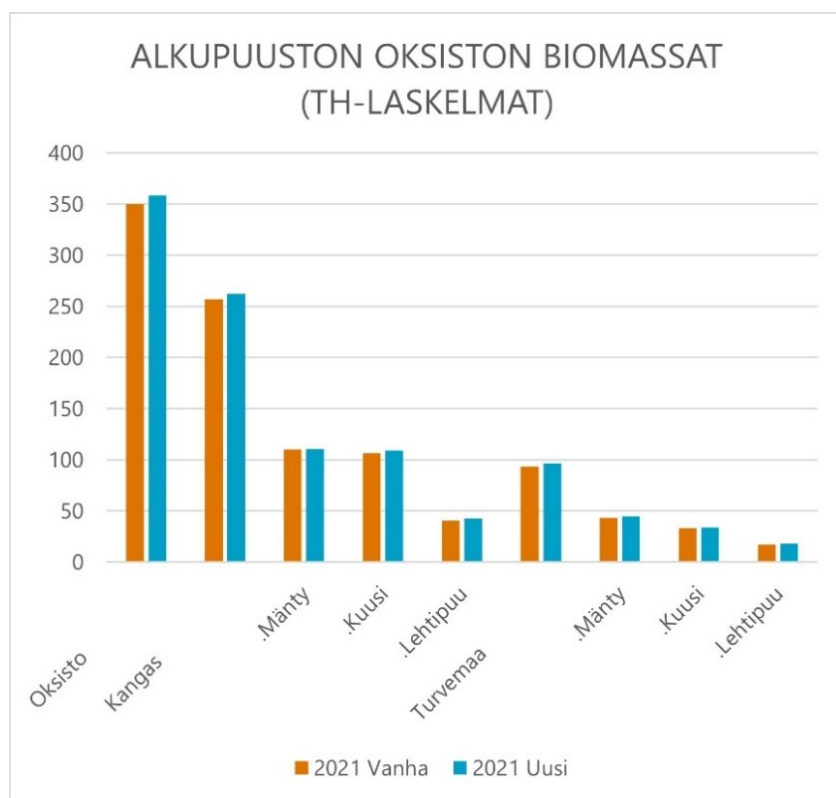
Kuva 13. Alkupuuston muodostamismenetelmän vaikutus hiilitasearvioihin: a) puuston ja maaperän yhteenlaskettuun hiilitaseeseen sekä erikseen b) puuston, c) kangasmaan maaperän ja d) turvemaan maaperän hiilitaseeseen 4 % korkokannalla tuotettujen suurimman ylläpidettävän (SY4%) ja toteutuneen hakkuukertymän (TH4%) skenaarioissa. Hiilitase on laskettu kasvu-poistumamenetelmällä käyttäen VMI13-aineistosta läpimittaluokittain laskettuja BEF-kertoimia.

Uusi alkupuuston muodostamistapa myös muuttaa hakkuutapojen osuuksia skenaarioissa. Uudella menetelmällä suurimman ylläpidettävissä olevassa hakkuukertymän arvioissa (4 %) ehdotetut uudistushakkuut vähenevät, mutta kasvatushakkuut ja energiapuuhakkuut varsinkin kauden alussa lisääntyvät (Taulukko 7).

Alkupuuston muodostamismenetelmän muutoksella on vaikutusta myös arvioituihin biomassoihin (Kuva 14). Uudella menetelmällä esimerkiksi oksien biomassat alkutilanteessa ovat hie-
man aiempaa suuremmat.

Taulukko 7. Eri hakkuutapojen kertymät suurimman ylläpidettävissä olevan hakkuukertymän (SY4%) arvi-ossa. A) vanhalla ja B) uudella aineistonmuodostusmenetelmällä VMI13-aineistosta tuotettuun alkupuustoon perustuen.

A Vanha menetelmä			
KAUSI	2021–2030	2031–2040	2041–2050
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m ³ /v	80,9	87,7	88,2
Kasvatushakkuu	17,0	27,0	27,7
Uudistushakkuu	63,9	60,8	60,5
Energiapuukertymä, milj. m ³ /v	14,4	16,6	16,8
Runkopuu	5,8	7,8	7,8
Oksat, lehdet ja neulaset, kannot ja juuret	8,6	8,8	9,0
B Uusi menetelmä			
KAUSI	2021–2030	2031–2040	2041–2050
Runkopuun hakkuukertymä, milj. m ³ /v	81,8	84,1	83,7
Kasvatushakkuu	29,6	29,0	27,7
Uudistushakkuu	52,2	55,1	56,0
Energiapuukertymä, milj. m ³ /v	13,8	14,3	14,4
Runkopuu	7,7	7,8	7,3
Oksat, lehdet ja neulaset, kannot ja juuret	6,1	6,4	7,0



Kuva 14. Oksabiomassojen ero Melan uudella ja vanhalla aineistonmuodostustavalla VMI13 aineistossa

5.3. Biomassamallit ja -kertoimet

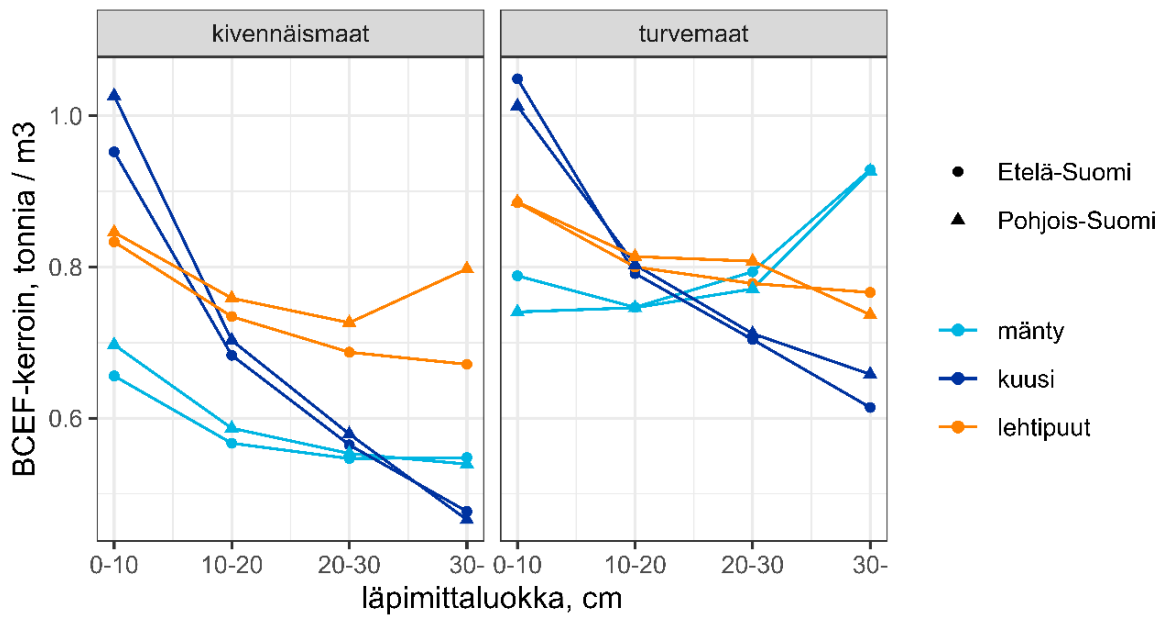
Annika Kangas, Juha Heikkinen, Jukka-Pekka Myllykangas, Lauri Mehtätalo, Harri Kilpeläinen ja Hannu Hirvelä

Epälooginen hyppäys MELA-laskelman alkutilanteen hiilinielun ja KHK-arvion lopputilanteen hiilinielun välillä johtui pääosin siitä, että MELA-ohjelmistossa sovellettiin eri biomassamallia kuin KHK:ssa. Siten myös menetelmillä lasketut biomassakertoimet poikkeavat toisistaan. Hakkuiden määrä ja kohdentuminen vaihtelee kuitenkin MELA-ohjelmistolla lasketuissa skenaarioissa sekä kausittain että myös alueittain, kasvupaikoittain ja hakkuutavoittain. Esimerkiksi hakkuissa voidaan poistaa eri laskentakausilla erikokoisia puita riippuen siitä, miten hakuita kohdistuu ensiharvennus-, myöhempien harvennus- tai päätehakkuvaiheen puustoihin. Siten skenaariolaskennassa MELA-ohjelmistolla saaduista tuloksista lasketut biomassakertoimet ovat aina skenaariokohtaisia ja muuttuvat ajassa, kun taas KHK-laskennassa kertoimet ovat VMI-kohtaisia eli vakioita. Tällä on väistämättä vaikutusta myös hiilinielujen tasoon. Oheisessa taulukossa (8) on kuvattuna MALUSEPO jatkuva kasvu -skenaariion (Koljonen ym. 2020) Etelä-Suomen biomassakertoimien ero verrattuna vastaaviin KHK-kertoimiin. Ajassa erot muuttuvat, pääsääntöisesti kasvavat, kun puuston rakenne laskelmissa muuttuu.

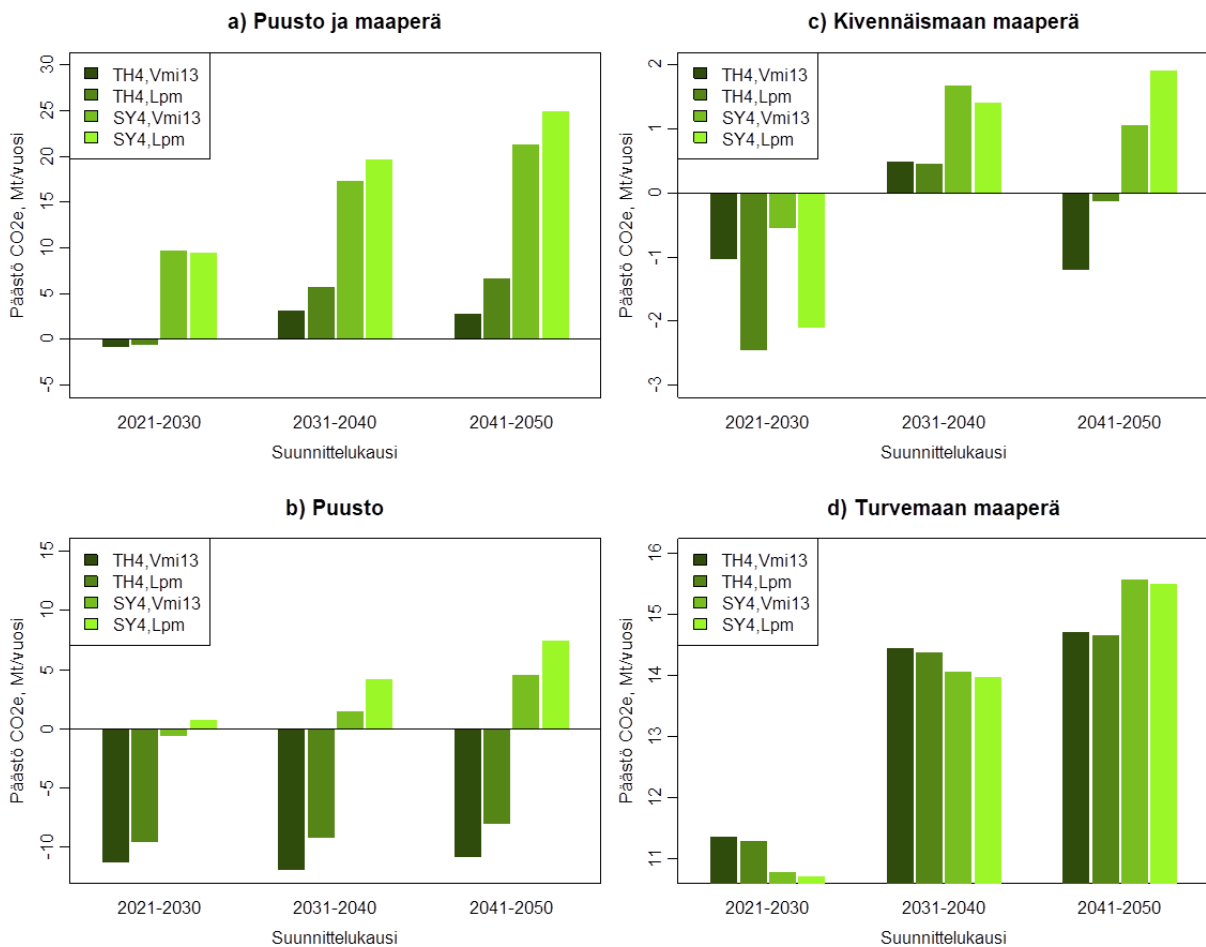
Taulukko 8. Esimerkki MALUSEPO:n jatkuva kasvu -skenaariossa (Koljonen ym. 2020) sovelletuista KHK:n vakiosuuruista biomassakertoimista ositteittain sekä MELA-tuloksista eri kymmenvuotiskausille laskettujen biomassakertoimien suhteellisista eroista vastaaviin KHK:n biomassakertoimiin.

		KASVU, Mg/m ³		POISTUMA, Mg/m ³			
				Luonnonpoistuma		Hakkuupoistuma	
		Kivennäismaa	Turvemaa	Kivennäismaa	Turvemaa	Kivennäismaa	Turvemaa
KHK-biomassakerroin	mänty	0.570076	0.58521	0.64361	0.61585	0.62171	0.62920
	kuusi	0.680524	0.71121	0.78364	0.87124	0.72887	0.77661
	lehtipuu	0.797473	0.80349	0.9150	0.95737	0.84475	0.87596
Ero MELA-KHK, % 2015–2024	mänty	10.53	8.86	20.05	17.95	-1.48	0.74
	kuusi	7.94	1.41	38.95	36.13	-7.71	-9.44
	lehtipuu	1.16	0.62	18.10	0.87	-10.11	-11.90
Ero MELA-KHK, % 2025–2034	mänty	11.08	8.29	22.29	24.99	-1.37	0.77
	kuusi	8.96	-1.41	28.50	13.08	-5.27	-9.39
	lehtipuu	0.11	-0.71	9.84	-2.72	-10.70	-12.21
Ero MELA-KHK, % 2035–2044	mänty	12.64	10.03	31.12	63.61	-0.86	-0.74
	kuusi	10.75	-3.11	32.56	10.45	-5.44	-9.69
	lehtipuu	1.30	1.20	13.68	1.60	-10.51	-13.01

Uusiin skenaariotöihin tarvitaan siten biomassakertoimet, jotka huomioivat aiempaa paremmin skenaarioissa elävän puuston ja hakkuissa poistettavien puiden ajassa muuttuvan kokorakenteen, mutta ovat loogisesti yhteensopivat KHK-inventoinnin kanssa. Tämä on mahdollista, kun skenaariolaskennassa sovelletaan läpimittaluokittaisia biomassakertoimia (Kuva 15). Tyypillisesti pienten läpimittaluokkien kertoimet ovat selkeästi suurempia kuin suurempien läpimittaluokkien vastaavat, etenkin kuusella.



Kuva 15. Läpimittaluokittaiset biomassakertoimet VMI:n koepuumittauksissa



Kuva 16. Uudella aineistonmuodostuksella lasketut hiilitaseet, käyttäen VMI13 aineistosta laskettuja läpimittaluokittaisia ja keskimääräisiä BCEF-kertoimia.

Kun skenaarioiden hiilinielut lasketaan läpimittaluokittaisilla kertoimilla, eikä enää VMI:n va-kiokertoimilla, tulokset muuttuvat edelleen verrattuna pelkkään aineistonmuodostamismene-temän vaikutukseen (Kuva 16 versus Kuva 13). Läpimittaluokittaiset biomassakertoimet lisää-vät skenaarioissa päästöjä / vähentävät nieluja puuston osalta, mutta maaperän suhteen läpi-mittaluokittaiset kertoimet kasvattavat nieluja / vähentävät päästöjä (Kuva 16). Tämä johtunee siitä, että maaperään siirtyvän karikkeen määrä ja laatu muuttuvat.

KHK-inventaariossa uudet biomassamallit korvaavat aiemmat Repolan (2008, 2009) mallit (Liite A, Taulukko A1). Kun samat mallit saadaan käyttöön myös MELA-ohjelmistossa (ts. kaikki tarvittavat selittävät muuttujat saadaan laskennasta), ero KHK:n kasvu-poistumamene-temän ja MELA:n varastonmuutosmenetelmän välillä voi pienentyä tai poistua miltei koko-naan.

6. Kasvihuonekaasulaskennat politiikan työvälineenä

6.1. Skenaariolaskennat

Annika Kangas

Luottamusvälien muodostaminen skenaariolaskelmille on erittäin hankala tehtävä, koska skenaariolaskelmissa sovelletaan monia eri malleja, joiden kunkin tuottamia ennusteita käytetään edelleen uusien mallien lähtötietoina ennustamaan uusia muuttujia tai muuttujien kehitystä ajassa. Skenaarioissa on epävarmuuksia, jotka riippuvat syöttötietojen epävarmuuksista, sekä käytettyjen mallien parametrien epävarmuuksista samalla tavoin kuin maaperämalleissa (Liite A). Simulaatiolaskelmissa lisäksi yksittäisen puun kasvun virheet korreloivat ajassa, samoin kuin yksittäisen metsikön puiden kasvut virheet korreloivat muiden saman metsikön puiden kanssa. Se tarkoittaa, että pitkän aikavälin laskelmissa joidenkin metsiköiden kasvu systemaattisesti yliarvioidaan, ja toisten aliarvioidaan.

Puiden luontaisen kasvun ja kuoleamisen lisäksi skenaarioiden epävarmuuksiin vaikuttavat tehdyt oletukset ihmisen vaikutuksesta, eli hakkuista ja hoitotoimenpiteistä. Tyypillisesti skenaarioissa ei pyritä ennustamaan toteutuvaa toimenpiteiden tasoa, vaan tarkastellaan valitun tason odotettavissa olevaa vaikutusta. Kun laskelmassa hakkuut kohdennetaan optimoimalla puuston nettotulojen nykyarvon suhteen, optimointi valikoi todennäköisemmin edelleen kasvatettaviksi niitä metsiköitä, joiden (arvo)kasvu yliarvioidaan kuin niitä, joiden (arvo)kasvu aliarvioidaan ja vastaavasti hakattaviksi todennäköisemmin niitä, joiden (arvo)kasvu aliarvioidaan. Todellisuudessa metsänomistajat eivät myöskään valitse hakkuukohteitaan optimoimalla, joten todelliset hakkuut kohdentuvat aina metsänhoidollisesti heikommin kuin optimoinnin laskennallisesti kohdentamat hakkuut (olettaen, että kasvumallit kuvaavat kasvun oikein). Siten skenaarioissa on aina skenaarioiden luonteeseen liittyviä tekijöitä (oletukset hakuiden ja hoidon tasosta) sekä valittuun laskentatapaan liittyviä tekijöitä (optimoinnin vaikutus), joiden seurauksena skenaariot eivät kuvaa oikein todellisuudessa toteutuvaa metsien kehitystä tai hakkuuta.

Skenaariolaskelmat sisältävät mallien lisäksi monia eri laskentaparametreja, jotka perustuvat tutkijoiden tekemiin valintoihin, eikä niiden valintaan ei ole olemassa objektiivisia menetelmiä. Esimerkiksi MELA-ohjelmiston uudessa alkupuuston muodostamismenettelyssä kuvauspuiden määrä, jolla alkupuusto kuvataan, vaikuttaa sekä tukkipuun osuuteen kokonaistilavuudesta että puuston kasvun ennusteeseen. Vastaavia valintoja liittyy esimerkiksi siihen, mikä on metsiköittäin suurin sallittu runkoluku tai pienin sallittu hakkuukertymä. Skenaariot ovat herkkiä laskentaparametrien muutoksille, mutta näiden parametrien merkittävyyttä ei ole systemaattisesti arvioitu. Siten kattava herkkyysanalyysi eri laskentaparametreille olisi tarpeellinen.

Vaikka skenaarion hakkuutaso vastaisi toteutunutta hakkuiden tasoa, simulaatioiden systemaattiset virheet voivat johtaa merkittäviin eroihin puuston ennustetussa ja toteutuneessa kehityksessä. Esimerkiksi 1999 julkaistussa Kansallisessa metsäohjelmassa (Kansallinen metsäohjelma 2010) ennustettiin, että puuston tilavuus nousisi 2030 mennessä 2,5 miljardiin kuutiioon noin 50 miljoonan kuution vuotuisilla hakkuilla, mutta todellisuudessa tämä rajapyykki saavutettiin VMI13 mittauksen mukaan jo, vaikka toteutuneet hakkuut olivat huomattavasti

skenaarion oletettua tasoa korkeammat. Vaikka edellä mainittu optimoinnin vaikutus ja jaettujen koealojen vaikutus systemaattisesti yliarvioivat puuston kasvua etenkin pidemmällä aikavälillä, esimerkiksi hakkuiden kohdentumisen, ilmastonmuutoksen, jalostuksen yms. vaikutusten aliarvioiminen skenaarioissa ja todellisten metsänhoitotoimien parannusten kuten metsien uudistamisen tehostamisen vaikutus on tällä aikavälillä johtanut metsien todellisen kasvun aliarvioimiseen.

MELA-simulaattorista on olemassa yksi tutkimus, jolla tuloksia on validoitu (Haara & Leskinen 2009). Validointi on tehty 5–10 vuodelle, kun simulaattoreita sovelletaan jopa sadan vuoden laskelmissa. Lukessa on käynnissä uuden laskentaohjelmiston kehitystyö, ja uusi ohjelmisto tulee korvaamaan nykyisen MELA-ohjelmiston. Koska tulevassa MELA-ohjelmistossa on uusitut kasvumallit, sekä uusittu alkupuuston muodostamistapa, työn alla olevaa uutta simulaattoria ja sen sisältämiä malleja ei ole validoitu lainkaan. Validointi vaatii 3–5 henkilötyövuoden panostuksen, alkaen soveltuvien aineistojen kokoamisesta, simulaatioista, virheiden analyysistä, ja laskentaparametrien herkkyysanalyysistä.

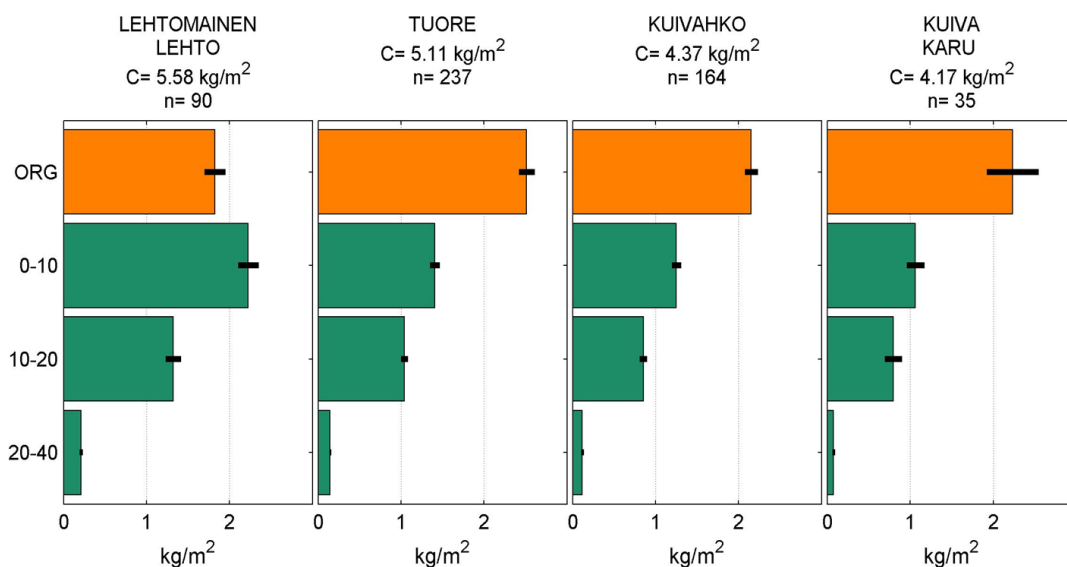
6.2. Maaperämallit ja -mittaukset

Hannu Ilvesniemi

Luonnonvarakeskuksen julkaistua alkuvuodesta tuoreimmat metsien hiilitaseita koskevat tunnusluvut, julkisessa keskustelussa esille nousi voimakkaasti kysymys siitä, miksi Suomen ja Ruotsin raportoidut luvut ovat niin erilaiset. Erityisesti maaperän hiilivarastojen muutosta kuvaavat tunnusluvut poikkeavat toisistaan merkittävästi, joten HILE-projektissa selvitettiin nämä eroavaisuudet johtuvat ja onko jompikumpi tavoista toinen toistaan parempi.

Suomen ja Ruotsin tavat tuottaa estimaatti maaperän hiilivaraston muutoksesta eroavat toisistaan merkittävästi. Suomalaisessa raportointitavassa maaperän hiilivaraston vuotuinen muutos lasketaan Yasso07 maaperämallilla, jonka keskeisenä lähtötietona on puuston ja aluskasvillisuuden vuotuinen kariketuotanto, jonka hajoamista simuloidaan mallilla. Kariketuotos arvioidaan puuston määrän, hakkuiden ja luonnonpoistuman avulla ja hajoamiseen vaikuttaa ensi sijassa karikkeen laatu ja lämpötila. Ruotsin käyttämä raportointitapa perustuu toistuviin koko maan kattaviin maaperänäytteenottoihin ja niistä laskettuun maaperän hiilivaraston muutokseen. Ruotsin laskelma perustuu maasta määrävälein kerättyjen maanäytteiden hiilivarastojen välisen mittaamiseen sekä tätä täydentäviin laskelmiin.

Kysymys näiden kahden lähestymistavan eroista ja erojen vaikutuksista tuloksiin on sinänsä relevantti. Tätäkin tärkeämpi näkökulma on perustavanlaatuinen kysymys: Voidaanko metsämaan hiilivaraston muutosta ylipäätään mitata tai mallittaa alueellisesti edustavasti sellaisella tarkkuudella ja halutulla aika-askeleella (yksi vuosi) mitä raportoinnissa käytetään? Maantutkimuksen näkökulmasta asiaa tarkasteltaessa vastaus kysymykseen on melko yksiselitteisesti: ei voida. Lisäksi voidaan perustellusti kysyä, onko vuoden aika-askeleella tapahtuvan raportoinnin tavoittelu ylipäätään mielekästä?



Kuva 17. Suomalaisten kivennäismaametsien maaperän hiilivaraston koko ja koon mittaustulokseen sisältyvä vaihtelu eri kasvupaikattyypeillä (Biosoil, Heikkinen 2008). Tämä varasto on kertynyt maahan jääkauden jälkeen noin 10 000 vuoden aikana. Kuvassa oranssi pylväs (ORG) edustaa maan pinnalla olevaa orgaanisen aineksen muodostamaa humuskerrosta ja vihreät pylväät kivennäismaan pinnasta laskettuja 10 (0–10 ja 10–20) tai 20 cm syvyisiä kerroksia (20–40).

Maan hiilivarastoista ja niiden muutoksesta keskusteltaessa on ratkaisevaa määritellä minkä pituisen aikaikkunan ylitse tarkastelua halutaan tehdä. Jos aikaväli, jota tarkastellaan, on pitkä, erilaiset hiilivaraston muutokseen vaikuttavat tekijät (esim. sään vaihtelu, metsien luontainen häiriödynamiikka, sukkessio, metsätalous) usein tasoittavat toistensa vaikutuksia, ja ilmiöstä saadaan näin melko selkeä yleiskuva. Suomalaisessa metsäekosysteemissä yksi järkevä tarkastelun aikajänne on viimeisestä jääkaudesta kulunut noin 10 000 vuoden aika. Jos oletamme, että maan paljastuessa jään alta siinä oli vain vähän hiiltä, saamme suuruusluokka-arvion hiilen kertymisestä metsämaahan pitkän ajan kuluessa. Eteläisessä Suomessa kivennäismaalla kasvavan metsämaan keskimääräinen hiilivarasto on n. 5 kg C/m² (Kuva 17), pohjoisessa hiekan alhaisempi. Yksinkertaisella jakolaskutoimituksella voidaan tuottaa arvio maan hiilivaraston vuotuisesta muutoksesta, joka näin ollen olisi 0,5 g C/m²/v eli 1/10000 maan hiilivaraston koosta. Laskelma havainnollistaa hiilivaraston muutoksen arvioinnin keskeistä haastetta: keskimääräinen muutos metsämaan hiilivarastossa on pieni ja äärimmäisen vaikea todentaa lyhyellä aikajänteellä.

Tutkimuksen käytössä ei ole mittalaitetta tai menetelmää, jolla maaperän hiilivaraston kokoa, tai sen muutosta voitaisiin mitata maastossa suoraan mitata maata häiritsemättä. Siksi mittaukset tehdään maasta otettavista näytteistä, joiden hiilipitoisuus mitataan laboratorioissa. Tästä seuraa, että seuraavaa mittausta ei voi toteuttaa samasta kohtaa kuin edellinen mittaus tehtiin. Maaperän hiilivarasto on spatiaalisesti ja horisontaalisesti erittäin pienipiirteisesti vaihteleva (Heikkinen 2008). Tästä seuraa, että otokseen perustuvan hiilivaraston kokoa kuvaavan keskiluvun keskihajonta on hyvin suuri eli maan hiilivaraston kokoa ilmaiseva tunnusluku on epätarkka. Siksi yhtä tutkimusmetsää edustava näyte kerätään usean osanäytteen summana.

Kun näytteitä keräämällä saadusta havaintoaineistosta halutaan laskea maan hiilivaraston muutos, toteutetaan samanlainen näytteenkeräys ja analysointi toistamiseen halutun ajanjakson jälkeen. Hiilivaraston muutos lasketaan näiden kahden mittausajankohdan välisenä

erotuksena ja jaetaan tämä luku mittausten välissä olleiden vuosien määrällä (Ruotsissa käytetty tapa). Jotta muutosta kuvaavan erotuksen tilastollista merkitsevyyttä voidaan arvioida, täytyy tuntea keskiarvoestimaatiin lisäksi havainnon taustalla oleva hajonta. Koska hajonta maan hiilivaraston kokoa kuvaavassa mittaustuloksessa on suuri, myös kahden perättäisen mittauksen välillä mitatun eron pitää olla suuri, jotta havaittu ero olisi tilastollisesti merkittävä. Pelkkiä keskiarvoja tarkasteltaessa ylitulkinnan riski muutoksesta ja sen suunnasta on ilmeinen.

Suomen maapinta-alasta noin 1/3 on turvemaita. Turvemaita, joissa hapen puute rajoittaa hajoamista, maaperään kertyy koko ajan lisää biomassaan sitoutunutta hiiltä niin kauan kuin suon vesitalous pysyy sellaisena, että maaperä pysyy hapettomana. Tästä syystä valtaosa maaperämme hiilivarastoista on turpeessa. Turpeen hiilivaraston koon ja sen muutoksen mittaaminen ajassa peräkkäisten näytteiden ottoon perustuen ei ole mahdollista. Siksi soiden hiilivaraston muutoksen arvioiminen kasvihuonekaasu mittauksiin ja mallinnukseen perustuen on vielä kivennäismaakohteitakin epävarmempaa.

Koska maaperän hiilivaraston muutosta kuvaava(t) malli(t) estimoidaan empiirisistä aineistoista, ja verifioidaan niitä vasten, siirtyy mittauksiin liittyvä epävarmuus myös malleihin. Käytettävän mallin tuottama lopputulos on myös aina riippuvainen siitä mitä ilmiöitä malliin valitaan kuvattavaksi, millaisilla syy-seuraus-suhdetta kuvaavilla yhtälöillä näitä ilmiöitä kuvataan ja minkälaisia parametreja malleissa käytetään. Maaperän hiilen määrää ja sen vaihtelua selittäviä/aiheuttavia tekijöitä tunnetaan joissakin spesifeissä tutkimuskohteissa melko hyvin. Työvälineitä sille, että voitaisiin tehdä luotettavia kvantitatiivisia arvioita maan hiilivaraston muutoksesta alueellisesti vuositasolla, ei tunneta siten.

Satelliittimittauksiin perustuvien menetelmien alueellinen mittaustarkkuus on tällä hetkellä sellainen, että niitä ei ole tarkoituksenmukaista käyttää juuri maanosaa pienemmille alueille. Näköpiirissä ei ole kaukokartoitusmenetelmiä, joilla maaperän hiilivaraston muutosta voidaan luotettavasti arvioida.

Tarve maaperän hiilivaraston muutoksen raportointiin valitulla aika-askeleella on täysin poliittinen. Nykyinen raportointikäytäntö perustuu Marrakechin sopimukseen, ja muutokset siinä sovituissa raportointitavoissa vaatisivat uuden kansainvälisen sopimuksen neuvottelemista ja allekirjoittamista. Ilmastonmuutosta hillitsevien toimien ohjaamiseen tällainen raportointitarkkuus ei kuitenkaan ole välttämätöntä, vaan voi päinvastoin olla ilmastotavoitteen saavuttamisen kannalta vahingollinen, jos sitä käytetään sellaisenaan, sen sisältämine epätarkkuuksineen, hiilineutraalisuuden tavoittelemiseksi valittavien toimenpiteiden perustelemiseen. Lisäksi mikäli hiilineutraalisuustavoitteen numeerinen saavuttaminen perustuu näin epävarmaan mittalukuun kuin maaperän hiilivaraston muutos on, ei asetetun ilmastoneutraalisuustavoitteen saavuttamisella sinänsä ole kovin suurta merkitystä.

Pohja oikeille, ilmastonmuutoksen syihin muutosta hillitsevästi vaikuttaville valinnoille saadaan käyttämällä luovasti ja soveltuvien osin mittaukseen ja mallinnukseen perustuvia tapoja tuottaa arvioita maaperän hiilivaraston koon muutoksista, kaasuvuo- ja satelliittimittauksiin perustuvista alueellisista hiilitaseista ja ilmiöiden välisien syy-seuraussuhteiden ja muutoksia ajavien voimien tuntemukseen perustuvasta tieteellisestä tiedosta. Näin toimien ei synny suurta vahinkoa, vaikka jättäisimme täyttämättä itse itsellemme asettamat eksaktit tonnimeräiset raportointitavoitteet.

Kansainvälisessä viitekehyksessä hiilivarastojen muutoksesta on tasavertaisuuden nimissä tärkeää, että kaikki keskusteluun ja päätöksentekoon osallistuvat osapuolet käyttävät vertailukelpoisia menetelmiä.

6.3. Poliittisen ohjauksen mahdollisuudet

Ilkka Leinonen

Hiilinieluilla on poikkeuksellinen rooli Suomen ilmastopolitiikassa, lähes kaikkiin muihin maihin verrattuna. Suomen ilmastolaki edellyttää, että ihmisen toiminnasta aiheutuvat taakanjako- ja päästökauppasektorin yhteenlasketut kasvihuonekaasujen päästöt ilmakehään vähentyvät vuoteen 2030 mennessä vähintään 60 prosenttia ja vuoteen 2040 mennessä vähintään 80 prosenttia verrattuna vuoteen 1990. Tämä tarkoittaa sitä, että vuoden 2035 hiilineutraaliustavoitteet voitaisiin teoriassa saavuttaa kompensoimalla 20–40 % vuoden 1990 päästöstä maankäytön hiilinieluilla. Tämä ilmastolain mahdollistama menettely on johtanut Suomen ilmastopolitiikassa ”hiilinieluriippuvuuteen”, jossa luotetaan ns. hard-to-abate-päästöjen kompensointiin, niiden voimakkaan vähentämisen sijaan. Ilmastolaissa ei kuitenkaan ole asetettu määrällisiä tavoitteita maankäyttösektorille, nieluille, netto nieluille tai poistumille (MMM: Ilmastolain arviointi; maankäyttösektori (käsikirjoitus loppuraporttiin)).

Maankäytön hiilinielut ovat myös osa EU:n hiilineutraaliustavoitteita, tosin ei niin suuressa roolissa kuin Suomen kansallisessa politiikassa.

Miten Suomen ja EU:n ilmastotavoitteet sitten suhteutuvat uusimpaan tieteelliseen tietoon ilmastonmuutoksesta ja sen hillintäkeinoista? Ilmastonmuutostutkijat ovat voimakkaasti korostaneet kahta maankäytön neluihin liittyvää kokonaisuutta, jotka olisi välttämätöntä huomioida ilmastopolitiikassa, nimittäin maankäytön nelujen tuottamien hiilivarastojen väliaikaisuus (Brunner ym. 2024), sekä luontaisten hiilinielujen ja aktiivisten toimien tuottamien hiilinielujen ero (Allen ym. 2025).

Biologisten hiilivarastojen ja ennen kaikkea maankäytön hiilinielujen väliaikaisuus näkyy jo nyt, hyvin lyhyellä aikavälillä, sekä Suomen että EU:n ilmastotavoitteiden toteutumisessa. Vasta muutama vuosi sitten asetetut Suomen kansalliset ilmastotavoitteet perustuivat jo lähtökohtaisesti virheellisiin oletuksiin puuston kasvusta ja maaperän hiilinielujen pysyvyydestä. Tavoitteiden taustalla oli ajatus, että kiihtyvä metsien kasvu riittää ylläpitämään sekä korkean puuntuotannon että pysyvän maankäytön hiilinielun. Edellä kuvattu, skenaariomalleihin sisällytynyt huomattava yliarvio puuston kasvupotentiaalista oli merkittävä tekijä silloisissa nieluarvioissa. Todellisuudessa kuitenkin VMI-tulokset, niihin perustuvat ikäluokkalaskelmat, kuten myös MELA-mallin uuden alkupuuston tuottamismallia käyttäen saadut kasvuennusteet (ks. Skenaariolaskennat yllä) osoittavat metsien kasvunopeuden vakiintumisen. Tämä johtaa siihen, että kasvun ja poistuman välinen ero (eli puuston nielu) pienenee jatkuvasti. Samoin kuin yksittäisen metsikön tasolla, myös valtakunnan tasolla tietyn ikävaiheen jälkeen puuston määrän kasvu hidastuu jatkuvasti, ja samalla puuston hiilinielu pienenee. Puuston hiilinielun pysyminen vakiotasolla vaatisi siis puuston määrän jatkuvaa lisääntymistä tasaisella nopeudella, mikä ei ole edes teoriassa mahdollista.

Samalla tavoin kuin puuston nielu, myös maaperän nielu yliarvioitiin ilmastotavoitteita asetettaessa. Maaperän hiilinielun säilyminen vaatisi karikesyötteen jatkuvaa kasvua, tai vaihtoehtoisesti hajotusnopeuden hidastumista. Siksi kangasmaiden maaperän hiilinielu nollautui, kun

puuston kasvunopeus vakiintui, jolloin myös karikesyötteen kasvu pysähtyi. Maaperän hiilivaraston pieneneminen voi jatkua vielä entisestään ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta. VMI:n mukaan puiden latvukset ovat ajan kuluessa lyhentyneet. Tämä muutos voi olla seurausta metsien käsittelystä tai geneettisestä muutoksesta (jalostus). Muutoksen seurauksena pienentynyt kariketuoanto voi johtaa entistä pienempään maaperän hiilivarastoon.

Ehkä suurin virhe ilmastotavoitteita asetettaessa tehtiin kuitenkin siinä, että ne perustuivat epävarmoihin ennusteisiin, joissa turvemaiden päästöjen kasvu aliarvioitiin verrattuna siihen mitä nykyiset mallit ennustavat. Tavoitteiden asettamisen aikana käytössä ollut maaperämalli ennusti, että turvemaiden päästöt pienenevät jatkuvasti lämpötilan kohoamisesta huolimatta. Uusi, nyt käytössä oleva malli, joka perustuu laajempaan mittausaineistoon osoittaa kuitenkin täysin päinvastaista trendiä. Kuten yllä oleva kuva 11 osoittaa, jo pelkästään nykytilanteessa (vuoden 2023 inventaario) laskentatavan muutos on tuottanut 7 Mt CO₂ suuremman vuosittaisen turvemaiden päästön aikaisempiin ennusteisiin verrattuna. Tämän eron odotetaan kasvavan tulevaisuudessa, kun lämpötila jatkaa kohoamistaan. On kuitenkin huomattava, että turvemaiden maaperäpäästöjen laskennallisiin arvioihin sisältyy suuria epävarmuuksia.

Turvemaiden hiilidynamiikka poikkeaa kivennäismaista. Ojitettujen soiden maaperäpäästöjä voidaan verrata suoraan fossiilisiin päästöihin, ne jatkuvat merkittävänä vuosi toisensa jälkeen, kunnes merkittävän suuri turpeen hiilivarasto on kokonaan ilmakehässä. Tästä syystä metsänhoidon keinoja ja aktiivista vesienhallintaa tulisi kohdentaa erityisesti ojitetuille turvemaille, kun pyritään maankäytön keinoin hidastamaan ilmastonmuutosta (Väänänen ym. 2025). On kuitenkin syytä muistaa, että uusimmat, esim. Luken tekemät tutkimukset osoittavat, että saattaa kestää satoja vuosia, ennen kuin ennallistetut turvemaat muuttuvat päästölähteistä hiilinieluiksi, ja alkuvaiheessa päästöt jopa lisääntyvät lisääntyvän metaanintuotannon vuoksi (Launiainen ym. 2025).

Virhearviot metsien hiilinielujen pysyvyydestä eivät suinkaan rajoitu Suomen kansalliseen ilmastopolitiikkaan, vaan virheellisiä ennusteita tehtiin myös EU:n ilmastotavoitteita asetettaessa. Tässäkin tapauksessa siitä syystä, että metsien kasvudynamiikkaa ei huomioitu, vaikka hiilivarastojen saturoitumisesta oli jo olemassa tietoa (Nabuurs ym. 2013). Nyt EU:ssa on kuitenkin havaittavissa ilmastopolitiikan korjausliikkeitä, esimerkkinä panostaminen teknologisten hiilinielujen tuottamiseen. Teknologiset hiilinielut, toisin kuin maankäytön nielut, pystyvät tuottamaan pysyviä tai pitkäikäisiä hiilivarastoja, ja siksi nämä nielut, toisin kuin maankäytön nielut, ovat yhteismitallisia fossiilisten päästövähennysten kanssa. Fossiiliset päästöt pysyvät ilmakehässä tuhansia vuosia, ja niitä voidaan kompensoida pelkästään pysyvillä hiilenpoistoilla. Sen sijaan maankäytön nieluilla voidaan kompensoida pelkästään maankäytön muutosten tuottamia CO₂-päästöjä sekä lyhytikäisen kasvihuonekaasun metaanin päästöjä (Allen ym. 2025).

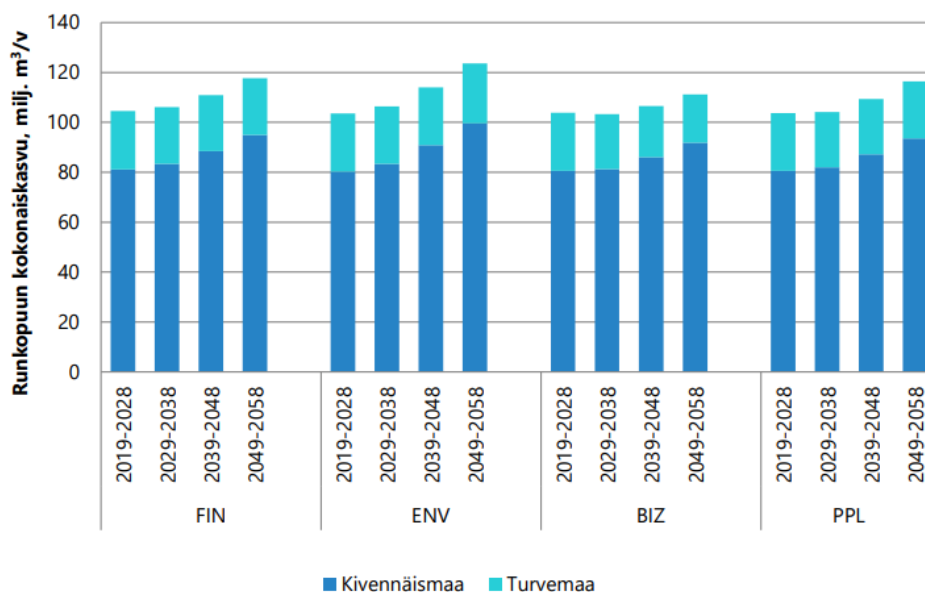
Toinen ilmastonmuutostutkijoiden esille nostama ilmastopoliittinen epäkohta on se, että ns. luontaisia nieluja ja aktiivisesti tuotettuja maankäytön nieluja ei ole pystytty täysin erottamaan toisistaan. Luontaiset nielut ovat seurausta ympäristötekijöistä, kuten ilmakehän kohonneesta CO₂-pitoisuudesta ja pidentyneestä kasvukaudesta, ja näihin tekijöihin ei kansallisilla toimilla pystytä vaikuttamaan.

Lienee itsestään selvää, että tavoitteita asetettaessa tavoitteiden tulisi olla sellaisia, että ne myös pystytään toteuttamaan. Siksi kaikki toimenpiteistä riippumattomat tekijät (kuten ilmastonmuutoksen vaikutukset) olisi perusteltua rajata tavoitteiden ulkopuolelle, tai ainakin

tavoitteet pitäisi pyrkiä asettamaan niin, että ulkoisten tekijöiden vaikutus minimoituu. Esimerkiksi metsien nielutavoitteissa pitäisi huomioida pelkästään aktiivisten metsänhoitotoimenpiteiden tuottama nieluvaikutus. Suomessa tämä lieneekin aika pitkälle toteutunut, sillä nykyiset, KHK-inventaariossa mitatut puuston nielut ovat lähinnä seurausta aktiivisista toimista kuten vajaatuottoisten metsien uudistaminen, turvemaiden metsittäminen ja metsänhoidon paraneminen, mukaan lukien lannoitukset ja metsänjalostus. On kuitenkin todennäköistä, että osa nielusta on seurausta kasvukauden pitenemisen tuottamasta kasvunlisäyksestä ja CO₂-lannoitusvaikutuksesta (esim. Henttonen ym. 2017).

Myös ojitettujen soiden merkittävät maaperäpäästöt ovat seurausta ihmistoiminnasta, eli ojitamisesta. Samoin kuin puuston hiilinielun tapauksessa, ympäristötekijät vaikuttavat myös maaperän hiilitaseeseen. Itse asiassa Suomen turvemaiden laskennallisten päästöjen voimakas kasvu onkin suurelta osalta seurausta lämpötilan kohoamisesta (kuva 11) ja puuston vartumisesta seuranneesta karikesyötteen vakiintumisesta, ei toimenpiteiden muutoksesta. Suomen KHK-inventaariossa luonnontilaisten soiden maaperän rajaaminen laskentojen ulkopuolelle on yksi yritys erottaa toimenpiteiden vaikutus ympäristötekijöistä, mutta lämpötilan osalta se ei ole riittävä, koska lämpeneminen vaikuttaa myös käsiteltyihin soihin. Monissa maissa, kuten Ruotsissa, toimenpiteiden vaikutus erottuu ikään kuin itsestään, koska näiden maiden käyttämä IPCC Tier 1 -menetelmä ei huomioi lämpötilan muutosten vaikutusta, vaan pelkästään aktiiviset toimenpiteet (ojitettujen turvemaiden pinta-alan muutokset). Toisaalta ei ole myöskään mitään estettä, etteikö toimenpiteiden vaikutusta pystyittäisi erittelemään myös Tier 3 -malleilla, ja jopa tarkemmin kuin karkealla Tier 2 -menetelmällä.

Mikä on siis perimmäinen syy nielutavoitteiden asettamisen epäonnistumiseen, ja miten asia voitaisiin korjata? Tärkeimmät syyt virheellisiin ennusteisiin liittyvät inventaariomenetelmien epävarmuuteen sekä tulevaisuuteen suuntautuvien skenaarioiden virheelliseen tulkintaan ja soveltamiseen. Skenaariolaskentojen ongelmallisuutta ilmastopolitiikan työvälineenä voidaan havainnollistaa esimerkkilaskelmien avulla. Esimerkiksi KEITO-hankkeen alhaisimman hakkuutaso skenaariot ennustavat metsien kasvun kohoavan n. 120 Mm³/v tasolle jaksolle 2049–2058 mentäessä (Kuva 18). Tämä ennuste on seurausta edellä kuvatusta MELA-mallin vanhasta aineistonmuodostusmenetelmästä. Uusimmat valtakunnan metsien inventoinnin tulokset, kuten myös ikäluokkasimulaattorilla tehdyt tarkastelut osoittavat, että Suomen metsien kasvu on vakiintunut n. 100 Mm³/v tasolle, ja tässä raportissa esitetyt uusimmat skenaariot ennustavat kasvun laskevan 2050-luvulla jopa 95 miljoonan kuutiometrin tasolle. MELA-mallin aineistonmuodostusmenetelmä on juuri muutettu (ks luku 5.2 ja Taulukko 6), mutta aikaisemman mallin virheelliset kasvuennusteet näkyvät edelleen KEITO-skenaarion tuloksissa (Kuva 18). Taulukossa 6 esitetyt tulokset osoittavat esimerkiksi SY4%-laskelmalle 8,8 Mm³/v suuruisen eron kasvuennusteissa vuosille 2041–2050 uuden ja vanhan aineistonmuodostusmenetelmän välillä. Tämä tarkoittaa n. 13 Mt CO₂ yliarviota puuston hiilinielun suuruudelle.



Kuva 18. MELA-mallin ennustama puuston kasvun kehitys KEITO-skenaarioissa (Koljonen ym. 2025b), joissa laskenta-aineisto laadittiin vanhan aineistonmuodostusmenetelmän avulla.

Virhe puuston kasvun ennustamisessa tuottaa suoraan virheen myös maaperän hiilinielujen ennusteisiin. MELA-mallin ennustama puuston kasvun kiihtyminen johtaa siihen, että Yasso-malli ennustaa myös kivennäismaiden maaperän muuttuvan miljoonien tonniin hiilinieluksi. Kuitenkin, kuten edellä mainittiin, uusimmat KHK-inventaarion tulokset osoittavat, että kivennäismaiden maaperän hiilivarasto on jo nyt lähellä tasapainotilaa, eli maaperän hiilinielu on suurin piirtein nolla. Tämä taas johtuu puuston kasvunopeuden ja karikesyötteen vakiintumisesta. Jos puuston kasvu ei ala uudestaan kiihtymään, kivennäismaiden hiilinielu jää pysyvästi lähelle nollaa.

Turvemaiden päästöennusteet tuottavat myös merkittävän lisävirheen skenaarioihin. Nyt skenaarioissa käytetään viimeisen 10 vuoden lämpötilakeskiarvoa maaperämallin syötteenä. Koska lämpötila on kohonnut jatkuvasti, skenaariomalli tuottaa jo nykytilanteessa n. 5 Mt CO₂ aliarvion turvemaiden maaperän päästöissä. Koska lämpötilan kohoamisen ennustetaan jatkuvan, tämä virhe voi pelkästään kasvaa tulevaisuuden skenaarioissa. Jotta lämpötilan kohoaminen voitaisiin huomioida skenaarioissa, vähimmäisvaatimuksena olisi eri RCP-skenaarioiden soveltaminen, skenaarioiden epävarmuudet huomioon ottaen.

Edellä mainitut kolme tekijää, puuston kasvun yliarvio, siitä johtuva kivennäismaiden maaperän hiilinielun yliarvio, sekä lämpötilan kohoamisen huomiotta jättäminen turvemaiden päästöennusteissa, tuottavat kymmenien miljoonien hiilidioksiditonniin systemaattisen virheen, eli tässä tapauksessa yliarvion, tulevaisuuden nieluennusteisiin. Tämän lisäksi skenaariot eivät huomioi mahdollisten metsätuhojen vaikutusta, minkä vuoksi mikä tahansa laajamittainen metsätuho kasvattaa hiilinielun yliarviota entisestään (esim. Korosuo ym. 2023). Metsätuhot lisäävät puuston poistumaa, lisäävät kuolleen puun määrää, mikä kasvattaa maaperän päästöjä, ja lyhyellä aikavälillä myös heikentävät puuston kasvua. Tämän systemaattisen virheen lisäksi epävarmuudet inventaariomenetelmissä tuottavat nieluennusteisiin miljoonien tonniin satunnaisvirheen. Esimerkiksi nykyisin käytössä olevan turvemaiden maaperämallin soveltamiseen käytetystä aineistosta johtuva epävarmuus on kymmenen miljoonan CO₂-tonnin

luokkaa, ja kuten edellä osoitettiin, puuston kasvusimulaattorissa käytettävien biomassaker-
toimien valinta tuottaa jo yksistään nieluennusteisiin yli kymmenen miljoonan tonnin vaihte-
lun.

Tässä raportissa tehty tarkastelu tuottaa hyvin yksiselitteisen johtopäätöksen. Skenaariot eivät
ole ennusteita, skenaariolaskentoihin, virheellisesti pysyviksi oletettuihin historiallisiin trendei-
hin tai puutteellisiin mallilaskelmiin perustuvat absoluuttiset hiilinieluennusteet eivät sovellu
maankäytön ilmastotavoitteiden asettamiseen, eivätkä KHK-inventaarioon perustuvat nieluar-
viot sovellu absoluuttisten ilmastotavoitteiden seuraamiseen. Tämä ei suinkaan tarkoita sitä,
että maankäyttö pitäisi rajata ilmastotavoitteiden ulkopuolelle, tai että LULUC-inventaariolla
ei olisi käyttöä ilmastotoimien toteuttamisessa. Maankäyttö on tärkeää saada mahdollisim-
man tehokkaaksi osaksi ilmastotoimia, mutta tämä vaatii täydellistä lähestymistavan muu-
tosta tavoitteiden asettamisessa ja niiden seuraamisessa. Seuraavassa esitetään ratkaisuja,
joilla nykyisen ilmastopolitiikan epäkohdat voitaisiin korjata.

Ehkä tärkein ilmastomuutostutkijoiden esille nostama muutos mikä nykyiseen ilmastopoli-
tiikkaan tarvitaan, on se, että ilmastotavoitteissa erotetaan toisistaan 1) päästövähennykset, 2)
pysyvät hiilenpoistot (teknologiset nielut) ja 3) tilapäiset hiilenpoistot (maankäytön nielut) (Al-
len ym. 2025). Tämä erittely on välttämätöntä jo pelkästään tieteellisillä perusteilla: maankäy-
tön nielujen tuottama tilapäinen hiilivarasto ei ole yhteismitallinen pysyvän ilmastovaikutuk-
sen tuottavien fossiilisten päästöjen kanssa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että valtioiden
täytyy panostaa entistä enemmän fossiilisen energian alasajoon, koska fossiilisia päästöjä ei
voida kompensoida metsien nieluilla. Fossiilisten päästöjen nopea vähentäminen ja lopulta
täydellinen luopuminen fossiilisista polttoaineista on täysin välttämätöntä ilmastomuutok-
sen pysäyttämiseksi, ja myös pelkästään tästä syystä erillisten, hiilenpoistoista riippumatto-
mien tavoitteiden asettaminen fossiilisille päästövähennyksille on perusteltua.

Toinen syy siihen miksi maankäytön nielut eivät sovellu osaksi kansallisia hiilineutraaliusta-
voitteita on niiden massiivinen epävarmuus. Jos nieluennusteet tuottavat edellä kuvatun kym-
menien megatonniin systemaattisen virheen, ja/tai vastavan satunnaisvirheen, on selvää, että
niiden varaan ei voi rakentaa hiilineutraaliustavoitteita, edes pieneltä osalta. Ainoastaan sellai-
set maankäytön osa-alueet, joiden kehitys voidaan mitata tai mallintaa tarkasti, ja joiden
muutokset voidaan osoittaa pelkästään toimenpiteistä riippuviksi, on tieteellisesti perusteltua
sisällyttää ilmastotavoitteisiin.

Maankäytön nieluille tarvitaan siis omat, erilliset tavoitteet, jotka, kuten edellä mainittiin, ovat
irrallaan esim. fossiilisten päästöjen vähentämistavoitteesta ja pysyville hiilenpoistoille asetet-
tavista tavoitteista. Nämä tavoitteet on alusta lähtien asetettava sellaisiksi, että 1) ne voidaan
toteuttaa, 2) niiden kansallinen nieluvaikutus tai päästövähennysvaikutus voidaan määrittää
riittäväällä tarkkuudella, ja 3) niiden toteuttamista voidaan seurata. Tavoitteiden lähtökohta pi-
täisi olla se, että ensin kartoitetaan ne maankäytön toimenpiteet, joilla ilmastomuutosta voi-
daan parhaiten hillitä, myös kustannustehokkuus huomioiden. Näille asetetaan sitten omat
tavoitteet, kullekin toimenpiteelle erikseen. Tämä lähestymistapa on yhdenmukainen valtio-
neuvoston hyväksymän ilmastolain mukaisen maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman
kanssa (MMM: Ilmastolain arviointi; maankäyttösektori (käsi- ja kirjallisuus loppuraporttiin)). Myös
esim. EU:n CRCF-asetus pyrkii asettamaan selkeitä, mitattavuutta, lisäisyyttä, pysyvyyttä ja
kestävyyttä koskevia kriteereitä maankäytön ilmastotoimille, jotka ovat osa kansallisia ilmas-
totavoitteita.

Erillisten, maankäyttötoimille asetettavien tavoitteiden myötä myös KHK-inventaarion tehtävä täsmentyisi: kyse olisi siitä, miten eri toimenpiteiden toteuttaminen etenee, ja miten suuri ilmastovaikutus näillä on saavutettu kansallisella tasolla, sen sijaan että pyrittäisiin pelkästään mittaamaan kaikki mahdolliset päästöt ja nielut mahdollisimman suurella tarkkuudella. Nykyinen KHK-laskenta perustuu kansainvälisiin sopimuksiin sekä IPCC:n ohjeistukseen. Siten kansallisille laskennan muutoksille on vain hyvin rajalliset mahdollisuudet. Sen sijaan kansallisesti voidaan päättää, miten KHK-inventaarion ja skenaarioiden tuloksia hyödynnetään kansallisessa politiikassa.

7. Johtopäätökset

Kasvihuonekaasujen mittaukset ilmakehästä satelliittien ja korkeiden tornien avulla ovat globaalisti aktiivisen kehitystyön kohteena. Tulevaisuudessa ilmakehämittauksiin perustuvien ns. inversiomenetelmien hyödyntäminen kasvihuonekaasulaskennan validoinnissa on varteenotettava mahdollisuus. Nykymuotoisen raportointivelvoitteen täyttämisen näiden menetelmien avulla ei kuitenkaan ole mahdollista.

Maaperän osalta Suomi käyttää KHKI-laskennassa matemaattisia malleja, kun esimerkiksi Ruotsi on perustanut raportointinsa toistuvista maaperämittauksista laskettuun maaperän hiilivaraston muutokseen. Ruotsissa mittauksiin turvautuminen on mahdollista, koska maaperäinventoinneista oli jo olemassa aikasarja silloin, kun kasvihuonekaasuinventoinnin raportointi aloitettiin. Suomessa vastaavan menetelmän käyttöönotto ei ollut mahdollinen, koska maaperämittausaineistoja oli olemassa vain 631 koealalta vuosilta 1985–1986 ja 2006–2007 (Biosoil). Maaperämalliin turvautuminen oli siis käytännössä välttämätöntä. Biosoil-koealat on mitattu uudestaan (Komeetta 2024), ja uusintamittauksia on tarkoitus soveltaa HIKET-hankkeessa maaperämallien testaamiseen ja validointiin.

Valitusta laskentamenetelmästä johtuvaa eroa merkittävämpi ero Suomen ja Ruotsin välisissä tuloksissa syntyy todennäköisesti kuitenkin Ruotsin käyttämästä voimakkaasta keskiarvoistamisesta (maaperän hiilivaraston muutoksena raportoidaan koko tarkastelukauden keskimääräinen trendi) verrattuna Suomeen (raportoidaan viiden vuoden liukuva keskiarvo). Myös hakuiden raportoinnissa Ruotsin malli on voimakkaasti keskiarvoistava, koska se perustuu VMI-mittauksiin eikä tilastoihin.

Suometsien maaperäpäästöjen arvioinnissa erilaiset mallit ovat tällä hetkellä ainoa käyttökelpoinen vaihtoehto. Suomi on voinut valita vain sen, käytetäänkö oletuskertoimia kuten Ruotsissa (jolloin esim. lämpötilan muutos ei vaikuta laskennallisiin päästöihin), vai laaditaanko kansallinen malli. Tällä hetkellä käytössä oleva kansallinen Tier 3 malli perustuu parhaaseen käytettävissä olevaan, mutta pieneen (68 koealaa, Ojanen ym., 2010) aineistoon ja menetelmiin. On epäselvää, onko mallin lämpötilariippuvuus edustava tai kuvaako puuston pohjapinta-ala hajotuksen todellista riippuvuutta pohjaveden pinnan tasosta. Käytettävä menetelmä on myös herkkä mahdollisille epävarmuuksille mm. karikesyötteen määrässä ja trendeissä, sillä menetelmässä turpeen ja karikkeen hajotus ei riipu hiilivaraston koosta kuten kivennäismailla.

HIKET-hankkeessa (2025–2027) turvemaiden maaperämallinnusta arvioidaan tarkemmin. Hankkeessa selvitetään, onko vedenpinnan taso ojitetuilla soilla mahdollista luotettavasti rekonstruoida koko KHK-inventaarion tarkastelujaksolle (1990-). Turvemaiden maaperämallinnusta kehitetään huomioimalla pohjaveden pinnan tason vaikutus turpeen hajotukseen, ja erottamalla turpeen ja ojituksen jälkeen syntyneen puuston ja aluskasvillisuuden karikkeen hajoaminen. HIKET-hankkeen yhtenä tavoitteena on luoda rakenteeltaan luotettava ja kivennäismaiden maaperämallin kanssa mahdollisimman yhtenevä kuvaus ojitettujen suometsien maaperän hiilitaseelle. Turvemaiden maaperäpäästöjä on Ojasen ym. (2010, 2014) kokeiden jälkeen mitattu lukuisissa tutkimushankkeissa. HIKET – hankkeessa olemassa olevat aineistot koostetaan yhteen, ja uutta maaperämallia testataan kattavampaa aineistoa vastaan. Ojasen ym. (2014) aineiston lisäksi tarvitaan mittauksia myös erilaisten hakkuiden jälkeisestä tilanteesta. Jotta turpeen hajoamisen riippuvuus vedenpinnan tasosta, kasvupaikkatyypistä ja

esim. erilaisten kasvatusketjujen ja vesienhallinnan vaikutus saataisiin kuvattua, tarvitaan jatkossa myös uutta, entistä kattavampaa tutkimusta ja seuranta.

Yasso-mallista on olemassa useita versioita, joita on useaan otteeseen verrattu maaperämittauksiin, eikä merkitseviä eroja ole löytynyt. Tärkeää on kuitenkin huomata, että epävarmuudet sekä mallituloksissa että mittauksissa ovat olleet suuria. Tämän työn tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että olisi tärkeää verrata eri malleja ja malliversioita toistettuihin maaperämittauksiin, erityisesti koska aikaisemmasta Rantakari ym. (2012) vertailusta on jo kulunut yli kymmenen vuotta. Lisäksi olisi syytä arvioida, voidaanko KHK-inventaariossa käytettyä maaperämallia parametrizoida siten, että valittu malli perustuisi boreaalisiin aineistoihin, ja soveltuisi sekä metsä- että maatalousmaalle. Tällä hetkellä Yasso07 maaperämallia sovelletaan KHK-inventaarioissa eri parametrisaatioilla metsä- ja maatalousmaalla, mikä on ongelmallista erityisesti tilanteessa, jossa maankäyttö muuttuu näiden maankäyttöluokkien välillä. Maaperämallien ja eri versioiden vertaaminen toistettuihin maaperämittauksiin (esim. Biosoil 2006/2007 ja Komeetta 2024) mahdollistaa myös sen, että voidaan arvioida kuinka eri mallirakenteet ja -oletukset vaikuttavat KHK-inventaarion tuloksiin. Maaperämallien jatkokehityksessä tulee huomioida KHK-inventaarion parantaminen siten, että erilaisten ilmastotoimien vaikutukset pystytään todentamaan. Näitä ovat esimerkiksi suometsien tai turvepeltojen vesienhallinnan vaikutukset päästöihin.

Mallin soveltamisessa on todennettuja puutteita esimerkiksi siinä, kuinka pystyssä olevat kuolleet puut ja niiden hajoaminen huomioidaan, mutta laskentaa on mahdollista kehittää käyttämällä aiempaa paremmin VMI:ssä tehdyt mittaukset kuolleista pysty- ja maapuista hyödyksi. Laskennan kehitystyöhön menee aikaa arviolta useita kuukausia – vuosi, koska mitattujen puiden käyttäminen vaatii niiden lahoasteen ja sen kautta sitoutuneen hiilen määrän laskennan kehittämistä.

Kasvihuonekaasuinventaariorissa on kullakin ajanhetkellä sovellettu luotettavinta käytössä ollut biomassamallia, ja uudet biomassamallit on juuri otettu käyttöön (Repola ym. 2025, käsikirjoitus). KHK-inventaarion nykyisen menetelmän analyysin (Liite A) perusteella maanalaisen biomassan määrän arvio on varsin epävarma. Tämä johtuu juuriaineistojen pienestä määrästä puuston biomassamallien laadinta-aineistoissa (Repola ym. 2025, käsikirjoitus). Epävarmuuden arviointimenetelmiä on tämän hankkeen puitteissa kehitetty kivennäismaiden maaperälaskennan osalta (Liite A). Epävarmuusanalyysia voitaisiin kuitenkin vielä tarkentaa korvaamalla nykyisin käytössä oleva puuston vuosittaisen poistuman määrän epävarmuuden asiantuntija-arvio ($U = 5\%$) VMI:n pysyvien koalojen toistomittauksiin perustuvalla arviolla, lisäämällä analyysiin epävarmuusarvio siihen liittyen, miten poistuma jakautuu kivennäis- ja turve- maalle, sekä kehittämällä menetelmää niin, että koko metsämaan hiilitaseen epävarmuusarviossa voidaan ottaa huomioon elävän puuston ja maaperän tasearvioiden väliset korrelaatiot, jotka johtuvat siitä, että kaikissa arvioissa käytetään samoja VMI-mittauksia ja biomassamalleja. Työ on käynnissä SEULA- ja HIKET-hankkeissa.

KHK-inventaarion laskentamalliin liittyy joitakin varsin vahvoja rakenteellisia oletuksia, joihin liittyvä epävarmuus ei sisälly – eikä voi sisältyä – laskennalliseen epävarmuusanalyysiin. Edellä mainitun turvemaamalliin liittyvän rakenteellisen epävarmuuden ohella merkittäviä ovat oletukset siitä, että puuston biomassallokaatiossa ja kariketuoannossa tai aluskasvillisuuden karikkeen määrässä ei ole merkittävää ajallista muutosta; ks. esim. Kuva A4. Näiden inventaarion komponenttien pitkän aikavälin muutosten arviointiin on vaikea löytää riittäviä aineistoja, koska merkittävä määrä karikesadannan seurannan koaloista on lopetettu, mutta

aluskasvillisuuden kariketuotannon muutoksia olisi mahdollista analysoida neljän valtakunnallisen kasvillisuusinventoinnin (1951–1953, 1985–1986, 1995 ja 2021–2023) aineistojen avulla.

Tulevaisuutta koskevien skenaariolaskelmien suurin ongelma, joka johti kasvuennusteiden yliarvioihin, liittyi alkupuuston tuottamismenetelmään. Aiemmalla tavalla tuotettu alkupuusto oli alueellisesti harhaton, mutta yksittäisten koealojen kohdalla se johti puuston tiheyden aliarviointiin. Uusi alkupuuston tuottamismenetelmä on otettu käyttöön, mutta korjauksen kaikkia vaikutuksia, kuten vaikutuksia hakkuuehdotuksiin ja sitä kautta myös hiilinieluihin, ei ole vielä kunnolla analysoitu. Näiden vaikutusten arvioimiseksi ja mahdollisten vielä havaitsemattomien puutteiden korjaamiseksi on tarpeen tehdä erillinen, systemaattisempi herkkyyshanalyysi, jonka toteuttaminen kestää arviolta vuoden.

Koska MELA-ohjelmistossa on ollut käytössä eri biomassamalli kuin KHK-laskennassa, KHK-inventaarion ja skenaarioiden välillä on ollut epälooginen hyppäys aikasarjoissa, joka on vaikuttanut myös maaperälaskentaan. Hyppäyksen poistamiseksi skenaariolaskennassa siirryttiin KEITO-hankkeen (Koljonen ym.2025a) laskelmissa käyttämään samoja, VMI:n koepuiden biomassan ja tilavuuden suhteesta laskettuja biomassakertoimia kuin KHK-laskennassa. Nyt käynnissä on testit läpimittaluokittaisilla biomassakertoimilla, joilla voidaan ottaa huomioon puuston läpimittajakauma ja sen muuttuminen skenaarion laskentajaksolla.

Tämän tutkimuksen perusteella käytettyjen mallien rakenteelliset epävarmuudet (erityisesti maaperämalleissa) ja systemaattiset virheet mallien lähtötiedoissa ovat päätöksenteon kannalta kaikkein merkittävimmät ongelmat. Kasvun selkeä yliarvioiminen MELA-ohjelmiston lähtöpuuston muodostamismenetelmän virheen vuoksi on voinut johtaa ylioptimistisuuteen hiilinielupolitiikassa. Lämpötilan vaikutuksen mahdollisen yliarvion vaikutukset turvemaiden päästöihin olisivat myös erittäin merkittävät, jos yliarvio osoittautuu todelliseksi. Siksi mahdollinen yliarvio on perusteellisesti selvitettävä.

Päätöksenteon kannalta ongelmallisia ovat myös laskentamallien ja -parametrien muutokset ajassa. Esimerkiksi KHK-laskennassa jokainen menetelmämuutos vaikuttaa myös menneiden vuosien tuloksiin, eli tavoitteita asetettaessa vallinnut lähtötilannekin voi menetelmän vaihtuessa muuttua. Tällöin arviot esimerkiksi politiikkatoimien vaikutuksista voivat pahimmillaan vaihtua jokaisen erillisen muutoksen seurauksena, eikä muutoksilta jatkossakaan voida välttyä. Kaikki skenaariolaskennassa käytetyt mallit ja simulointisysteemit ovat erittäin herkkiä mallien tai parametrien muutoksille, koska niiden aiheuttama muutos tuloksissa on samantyyppinen kuin systemaattisilla virheillä: kun mitä tahansa käytettyä mallia tai parametria muokataan, vaikutus näkyy laskennassa täsmälleen samalla tavoin kaikilla koealoilla ja kaikilla laskentakausilla. Siksi systemaattinen ja kattava herkkyyshanalyysi esimerkiksi MELA-ohjelmiston laskentaparametrien vaikutuksista laskentaan olisi tarpeellinen. Tällainen herkkyyshanalyysi vaatisi vähintään puolen vuoden / vuoden työpanoksen, ja tarkempi mallien validointi noin 3 vuoden työpanoksen.

Satunnaiset epävarmuudet esimerkiksi maaperämittauksissa tai maaperämallien parametreissa ovat merkittäviä silloin, kun nielu/päästöt ovat niin pieniä, etteivät epävarmuudet anna mahdollisuutta sanoa, onko maaperä todellisuudessa nielu vai päästö, kuten viime vuosina on ollut. Kun käytetyt mallit eivät muutu, satunnaisten virheiden vaikutus politiikkatoimien vaikutavuuden arviointiin on kuitenkin pieni.

Metsämaan suuri pinta-ala yhdistettynä laskentamenetelmien epävarmuuteen tekee metsämaan (puusto + maaperä) hiilitaseiden arvioista epävarmoja. Monilta osin epävarmuudet ovat niin suuria, että täsmällisten numeeristen tavoitteiden (kuten hiilineutraalisuustavoite) asettaminen ja asetettujen tavoitteiden toteutumisen seuraaminen on hyvin hankalaa. Kun hiilineutraalisuus laskennallisesti saavutetaan, epävarmuuksien vuoksi todellinen hiilineutraalisuuden saavuttamishetki voi olla vuosia tätä ajankohtaa aiemmin tai myöhemmin. Epävarmuuksista huolimatta hiilinielulaskennat kuitenkin ovat ainoa järkevä työkalu siihen, että osataan kohdentaa ilmastotoimia järkevästi – joko metsänhoidollisiin toimiin tai teknisiin nieluihin. Kun eri komponentteja seurataan erillisinä, voidaan tehdä ilmastotoimien onnistumisesta tai epäonnistumisesta päätelmiä, vaikka kokonaisuus onkin epävarma.

Nykyinen KHK-laskenta perustuu kansainvälisiin sopimuksiin sekä IPCC:n ohjeistukseen. Siten kansallisen laskennan muutoksille on vain hyvin rajalliset mahdollisuudet. Sen sijaan kansallisesti voidaan päättää, miten KHK-inventaarion ja skenaarioiden tuloksia hyödynnetään kansallisessa politiikassa. Ilmastopolitiikkaan sisältyville maankäytön nieluille tarvitaan omat, erilliset tavoitteet, jotka ovat irrallaan fossiilisten päästöjen vähentämistavoitteesta ja pysyville hiilenpoistoille asetettavista tavoitteista. Nämä tavoitteet on alusta lähtien asetettava sellaisiksi, että ne voidaan toteuttaa, niiden kansallinen nieluvaikutus tai päästövähennysvaikutus voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella, ja niiden toteuttamista voidaan seurata riittävällä tarkkuudella.

Kiitokset

Kiitokset monista työn selkeyttä ja ymmärrettävyyttä parantavista korjausehdotuksista ja erityiskiitokset virheiden ja epäselvyyksien osoittamisesta Mikko Kurttilalle, Samuli Launiaiselle, Juha Mikolalle, Antti Mutaselle ja Tuula Packalenille. Ilman apuanne raportista olisi tullut paljon huonompi.

Viitteet

- Aakkula, J., Asikainen, A., Kohl, J., Lehtonen, A., Lehtonen, H., Ollila, P., Regina, K., Salminen, O., Sievänen, R. & Tuomainen T. 2019. Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 20/2019. 70 s. ISBN 978-952-287-650-8 (pdf). ISSN 2342-6799 (pdf). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-650-8>
- Allen, M.R., Frame, D.J., Friedlingstein, P., Gillet, N.P., Grassi, G., Gregory, J.M., Hare, W., House, J., Huntingford, C., Jenkins, S., Jones, C.D., Knutti, R., Lowe, J.A., Matthews, H.D., Meinshausen, N., Peters, G.P., Plattner, G.-K., Raper, S., Rogelj, J., Stott, P.A., Solomon, S., Stocker, T.F., Weaver, A.J. & Zickfeld, K. 2025. Geological Net Zero and the need for disaggregated accounting for carbon sinks. *Nature* 638: 343–350. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08326-8>
- Alm, J., Wall, A., Myllykangas, JP, Ojanen, P., Heikkinen, J., Henttonen, H.M. Laiho, R., Minkkinen, K., Tuomainen, T., & Mikola J. 2023. A new method for estimating carbon dioxide emissions from drained peatland forest soils for the greenhouse gas inventory of Finland. *Biogeosciences* 20(18): 3827–3855.
- Andrén, O. & Kätterer, T. 1997. ICBM: The Introductory Carbon Balance Model for Exploration of Soil Carbon Balances. *Ecological Applications* 7(4): 1226–1236. <https://doi.org/10.2307/2641210>
- Berg, B., Albrektsson, A., Berg, M.P., Cortina, J., Johansson, M.-B., Gallardo, A., Madeira, M., Pausas, J., Kratz, W., Vallejo, R. & McLaugherty, C. 1999b. Amounts of litterfall in some pine forests in a European transect, in particular Scots pine. *Annals of Forest Science* 56: 625–639.
- Berg, B., Johansson, M.-B., Tjarve, I., Gaitneks, T., Rokjanis, B., Beier, C., Rothe, A., Bolger, T., Göttlein, A. & Gertsberger, P. 1999a. Needle litterfall in a northern European spruce forest transect. Reports in Ecology and Forest Soils, Report 80. Department of forest Soils, Swedish university of agricultural Sciences, Uppsala, Sweden. 36 pp.
- Brunner, C., Hausfather, Z. & Knutti, R. 2024. Durability of carbon dioxide removal is critical for Paris climate goals. *Communications Earth & Environment* 5: 645. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01808-7>
- Byrne, B., Baker, D.F., Basu, S., Bertolacci, M., Bowman, K.W., Carroll, D., Chatterjee, A., Chevallier, F., Ciais, P., Cressie, N., Crisp, D., Crowell, S., Deng, F., Deng, Z., Deutscher, N.M., Dubey, M.K., Feng, S., García, O.E., Griffith, D.W.T., Herkommer, B., Hu, L., Jacobson, A.R., Janardanan, R., Jeong, S., Johnson, M.S., Jones, D.B.A., Kivi, R., Liu, J., Liu, Z., Maksyutov, S., Miller, J.B., Miller, S.M., Morino, I., Notholt, J., Oda, T., O'Dell, C.W., Oh, Y.-S., Ohyama, H., Patra, P.K., Peiro, H., Petri, C., Philip, S., Pollard, D.F., Poulter, B., Remaud, M., Schuh, A., Sha, M.K., Shiomi, K., Strong, K., Sweeney, C., Té, Y., Tian, H., Velazco, V.A., Vrekoussis, M., Warneke, T., Worden, J.R., Wunch, D., Yao, Y., Yun, J., Zammit-Mangion, A. & Zeng, N. 2023. National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake. *Earth System Science Data* 15: 963–1004. <https://doi.org/10.5194/essd-15-963-2023>.

- Deng, Z., Ciais, P., Tzompa-Sosa, Z.A., Saunio, M., Qiu, C., Tan, C., Sun, T., Ke, P., Cui, Y., Tanaka, K., Lin, X., Thompson, R.L., Tian, H., Yao, Y., Huang, Y., Lauerwald, R., Jain, A.K., Xu, X., Bastos, A., Sitch, S., Palmer, P.I., Lauvaux, T., d'Aspremont, A., Giron, C., Benoit, A., Poulter, B., Chang, J., Petrescu, A.M.R., Davis, S. J., Liu, Z., Grassi, G., Albergel, C., Tubiello, F.N., Perugini, L., Peters, W. & Chevallier, F. 2022. Comparing national greenhouse gas budgets reported in UNFCCC inventories against atmospheric inversions, *Earth System Science Data* 14: 1639–1675, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1639-2022>.
- Didion, M., Frey, B., Rogiers, N. & Thürig, E. 2014. Validating tree litter decomposition in the Yasso07 carbon model, *Ecological Modelling* 291: 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.028>.
- Eliasson, P., Svensson, M., Olsson, M. & Ågren, G.I. 2013. Forest carbon balances at the landscape scale investigated with the Q model and the CoupModel – Responses to intensified harvests, *Forest Ecology and Management* 290: 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.007>.
- 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., Knauer, J., Korosuo, A., Melo, J., McGrath, M.J., Nabel, J.E.M.S., Poulter, B., Romanovskaya, A.A., Rossi, S., Tian, H., Walker, A.P., Yuan, W., Yue, X. & Pongratz, J. 2023. Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020, *Earth System Science Data* 15: 1093–1114. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1093-2023>.
- Haara, A. & Leskinen, P. 2009. The assessment of the uncertainty of updated stand-level inventory data. *Silva Fennica* 43(1): 87–112.
- Heikkinen, J. 2008. Hiilen määrän maantieteellinen ja vertikaalinen vaihtelu maaperän pintaosassa. Pro gradu Oulun yliopisto, Geotieteiden laitos
- Henttonen, H.M., Nöjd, P. & Mäkinen, H. 2017. Environment-induced growth changes in the Finnish forests during 1971–2010 – An analysis based on National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management* 386: 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.044>
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 547 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>
- IPCC 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe K (eds.). IGES, Japan, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Isomäki, K., McGrath, M.J., Backman, L., Leskinen, J., Berchet, A., Broquet, G., Fortems-Cheiney, A., Junttila, V., Leppänen, A., Lindqvist, H., Mengistu, A., Mäkelä, A., Raivonen, M., Thölix, L. & Aalto, T. 2024. Assessing the role of terrestrial ecosystems in Finland's total CO₂ balance through a comparison of topdown and bottom-up estimates. *Boreal Environment Research* 29: 77–102. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001236277300002>

- Kansallinen metsäohjelma 2010. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja: 2/1999. <https://urn.fi/URN:ISBN:951-53-1932-3>
- Koljonen, T., Aakkula, J., Honkatukia, J., Soimakallio, S., Haakana, M., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Kärkkäinen, L., Laitila, J., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Maanavilja, L., Ollila, P., Siikavirta, H. & Tuomainen, T. 2020. Hiilineutraali Suomi 2035: Skenaariot ja vaikutusarviot. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 366. doi.org/10.32040/2242-122X.2020.T366
- Koljonen, T., Honkatukia, J., Maanavilja, L., Ruuskanen, O.-P., Similä, L. & Soimakallio, S. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (HIISI): Synteesiraportti – Johtopäätökset ja suositukset. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:62. Valtioneuvosto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-257-2>
- Koljonen, T., Silfver, T., Soimakallio, S., Koreneff, G., Lehtilä, A., Markkanen, J., Vainio, T., Aakkula, J., Haakana, M., Hirvelä, H., Lehtonen, H., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Viitanen, J., Vikfors, S., Forsberg, T. & Koskivaara, O. 2024. Perusskenaariot energia- ja ilmastoimien kokonaisuudelle kohti päästöttömyyttä (PEIKKO). Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:26. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-219-0>
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Silfver, T. & Kivinen M. (toim.) 2025a. Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot – keskipitkän aikavälin vaikutusarviot. VTT Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Technology No. 442. doi.org/10.32040/2242-122X.2025.T442
- Koljonen, T., Silfver, T., Soimakallio, S., Kivinen M., Aakkula, J., Haakana, M., Halonen, M., Halttu, K., Hirvelä, H., Kurki, S., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Markkanen, J., Mutanen, A., Niemistö, J., Similä, L., Sundqvist, H., Vainio, T., Viitanen, J. & Vikfors, S. 2025b. Kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan uudet toimet ja skenaariot (KEITO) – pitkän aikavälin ilmastosuunnitelman taustaselvitys. VTT Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Technology No. 443. doi.org/10.32040/2242-122X.2025.T443
- Korhonen K.T., Rätty M., Haakana H., Heikkinen J., Hotanen J.-P., Kuronen M. & Pitkänen J. 2024. Forests of Finland 2019–2023 and their development 1921–2023. *Silva Fennica* 58(5): 24045. <https://doi.org/10.14214/sf.24045>
- Korosuo, A., Pilli, R., Abad Viñas, R., Blujdea, V.N.B., Colditz, R.R., Fiorese, G., Rossi, S., Vizzarri, M. & Grassi, G. 2023. The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track? *Carbon Balance Manage* 18: 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0>
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communications Instituti Forestalia Fennica* 108: 1–74.
- Launiainen, S., Ahtikoski, A., Rinne, J., Ojanen, P. & Hökkä, H. 2025 Rewetting drained boreal peatland forests does not mitigate climate warming in the twenty-first century. *Ambio* 54: 2107–2117. <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02225-6>
- Lehtonen, A. & Heikkinen, J. 2016. Uncertainty of upland soil carbon sink estimate for Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 46: 310–322. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0171>

- Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P. & Mäkipää, R. 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004—an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of forest science* 63(7): 687–697.
- Lounasheimo, J., Cederlöf, M. & Mäntylä, I. 2021. Annual Climate Report 2021. Publications of the Ministry of the Environment 2021:23.
- 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 selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:63. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-263-3>
- Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, rapport 45. 73 s.
- Mehtätalo, L., Lempinen, R., Hirvelä, H., Salminen, H., Lehtonen, M., Rätty, M. & Strandström, M. 2026. Generating tree-level input data to a simulation system based on NFI measurements at tree and stand level. Manuscript.
- Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden –A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257: 1445–1451.
- Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N., Mäkiranta, P., Alm, J. & Penttilä, T. 2007. Heterotrophic soil respiration in forestry drained peatlands. *Boreal Environment Research* 12(2): 115–126.
- Muukkonen, P. 2005. Needle biomass turnover rates of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) derived from the needle-shed dynamics. *Trees: Structure and Function* 19: 273–279.
- Muukkonen, P. & Lehtonen, A. 2004. Needle and branch biomass turnover rates of Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2517–2527.
- Nabuurs, G.J., Lindner, M., Verkerk, P., Gunia, K., Deda, P., Michalak, R., Grassi, G. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3: 792–796. <https://doi.org/10.1038/nclimate1853>
- Oda, T., Bun, R., Kinakh, V., Topylko, P., Halushchak, M., Marland, G., Lauvaux, T., Jonas, M., Maksyutov, S., Nahorski, Z., Lesiv, M., Danylo, O. & Horabik-Pyzel, J. 2019. Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24: 1007–1050. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09877-2>, 2019.
- Ojanen, P., Lehtonen, A., Heikkinen, J., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2014. Soil CO₂ balance and its uncertainty in forestry-drained peatlands in Finland, *Forest Ecology and Management* 325: 60–73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.049>.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands, *Forest Ecology and Management* 260(3): 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>.

- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The Dependence of Net Soil CO₂ Emissions on Water Table Depth in Boreal Peatlands Drained for Forestry. *Mires and Peat* 24: 27. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>.
- Ollila, P., Vikfors, S., Kilpeläinen, H., Aakkula, J., Hirvelä, H., Härkönen, K., Koikkalainen, K., Miettinen, A., Myllykangas, J.-P., Silfver, T. & Wall, A. 2022. Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman mukainen skenaariotarkastelu vuoteen 2040. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 54/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 24 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-460-9>
- Ortiz, C.A., Liski, J., Gärdenäs, A.I., Lehtonen, A., Lundblad, M., Stendahl, J., Ågren, G.I. & Karlton, E. 2013. Soil organic carbon stock changes in Swedish forest soils—A comparison of uncertainties and their sources through a national inventory and two simulation models, *Ecological Modelling* 251: 221–231.
- Petersson, H. & Ståhl, G. 2006. Functions for Below Ground Biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *B. pubescens* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21(Suppl 7): 84–93.
- Rantakari, M., Lehtonen, A., Linkosalo, T., Tuomi, M., Tamminen, P., Heikkinen, J., Liski, J., Mäkipää, R., Ilvesniemi, H. & Sievänen, R. 2012. The Yasso07 soil carbon model – Testing against repeated soil carbon inventory, *Forest Ecology and Management* 286: 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.041>.
- Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605–624.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625–647.
- Repola, J., Ojansuu, R. & Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. *Metla Working Paper* 53.
- Sandström, F., Petersson, H., Kruys, N. & Ståhl, G. 2007. Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden. *Forest Ecology and Management* 243(1): 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.081>.
- Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K. & Tuomi, M. 2014. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science* 71: 255–265. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0295-7>
- Siikavirta, H., Cederlöf, M., Weaver, S., Värtö, A. & Siljander, R. 2025. Annual Climate Report 2025. Publications of the Ministry of the Environment 2025:30.

- Silfver, T., Aakkula, J., Haakana, M., Haikarainen, S., Hirvelä, H., Hynynen, J., Mikola, J., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Ollila, P., Salminen, H., Tuomainen, T., Viitanen, J., Vikfors, S. & Wall, A. 2024. Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman skenaariotarkastelun päivitys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 4/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 37 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-869-0>
- Tuomi, M., Laiho, R., Repo, A. & Liski, J. 2011b. Wood decomposition model for boreal forests, *Ecological Modelling*, 222(3): 709–718. doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.025.
- Tuomi, M., Rasinmäki, J., Repo, A., Vanhala, P. & Liski, J. 2011a. Soil carbon model Yasso07 graphical user interface, *Environmental Modelling & Software* 26: 1358–1362.
- Ťupek, B., Launiainen, S., Peltoniemi, M., Sievänen, R., Perttunen, J., Kulmala, L., Penttilä, T., Lindroos, A.-J., Hashimoto, S. & Lehtonen, A. 2019. Evaluating CENTURY and Yasso soil carbon models for CO₂ emissions and organic carbon stocks of boreal forest soil with Bayesian multi-model inference. *European Journal of Soil Science* 70: 847–858. <https://doi.org/10.1111/ejss.12805>
- Ťupek, B., Ortiz, C.A., Hashimoto, S., Stendahl, J., Dahlgren, J., Karlton, E. & Lehtonen, A. 2016. Underestimation of boreal soil carbon stocks by mathematical soil carbon models linked to soil nutrient status. *Biogeosciences* 13: 4439–4459, <https://doi.org/10.5194/bg-13-4439-2016>
- Vauhkonen, J., Mehtätalo, L., Hirvelä, H., Routa, J., Liski, J., Vakkilainen, E. & Asikainen, A. 2024. Suomen ja EU:n metsien kehitysskenaariot. Metsäbiotalouden tiedepaneelin raportti 2/2024. Metsäbiotalouden tiedepaneeli. Helsinki. 40 s.
- Viskari, T., Laine, M., Kulmala, L., Mäkelä, J., Fer, I. & Liski, J. 2020. Soil carbon estimates by Yasso15 model improved with state data assimilation. *Geoscientific Model Development Discussion*. pp.1–22.
- Viskari, T., Pusa, J., Fer, I., Repo, A., Vira, J. & Liski, J. 2022 Calibrating the soil organic carbon model Yasso20 with multiple datasets. *Geoscientific Model Development* 15(4): 1735–1752. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1735-2022>
- Väänänen, P., Ahtikoski, A., Assmuth, A., Hotanen, J.-P., Hökkä, H., Könönen, M., Laiho, R., Ojanen, P., Repola, J., Sarkkola, S. & Tolvanen, A. 2025. Kuivatuksesta kosteikkometsätalouteen - Ojitettujen suometsien metsänhoidon visio. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 79/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki. <https://jukuri.luke.fi/items/a6230d63-aaca-4fda-b218-5d782abf1869>
- Worden, J.R., Cusworth, D.H., Qu, Z., Yin, Y., Zhang, Y., Bloom, A.A., Ma, S., Byrne, B.K., Scarpelli, T., Maasackers, J.D., Crisp, D., Duren, R. & Jacob, D.J. 2022. The 2019 methane budget and uncertainties at 1_ resolution and each country through Bayesian integration Of GOSAT total column methane data and a priori inventory estimates. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(10): 6811–6841. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6811-2022>.
- Ågren, G.I. & Bosatta, E. 1996. Quality: a bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. *Oikos* 76: 522–528.
- Ågren, G.I., Bosatta, E. & Magill, A.M. 2001. Combining theory and experiment to understand effects of inorganic nitrogen on litter decomposition. *Oecologia* 128: 94–98.

Liite A: Karikesyötteen epävarmuus kivennäismailla

Juha Heikkinen

Kivennäismaametsien maaperän hiilitaseen arvioinnissa on käytetty Yasso07 mallia (Tuomi ym. 2011a,b), jonka syötteenä tarvitaan elävästä puustosta, aluskasvillisuudesta, hakkuutähteistä ja luonnonpoistumasta tulevan karikkeen biomassa-aikasarja jaoteltuna karikkeen karkeuden ja liukoisuuden mukaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että puustoon liittyvät karikaikasarjat lasketaan erikseen eri karikelähteille (elävä puusto, hakkuutähteet, luonnonpoistuma), puulajiryhmille (mänty, kuusi, lehtipuut) ja biomassaositteille (runko, oksat, lehdet, kanto, juuri).

Suoraan elävästä puustosta tulevan karikkeen määrää vuonna x arvioidaan kertomalla vuodelle x arvioidut puulajiryhmittäiset ja biomassaositteittaiset elävän biomassan määrät kariketuantokertoimilla (Muukkonen 2004, Muukkonen ja Lehtonen 2004). Hakkuissa syntyvän karikkeen määrää arvioidaan hakatun puuston oksien, lehtien, kannon ja juuren sekä rungon hukkapuun biomassana, josta kuitenkin vähennetään energiapuuksi korjatun biomassan määrän arvio. Luonnonpoistuman biomassa lasketaan kokonaisuudessaan karikkeeksi.

Karikesyötteen epävarmuutta on aiemmin analysoitu vuoteen 2013 saakka ulottuvista aikasarjoista (Lehtonen & Heikkinen 2016). Tässä hankkeessa tuo analyysi päivitettiin käyttäen vuoteen 2023 ulottuvia aineistoja ja uusia biomassamalleja (Repola ym. käsikirjoitus; Taulukko A1). Lisäksi tehtiin pieniä parannuksia epävarmuuden arviointimenetelmään.

Puustobiomassojen määriin liittyvän epävarmuuden arvioinnissa otettiin huomioon:

- (uusien) biomassamallien parametrien epävarmuus (Taulukko A2),
- puu- ja ositekohtaisten biomassaennusteiden jäännösvaihtelu (Taulukot A3 ja A4) ja
- VMI:n otannasta johtuva epävarmuus elävän puuston runkotilavuusarvioissa sekä elävän, hakatun ja kuolleen puuston BCEF-kertoimissa (Taulukko A5).

Poistuman runkotilavuuteen, karikkekertoimiin ja aluskasvillisuuteen liittyvät epävarmuudet olivat Lehtosen ja Heikkisen (2016) julkaisun mukaisia.

Yksittäisten puiden biomassaennusteissa jäännösvaihtelun merkitys on paljon suurempi kuin malliparametreihin liittyvän epävarmuuden (Kuva A1). Karikaikasarjat kuitenkin perustuvat yli 330 000 pääosin eri metsiköissä kasvavan koepuun biomassaennusteisiin, jolloin metsikkökohtaiset satunnaiskomponentit ja puukohtaiset jäännökset käytännössä keskiarvoistuvat nollassa. Toisaalta parametrivirheet ovat samat kaikille saman puulajiryhmän biomassaennusteille. Toisin sanoen ne ovat mallien sovellusvaiheessa systemaattista virhettä, jonka merkitys ei pienene koepuiden määrän kasvaessa. Tästä huolimatta myös jäännösvaihtelu on tärkeää ottaa huomioon, koska se vaikuttaa olennaisesti otannasta johtuvan epävarmuuden arvioon.

Alueittaisissa kokonaisbiomassan arvioissa biomassamallin parametristimaattien epävarmuuden vaikutus on suurempi kuin VMI:n otantavirheen vaikutus (Kuva A2). Runkobiomassan sekä männyn ja lehtipuiden oksa- ja lehtibiomassan arvioissa vaikutukset ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa; maanalaisen biomassan arvioissa malleihin liittyvän epävarmuuden vaikutus on merkittävä.

Taulukko A1. Uusien biomassamallien (Repola ym., käsikirjoitus) mukaiset, harhakorjauksen sisältävät, bio-massa- ja tiheysennusteet. Runkopuun osalta KHKI:ssa käytetään VMI:n puukoh-taisia tilavuusennusteita (joihin liittyvä epävarmuus on suhteellisen vähäinen), jotka kerrotaan tämän taulukon mukaisella tiheyden ennusteella ("runko"). d on puun rinnankorkeusläpimitta (cm), h puun pituus (m) ja cl elävän latvuksen pituus (m); $I_{org}=1$, jos puu on mitattu turve-maalta, 0 jos kivennäismaalta. Mallia 3b käytetään kaikille niille VMI-koepuille, joilta latvuksen pituus on mitattu, mallia 2b muille.

Puulaji-ryhmä/ malliversio	Biomassa- osite	Biomassa/tiheysennuste
Mänty		
Malli 2b	runko	$0.480 + 0.003 * d - 0.100 * \log(d) + 0.058 * \log(h) + 0.072 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-4.327 + 3.009 * \log(d) - 0.465 * \sqrt{h})$
	lehvästö	$\exp(-2.271 + 11.753 * d/(d + 5) - 5.469 * h/(h + 1))$
	kanto	$\exp(-4.036 + 9.84 * d/(d + 12))$
	juuret	$\exp(-4.556 + 11.536 * d/(d + 10) + 0.627 * (d/(d + 10)) * I_{org})$
Malli 3b	runko	$0.470 + 0.003 * d - 0.099 * \log(d) + 0.061 * \log(h) + 0.071 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-3.813 + 2.614 * \log(d) - 1.246 * \log(h) + 1.089 * \log(cl))$
	lehvästö	$\exp(-4.543 + 9.469 * d/(d + 6) - 1.067 * \log(h) + 1.048 * \log(cl))$
	kanto	$\exp(-3.950 + 9.700 * d/(d + 12))$
	juuret	$\exp(-4.519 + 11.473 * d/(d + 10) + 0.627 * (d/(d + 10)) * I_{org})$
Kuusi		
Malli 2b	runko	$0.381 - 0.003 * d + 0.024 * \log(d) + 0.052 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-2.291 + 12.926 * d/(d + 12) - 0.839 * \log(h))$
	lehvästö	$\exp(2.778 + 11.856 * d/(d + 8) - 8.701 * h/(h + 1))$
	kanto	$\exp(-3.528 + 9.082 * d/(d + 12))$
	juuret	$\exp(-2.204 + 0.653 * \log((d**2) * h))$
Malli 3b	runko	$0.384 - 0.003 * d + 0.023 * \log(d) + 0.053 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-1.590 + 11.559 * d/(d + 12) - 6.876 * h/(h + 7) + 0.990 * \log(cl))$
	lehvästö	$\exp(8.204 + 12.755 * d/(d + 4) - 20.232 * h/(h + 1) + 1.250 * \log(cl))$
	kanto	$\exp(-3.463 + 8.883 * d/(d + 12))$
	juuret	$\exp(-2.332 + 0.667 * \log((d**2) * h))$
Lehtipuut		
Malli 2b	runko	$0.459 + 0.002 * d + 0.059 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-2.560 + 13.421 * d/(d + 10) + 5.397 * \log(h) - 27.28 * h/(h + 8))$
	lehvästö	$\exp(-3.250 + 6.805 * d/(d + 12) + 0.837 * \log(d) - 0.627 * \log(h) - 0.472 * I_{org})$
	kanto	$\exp(-5.957 + 9.027 * d/(d + 14) + 3.243 * h/(h + 2))$
	juuret	$\exp(-6.537 + 6.580 * d/(d + 9) + 6.462 * h/(h + 3))$
Malli 3b	runko	$bd = 0.470 + 0.002 * d + 0.034 * I_{org}$
	oksat	$\exp(-3.276 + 11.082 * d/(d + 12) - 3.691 * h/(h + 8) + 0.862 * \log(cl))$
	lehvästö	$\exp(-3.977 + 0.934 * \log(d) + 0.405 * \log(h) + 0.546 * \log(cl))$
	kanto	$\exp(-5.412 + 8.971 * d/(d + 14) + 2.692 * h/(h + 2))$
	juuret	$\exp(-6.053 + 6.345 * d/(d + 9) + 6.008 * h/(h + 3))$

Taulukko A2. Esimerkki Taulukon A1 parametreihin liittyvistä epävarmuuksista (diagonaali, U , %) ja korrelaatiosta: Männyn malli 2b; maanpäälliset biomassaositteet.

		runko					oksat			lehvästö		
		vakiotermi	d	log(d)	log(h)	I_org	vakiotermi	log(d)	sqrt(h)	vakiotermi	d/(d + 5)	h/(h + 1)
runko	vakiotermi	7.7										
	d	0.71	46.1									
	log(d)	-0.58	-0.82	25.6								
	log(h)	-0.30	0.08	-0.55	32.9							
	I_org	-0.08	0.05	-0.06	0.02	22.3						
oksat	vakiotermi	0.02	0.01	-0.02	0.01	0.01	3.3					
	log(d)	-0.01	-0.01	0.04	-0.05	0.00	-0.30	2.9				
	sqrt(h)	0.00	0.00	-0.03	0.04	-0.01	-0.28	-0.81	14.2			
lehvästö	vakiotermi	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.34	0.31	-0.52	37.3		
	d/(d + 5)	-0.02	0.00	0.04	-0.04	0.00	-0.22	0.62	-0.48	0.65	3.9	
	h/(h + 1)	0.01	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	-0.19	-0.42	0.55	-0.97	-0.80	22.7

Taulukko A3. Esimerkki uusien biomassamallien (Repola ym. käsikirjoitus) ennusteisiin liittyvien metsikkökohtaisten satunnaiskomponenttien keskihajonnoista (diagonaali) ja korrelaatioista: Männyn malli 2b.

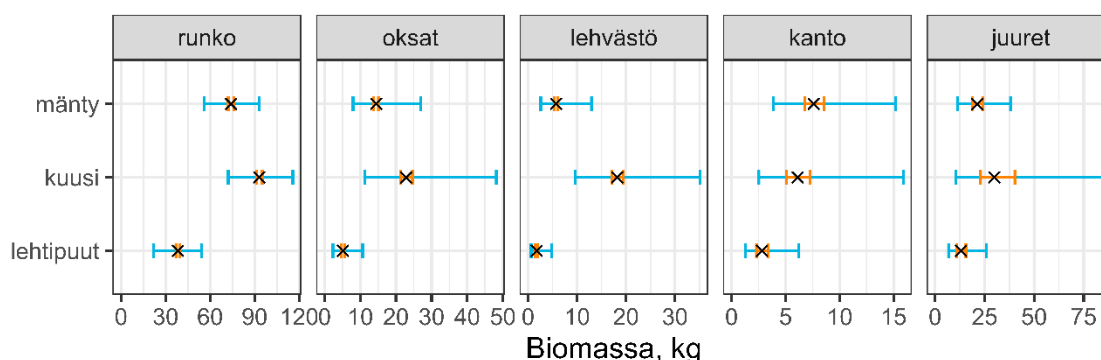
	runko	oksat	lehvästö	kanto	juuret
runko	0.036				
oksat	-0.101	0.204			
lehvästö	-0.189	0.808	0.345		
kanto	0.941	0.159	-0.105	0.257	
juuret	-0.555	-0.477	-0.688	-0.516	0.044

Taulukko A4. Esimerkki uusien biomassamallien (Repola ym. käsikirjoitus) ennusteisiin liittyvien puukohtaisten jäännösten keskihajonnoista (diagonaali) ja korrelaatioista: Männyn malli 2b.

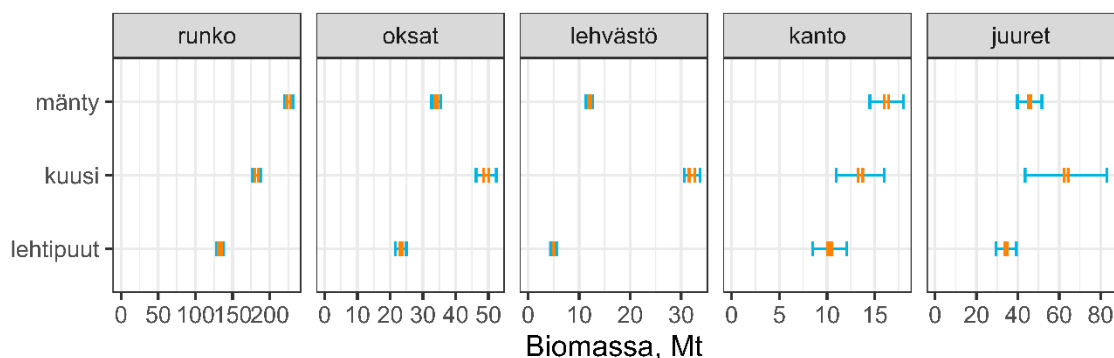
	runko	oksat	lehvästö	kanto	juuret
runko	0.032				
oksat	0.154	0.334			
lehvästö	0.159	0.702	0.349		
kanto	0.267	0.440	0.294	0.260	-
juuret	0.354	0.331	0.183	-0.019	0.307

Taulukko A5. Esimerkki elävän puuston BCEF-kerrointen ja runkotilavuuksien estimaatteihin liittyvistä, VMI-otannasta johtuvista epävarmuuksista (diagonaali, U , %) ja korrelaatioista: yksi VMI13:n otanta-alue; maanpäälliset biomassaositteet. Vastaava epävarmuusmatriisi (sisältäen myös maanalaiset biomassaositteet) estimoitiin erikseen jokaiselle VMI-kierrokselle (VMI 8 – VMI 13) ja otanta-alueelle jokaisella Monte Carlo -simulaation kierroksella. Lisäksi hakkuu- ja luonnonpoistuman BCEF-kertoimille estimoitiin vastaavat matriisit.

			BCEF									Runkotilavuus		
			mänty			kuusi			lehtipuut			mänty	kuusi	lehtipuut
			runko	oksat	lehvästö	runko	oksat	lehvästö	runko	oksat	lehvästö			
BCEF	mänty	runko	0.33											
		oksat	-0.02	1.37										
		lehvästö	-0.20	0.64	1.89									
	kuusi	runko	-0.09	0.01	0.06	0.51								
		oksat	-0.04	0.08	0.09	0.30	2.05							
		lehvästö	-0.05	0.08	0.11	0.32	0.78	2.67						
	lehtipuut	runko	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.86					
		oksat	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.06	0.06	0.17	1.83				
		lehvästö	-0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.06	-0.19	0.04	3.22			
runko-tilavuus	mänty		0.09	-0.18	-0.25	0.01	-0.03	-0.02	0.00	-0.01	0.00	3.10	-	-
	kuusi		0.10	-0.13	-0.18	-0.20	-0.41	-0.44	0.03	-0.07	-0.11	-0.31	4.28	
	lehtipuut		0.09	-0.02	-0.09	-0.01	-0.01	-0.06	0.03	-0.05	-0.24	-0.24	0.24	3.86



Kuva A1. Yhden tyypillisen männyn, kuusen ja lehtipuun biomassojen ennusteet (x) ja ennusteisiin liittyvä epävarmuus kuvattuna 95 %:n luottamusvälinä. Oranssi väli kuvaa biomassamallin parametrien estimaatteihin liittyvän epävarmuuden vaikutusta, turkoosi väli kokonaisuvarmuutta, jossa on mukana myös jäännösvaihtelun vaikutus.



Kuva A2. Biomassamallien parametreihin (oranssi) ja VMI:n otantaan (turkoosi) liittyvän epävarmuuden vaikutus alueittaisiin kokonaisbiomassan arvioihin 95 %:n luottamusvälinä kuvattuna; VMI:n otanta-alueen 1 kivennäismaat, VMI13.

Karikesyöteaikasarjojen epävarmuusanalyysi toteutettiin Monte Carlo -menetelmällä: Tuotettiin suuri määrä aikasarjoja, joissa karikebiomassojen estimaatteihin oli simuloitu satunnaisvirhettä niiden epävarmuutta kuvaavista todennäköisyysjakaumista. Yhden simuloitun elävästä puustosta tulevan karikesarjan tuottamiseksi:

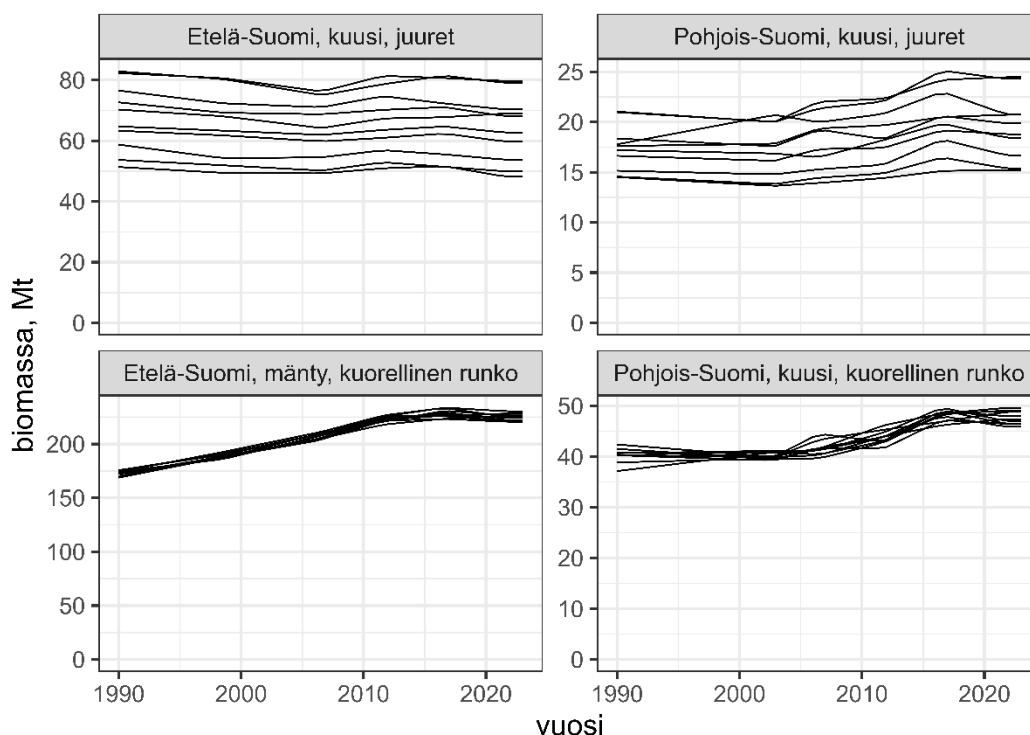
1. Simuloitiin "epävarmuuden sisältävät" biomassamallien parametriarvot jokaiselle puulajiryhmälle ja ositteelle käyttäen Taulukon A2 epävarmuuksia ja korrelaatioita.
2. Simuloitiin puulajiryhmittäisten satunnaiskomponenttien realisaatiot kullekin VMI 8 – VMI 13 -aineiston metsikölle käyttäen Taulukon A3 hajontoja ja korrelaatioita.
3. Simulointiin jokaiselle VMI:n koepuulle jäännösvektorit käyttäen Taulukon A4 hajontoja ja korrelaatioita.
4. Simuloitiin puu- ja komponenttikohtaiset epävarmuuden sisältävät biomassanennusteet lisäämällä kohdan 1 tuloksena saadun, parametrivirheen sisältävän, mallin ennusteisiin kohdissa 2 ja 3 simuloitujen satunnaisvirheiden.
5. Laskettiin kohdassa 4 simuloituihin biomassoihin perustuvat BCEF-kerrointen estimaatit ja estimoitiin kullekin VMI:n otanta-alueelle, puulajiryhmälle ja VMI-kierrokselle erikseen näiden sekä runkotilavuusestimaattorien otantakovarianssit (Taulukko A5) perustuen kohdan 5 simuloitujen biomassojen ja runkotilavuuden VMI-ennusteiden vaihteluun.
6. Lisättiin kohdan 5 kovarianssimatriiseista simuloitujen otantavirhevektorit muuntokerrointen ja runkotilavuuksien estimaatteihin ja laskettiin näin saatujen, epävarmuuden sisältävien, muuntokerrointen ja runkotilavuuksien tuloina simuloitujen epävarmuuden sisältävien biomassat.
7. Interpoloitiin kohdassa 6 saadut VMI-kierros-kohtaiset biomassat vuosittaisiksi ja summataan yli Etelä- ja Pohjois-Suomen otanta-alueiden.
8. Kerrottiin kohdassa 7 saadut vuosittaiset biomassat arviot karikekertoimilla, joihin oli lisätty niiden epävarmuusjakaumasta simuloitu estimointivirhe.

Hakkuutähteistä ja luonnonpoistumasta tulevan karikkeen BCEF-kerrointen epävarmuuden simulointi toteutettiin osana edellä kuvattua algoritmia:

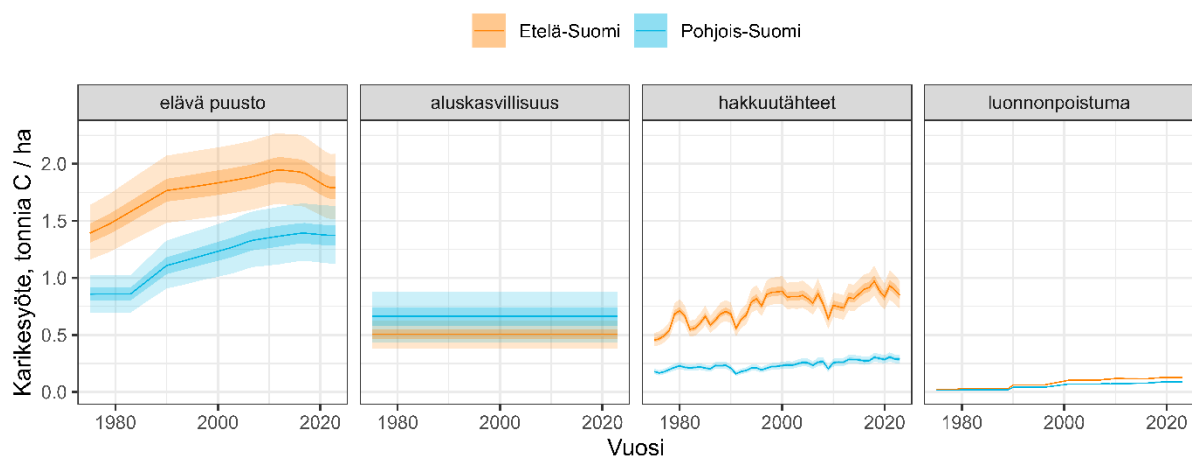
- Kohtaan 3 sisältyivät pysyviltä koealoilta poistuneet puut, joihin kerrointen laskenta perustuu. Näihin puihin liittyvät biomassaennusteet ja niiden virheet ovat näin ollen samat sekä elävälle puustolle että poistumalle simuloituissa kertoimissa. Näin tulee huomioida korrelaatio, joka johtuu siitä, että molempien kerrointen laskennassa käytetään samaa biomassamallia.
- Kohdassa 5 laskettiin myös poistuman BCEF-kerrointen estimaatit ja otantavirheet.
- Kohdassa 6 oli mukana myös poistuman kertoimet.
- Kohdassa 7 interpoloitiin myös poistuman BCEF-kertoimet vuosittaisiksi ja kerrottiin ne poistumatilastoista tulevilla vuosittaisilla runkotilavuuksilla, joihin oli lisätty niiden epävarmuuden ($U=5\%$, [Puun markkinahakkuut -tilaston dokumentaatio | Luonnonvarakeskus](#)) mukainen satunnaisvirhe.

Yasso07-mallilla tuotettavien maaperän hiilitasearvioiden tarkkuuden kannalta on olennaista, että biomassan (ja näin ollen karikesyötteen) ajallisiin muutoksiin liittyvä epävarmuus on vähäisempää kuin sen määrään liittyvä epävarmuus (Kuva A3).

Elävä puusto on karikesyötteen lähteistä merkittävin (Kuva A4). Pääosa elävästä puustosta tulevasta karikkeesta on lehtiä ja neulasia, joiden biomassavaraston koon arvioon liittyy varsin suuri epävarmuus.



Kuva A3. Äärevimpiä esimerkkejä edellä kuvatun Monte Carlo -menetelmän kohdan 7 tuloksena saatujen vuosittaisten biomassa-aikasarjojen vaihtelusta: suurin (juuret) vs. pienin (runko) biomassamallia koskeva epävarmuus; suurempi (Pohjois-Suomi) vs. pienempi (Etelä-Suomi) VMI-otannasta johtuva epävarmuus.



Kuva A4. Eri lähteistä tulevan karikkeen määrä ja siihen liittyvä epävarmuus alueittain. Tummemmalle alueelle osui 50 % epävarmuusjakaumasta simuloituista karikeyöteistä, vaaleammalle alueelle 95 %.



Löydät meidät verkosta

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki