



METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI

METSÄBIOTALOUDEN TIEDEPANEELIN RAPORTTI 2/2024

Suomen ja EU:n metsien kehitys- skenaariot

Jari Vauhkonen, Lauri Mehtätalo, Hannu Hirvelä, Johanna Routa, Jari Liski,
Esa Vakkilainen, Antti Asikainen



Suomen ja EU:n metsien kehitysskenaariot

Jari Vauhkonen, Lauri Mehtätalo, Hannu Hirvelä, Johanna Routa, Jari Liski,
Esa Vakkilainen, Antti Asikainen

VIITTAUSOHJE:

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.



**METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI**

ISBN 978-952-65456-1-5 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2984-1836 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-65456-1-5>

Copyright: Metsäbiotalouden tiedepaneeli

Jari Vauhkonen, Lauri Mehtätalo, Hannu Hirvelä, Johanna Routa, Jari Liski, Esa Vakkilainen ja Antti Asikainen

Julkaisija ja kustantaja: Metsäbiotalouden tiedepaneeli, Helsinki 2024

Julkaisuvuosi: 2024

Tiivistelmä

Jari Vauhkonen¹, Lauri Mehtätalo², Hannu Hirvelä³, Johanna Routa⁴, Jari Liski⁵, Esa Vakkilainen⁶ ja Antti Asikainen⁷

¹Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden, metsätieteiden ja tekniikan tiedekunta, Metsätieteiden osasto, Joensuu

²Luonnonvarakeskus, Biotalous ja ympäristö, Metsävarojen inventointi ja metsäsuunnittelu, Joensuu

³Luonnonvarakeskus, Biotalous ja ympäristö, Metsävarojen inventointi ja metsäsuunnittelu, Helsinki

⁴Luonnonvarakeskus, Tuotantojärjestelmät, Metsä- ja puutuoteteknologia, Joensuu

⁵Ilmatieteen laitos

⁶LUT-yliopisto, Energiatekniikka

⁷Luonnonvarakeskus

Suomen metsien tuotteiden ja palveluiden kysyntä on lisääntynyt samalla, kun kansallinen ja kansainvälinen toimintaympäristö on muuttunut. Metsien käyttöön ja käytön hyväksyttävyyteen vaikuttavat merkittävästi kansainväliset sitoumukset, sopimukset ja politiikkatoimet. Niistä tulevat vaatimukset metsien hiilinielujen vahvistamiselle ja lisääntyvälle metsien suojelulle johtavat vaikeaan metsien käytön yhteensovittamisongelmaan erityisesti metsäbiotalouden hyvän suhdanteen vallitessa. Pelkästään EU:n metsiin kohdistuvia politiikkainstrumentteja arvioidaan olevan noin 70.

Tämän raportin tavoitteena on kuvata Suomen metsien nykytilaa erityisesti niiden kansainväliseen toimintaympäristöön liittyvillä tunnuksilla (luku 1), esittää näkökulmia ja tutkimustarpeita nykyisten skenaarioiden synteessin perusteella (luku 2) sekä esittää ja vertailla kahden erilaisen metsien kehityssimulaation tuloksia (luku 3). Lukujen 1 ja 2 pohjalta korostuvat erityisesti EU-maiden välisten laskelmien ja raportointien harmonisointiin liittyvät tarpeet ja haasteet. Esimerkiksi mallilaskelmiin perustuvan kasvihuonekaasuinventaarion tietojen muuttuminen yli ajan tarkoittaa tietoja, mutta toisaalta ennusteiden vaihtelu yli ajan luo päätöksenteon kannalta vaikeasti ennakoitavan tilanteen, jossa tämänhetkiset parhaat tiedot voivat olennaisesti muuttua vuosien tai vuosikymmenien päästä. Erityyppisten ennustemallien vertailua tarvitaan, mutta vakioiduin oletuksin, ja nämä tarpeet korostuvat erityisesti ylikansallisissa metsien kehityslaskelmissa.

Raportissa tuotettiin metsien erittäin pitkän aikavälin kehityksen vertailulaskelma samaan syöttötietoon mutta erilaisiin mallinnusperiaatteisiin perustuen. Laskelmassa verrattiin Luonnonvarakeskuksessa äskettäin kehitettyä ikäluokkasimulaattoria MELA-ohjelmistoon, joka perustuu luonnonprosessien ja vaihtoehtoisten hakkuiden ja metsänhoitotöiden simulointiin ja hakkuuohjelmien optimointiin. Ikäluokkasimuloinnissa puuston kehitystä jäljitellään ikäluokittain. Kun lisäksi oletetaan sääntöpohjainen hakkuuohjelma, maakunta- ja kasvupaikkakohtaiset ikäluokkien keskikasvut ja näiden pysyminen samanlaisina tulevaisuudessa, voidaan puuston kehitystä simuloida hyvin pitkällä aikavälillä. Tällainen simulointi voi auttaa tunnistamaan erityisesti muiden simulointimallien ennusteissa olevia trendejä.

Laadittujen skenaarioiden perusteella sekä ikäluokkasimuloinnissa että MELA-laskelmassa rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsien hakkuupoistuman arvio vuosille 2019–2028 oli 81–83 milj. m³/v ja menetelmät antavat samansuuntaisen kuvan puuntuotannon mahdollisuuksista noin vuoteen 2050 asti. Sitä pitemmälle aikavälille ulottuvat ikäluokkasimuloinnin ja MELA-laskelman arviot poikkeavat toisistaan merkittävästi. Metsien kasvun ja poistuman erotus, joka on avainasemassa metsien hiilinielun laskennassa, on sitä suurempi mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään. Ikäluokkasimulointi ennakoii hieman nousevaa kasvun tasoa lähivuosille erityisesti silloin, kun hakkuumäärää alennetaan suurimman puuntuotannollisesti kestäväen hakkuupoistuman tasosta (tarkasteltu 90 %, 80 % ja 70 % tästä

tasosta) ja päätehakkuiden annetaan aluksi kohdistua selvästi puuntuotannon maksimoivan kiertoajan ylittäviin metsiin. Näillä hakkuutasoilla kasvu alkaa kuitenkin laskea 10–20 vuoden kuluttua ja lähestyä hitaasti valittua hakkuutasoa sitä voimakkaammin mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään.

Metsäbiotalouden tiedepaneelin politiikkasuositukset:

- EU:n metsävarojen arvioinnin, tulevan kehityksen ja kasvihuonekaasuinventarioiden laskentaa ja raportointia tulee yhtenäistää, jotta EU:n metsävaroista voidaan muodostaa yhtenäinen kuva.
- Laskentamallien tuottamien, etenkin pitkän aikavälin ennusteiden käyttöön päätöksenteossa on syytä suhtautua varauksella. Tarvitaan mallien vertailua tai synteesiä sekä uusia laskentamalleja, jotka huomioivat nykyistä paremmin ilmastonmuutoksen vaikutukset.
- Kaikkia metsiin kohdistuvia tavoitteita ei ole mahdollista saavuttaa samanaikaisesti, vaan päätöksentekijät joutuvat tekemään valintoja metsien käyttöä koskien. Selvityksessä esitetyt arviot vahvistavat tietopohjaa metsäresurssimme tulevasta kehityksestä.

Asiasanat: metsävarat, kasvihuonekaasu, hiilitase, monimuotoisuus, metsää kuvaavat mallit, ikäluokkasimulointi, simulointi ja optimointi, kasvu ja poistuma

Abstract in English

Jari Vauhkonen¹, Lauri Mehtätalo², Hannu Hirvelä³, Johanna Routa⁴, Jari Liski⁵, Esa Vakkilainen⁶ ja Antti Asikainen⁷

¹University of Eastern Finland, Faculty of Science, Forestry and Technology, School of Forest Sciences, Joensuu

²Natural Resources Institute Finland, Bioeconomy and Environment, Forest Inventory and Planning, Joensuu

³Natural Resources Institute Finland, Bioeconomy and Environment, Forest Inventory and Planning, Helsinki

⁴Natural Resources Institute Finland, Production Systems, Forest technology and wood material solutions, Joensuu

⁵Finnish Meteorological Institute

⁶LUT University, Energy Technology

⁷Natural Resources Institute Finland

Demand for Finnish forest products and services has increased as the national and international environment has changed. International commitments, agreements and policies have a significant impact on the acceptability of forest use. The resulting demands for enhancing forest carbon sinks and increasing forest conservation lead to a difficult problem of reconciling forest use, especially in the context of a healthy forest bioeconomy. The number of EU policy instruments related to forests is estimated to be at around 70.

The aim of this report is to describe the current state of Finland's forests, especially in the international context, to present perspectives and research needs based on a synthesis of existing scenarios, and to present and compare the results of two different forest development simulations. Chapters 1 and 2 highlight in particular the needs and challenges for harmonizing calculations and reporting across EU countries. For example, while changes over time in model-based greenhouse gas inventory data improve the accuracy of the data, the variability of projections over time creates a situation that is difficult to anticipate in decision making, where the best data today may change significantly in years or decades to come. There is a need to compare different types of projection models, but with standardized assumptions, and this need is particularly acute in the case of international forest development projections.

The report provided a comparative calculation of very long-term forest development based on the same input data but different modelling principles. The calculation compared the age class simulator recently developed at the Natural Resources Institute Finland with the MELA software, which is based on the simulation of natural processes and forest management alternatives and the optimization of harvesting programmes. The age class simulation simulates stand development by age classes and assuming a rule-based harvesting programme, average age-class growth rates by region and site and that these will remain the same in the future, stand development can be simulated over a very long time horizon. In particular, such simulations can help to identify trends in the projections of other simulation models.

Based on the scenarios developed, both the age class simulation and the MELA calculation estimated the harvesting potential of forests in unrestricted timber production for the period 2019–2028 to be 81–83 mill. m³/year, and the methods give a similar picture of the potential for timber production until around 2050. Beyond this period, the age-class simulation and MELA estimates differ significantly. The difference between forest growth and removals, which is a key factor in the calculation of the forest carbon sink, is larger the lower the harvesting rate used. The age-class simulation predicts a slightly increasing growth rate in the coming years, especially if the harvest rate is reduced from the level of the maximum sustainable harvesting rate (considered at 90%, 80% and 70% of this level) and if the

final felling is mainly allowed to take place in forests well beyond the maximum rotation period for wood production. However, at these harvesting rates, growth starts to decline after 10-20 years and approaches the slowly selected harvesting rate more strongly the lower the harvesting rate used.

Policy recommendations of the Finnish Forest Bioeconomy Science Panel:

- Calculations and reporting of EU forest resource assessment, future development projections and greenhouse gas inventories should be harmonized in order to provide a coherent picture of EU forest resources.
- Forecasts produced by the computational models, especially those prepared for a long term, should be used with caution in decision-making. There is a need for comparisons or syntheses of models and for new forest development models that better account the effects of climate change.
- It is not possible to achieve all objectives set for forests at the same time, and decision-makers will have to make choices about forest use. The estimates presented in the report strengthen the knowledge base for the future development of our forest resources.

Keywords: forest resources, greenhouse gas, carbon balance, biodiversity, forest models, age class simulation, simulation and optimization, growth and removal

Sisällys

1. Suomen ja EU:n metsien kehitysskenaariot	8
1.1. Tausta.....	8
1.2. Suomen metsät osana EU:n maankäyttö-, maankäytön muutos- ja metsäsektoria (LULUCF).....	9
1.3. EU:n biodiversiteettistrategian ennakoitujen vaikutukset Suomen metsien käytölle	13
1.4. Muut skenaariotarkastelut.....	15
2. Näkökulmia ja tutkimustarpeita	16
2.1. Kasvihuonekaasuinventaarion tarkentuminen haastaa ennakointia	16
2.2. Ennusteiden vertailuja tarvitaan, mutta vakioiduin oletuksin.....	18
3. Metsien uusimmat kehitysskenaariot tämän hankkeen laskelmien mukaan.....	22
3.1. Menetelmät.....	22
3.1.1. Kasvukäyrien laadinta.....	22
3.1.2. Ikäluokkasimulaattori	24
3.1.3. MELA-laskelmat.....	26
3.2. Tulokset.....	26
3.2.1. Ikäluokkasimulaattori	26
3.2.2. Vertailu MELA-tuloksiin	29
3.3. Tulosten tarkastelua.....	31
4. Lopuksi	34
Viitteet	36

1. Suomen ja EU:n metsien kehitysskenaariot

1.1. Tausta

Suomen metsien tuotteiden ja palveluiden kysyntä on lisääntynyt samalla, kun metsien käyttöön vaikuttava kansallinen ja kansainvälinen toimintaympäristö on muuttunut. Yhteiskuntaan, ympäristöön ja teknologioihin liittyvien megatrendien ja muutostekijöiden voi jatkossakin odottaa tuottavan nopeita ja voimakkaita muutoksia, kuten esim. Kansallisen metsästrategia 2035:n valmistelun taustaselvityksessä on ennakoitu (kts. Kärkkäinen ym. 2022). Metsien käyttöön ja käytön hyväksyttävyyteen vaikuttavat merkittävästi kansainväliset sitoumukset ja sopimukset ja aiempaa voimakkaammin EU:n politiikka-toimet, joista metsiin on arvioitu kohdistuvan noin 70. EU:n perussopimukseen ei sisälly yhteistä metsäpolitiikkaa, mutta metsien käyttöön vaikuttavat useat EU:n sektoripolitiikat, joissa ovat korostuneet ilmaston ja luonnon monimuotoisuuteen liittyvät tavoitteet. Näistä tulevat vaatimukset metsien hiilinelujen vahvistamisesta ja lisääntyvästä metsien suojelusta johtavat vaikeaan metsien käytön yhteensovittamisongelmaan erityisesti metsäbiotalouden hyvän suhdanteen vallitessa.

Edellä kuvattuihin muutoksiin varautumiseksi on tuotettu laskelmia metsien käytön vaihtoehtoisista kehityskuluista sekä näiden vaihtoehtojen taloudellisista, puuntuotannollisista ja muista vaikutuksista. Skenaariot ovat kuvauksia tulevaisuuden vaihtoehtoisista kehityskuluista ja näihin skenaarioanalyysiin vaikuttavat toisaalta laskelmaoletukset, mutta toisaalta myös käytetty laskentatapa. Skenaarioanalyysija on laadittu ja päivitetty uusilla kehityskulkujen oletuksilla metsiin liittyvien kansainvälisten vaateiden lisääntyneitä erityisesti noin vuodesta 2018 lähtien. Tällaisia toisistaan eroavia tarkasteluja on tehty jo siinä määrin, että niiden tuloksista on mahdollista tehdä synteisiä. Toisaalta skenaarioanalyysien runsas määrä voi tarjota mahdollisuuksia meta-analysille yhteisten vaikuttavien tekijöiden tunnistamiseksi ja toisaalta laskelmien puutteiden korjaamiseksi.

Tämän raportin tavoitteena on

- kuvata Suomen metsien nykytilaa erityisesti niiden kansainväliseen toimintaympäristöön liittyvillä tunnuksilla (luku 1),
- esittää näkökulmia ja tutkimustarpeita nykyisten skenaarioiden synteisin perusteella (luku 2),
- esittää ja vertailla kahden erilaisen metsien kehityssimulaation tuloksia (luku 3).

Tietolaatikko 1. Tunnuslukuja Suomen metsistä kuten esitetty Kansallisessa Metsästrategiassa 2035

Metsät peittävät 75 % Suomen maapinta-alasta. Puuntuotantoon soveltuvaa metsämaata on 20 miljoonaa hehtaaria ja kitumaata 2,6 miljoonaa hehtaaria, joista yhteensä 13 prosenttia on suojeltu. Kaikkiaan metsätalouden pinta-alasta 23 prosenttia on suojeltu tai rajoitetussa metsätalouskäytössä. Metsätalouden kolmannes on soita ja suoalasta puolet on ojitettu.

Puuston vuotuinen kasvu on 103 miljoonaa kuutiometriä. Puuston kasvu on 1970-luvulta lähtien ollut poistumaa suurempi, joten metsien puuston määrä on jatkuvasti kasvanut nykyiseen 2,5 miljardiin kuutiometriin.

Hakkuumäärät vaihtelevat vuosittain, ja keskimäärin hakkuista kohdistuu noin kolmelle prosentille metsien pinta-alasta. Hakkuista noin kolme neljäsosaa on kasvatushakkuista ja noin neljännes tähtää uudistamiseen.

Yksityiset ihmiset omistavat metsämaasta noin 60 %. Yksityisten omistamilla noin 350 000 metsätilalla on yht. noin 620 000 omistajaa. Lukumääräisesti suurin osa puukaupoista tehdään yksityisten omistajien kanssa.

Metsäsektorin osuus koko kansantalouden arvonlisäyksestä on 4,3 % eli 9,3 miljardia euroa, joka jakautui metsätalouden (46 %), massa- ja paperiteollisuuden (33 %) ja puutuoteteollisuuden (21 %) välille. Metsäala vahvistaa merkittävästi erityisesti muiden kuin kasvumaakuntien työllisyyttä ja elinkeinomahdollisuuksia metsäteollisuuden, metsätalouden, luonnontuotteiden, luontomatkailun ja virkistyskäytön aloilla.

1.2. Suomen metsät osana EU:n maankäyttö-, maankäytön muutos- ja metsäsektoria (LULUCF)

EU:n ilmastolaki tavoittelee ilmastoneutraaliutta vuonna 2050 ja välitavoitteena kokonaisnettopäästöjen vähentämistä 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 kokonaisnettopäästöihin verrattuna. Monet EU-maat ovat asettaneet vastaavia tai kunnianhimoisempia kansallisia tavoitteita; esim. Suomen ilmastolain mukaan ”ihmisen toiminnasta aiheutuvat kasvihuonekaasujen päästöt vähentyvät ja nielujen aikaansaamat poistumat kasvavat siten, että kasvihuonekaasujen päästöt ovat enintään yhtä suuret kuin poistumat viimeistään vuonna 2035 ja että poistumat kasvavat ja päästöt vähenevät edelleen myös sen jälkeen”. Nämä tavoitteet edellyttävät hiilidioksidin poistoa ilmakehästä luonnollisten nielujen ja ajan mittaan myös teknologisten ratkaisujen avulla, kuten hiilidioksidin talteenotolla, käytöllä ja varastoinnilla. Luonnollisina nieluina erityisesti metsillä on tärkeä rooli, ja ne ovat tällä hetkellä pääasiallinen vaihtoehto hiilidioksidin poistamiseksi ilmakehästä.

EU:n maankäyttöä koskevan sääntelyn mukaisesti maankäyttö-, maankäytön muutos- ja metsäsektorin (LULUCF) päästöt eivät saa ylittää poistumia velvoitekausilla 2021–2025 ja 2026–2030. Tämä sitoumus perustui alkuperäisessä asetuksessa 2018/841 kirjanpitosääntöihin, joissa velvoitekauden 2021–2025 päästöt ja poistumat mitoitettiin suhteessa vertailukauteen 2000–2009. Mutasen ym. (2019) raportissa avattiin tämän jäsenvaltiokohtaisen vertailutasolaskennan perusteita selkokielisemmin varsinaisen laskennan ollessa vielä kesken. Silti raportissa tunnistettiin mm. vertailutasolaskennan herkkyyks ikäluokkajakaumalle (kts. myös Vauhkonen ym. 2021). Laskentatapaa on ylipäättään arvosteltu monimutkaisena toteuttaa ja herkkinä sovelletuille menetelmäoletuksille, minkä vuoksi tarkistetun, erityisesti vaatimukset vuodesta 2026 alkaen huomioivan LULUCF-asetuksen pitäisi yksinkertaistaa sektorin ilmastovaikutuksen laskentaa (kts. yhteenvetoa artikkelissa Korosuo ym. 2023).

Asetuksen soveltamisalaan kuuluvien raportoitujen nettopoistumien osalta EU:n kirjanpitovertailuarvo LULUCF-sektorille ja vuosille 2021–2025 on noin -225 Mt CO₂-ekv./vuosi. Tarkistettu vuoteen 2030 mennessä saavutettava tavoite on noin -310 Mt CO₂-ekv./vuosi. Viime vuosina EU:n LULUCF-toteumat ovat kuitenkin kehittyneet vastoin näitä tavoitteita (Kuva 1). Korosuo ym. (2023) luettelevat maiden kasvihuonekaasuinventaarioraporttien läpikäynnin perusteella syiksi poikkeuksellisia sääoloja kuten kuivuus (Tšekki, Itävalta, Saksa, Puola, Slovakia, Ranska, Ruotsi), maastopalot (Portugali, Italia), myrskytuhot (Italia, Itävalta) ja halla (Slovenia). Sääolojen aiheuttama puiden kuoleminen on johtanut kaarna-kuoriaistuhoihin sekä tuhoissa kuolleiden puiden ja tuhoille alttiiden puiden ennaltaehkäisevään korpukseen erityisesti Keski-Euroopassa. Puiden luontaisen kuolleisuuden odotetaan tulevana vuosikymmeninä lisääntyvän edelleen ilmastomuutoksen vuoksi. Lisäksi monet Itä-Euroopan maat ovat hiljattain alkaneet lisätä hakkuita vanhojen metsien vinon ikärakenteen tasaamiseksi.

Pohjoismaissa hiilinielu on toistaiseksi vaihdellut pääasiassa globaalin puunkysynnän aiheuttaman vuotuisten hakkuumäärien vaihtelun ja metsien kasvun kehittymisen vuoksi (Kuva 2). Suuresta vuotuisesta vaihtelusta huolimatta puuston tilavuus ja hiilivarasto ovat kasvaneet ja metsät ovat olleet nettohiilinielu. Suomen ja Ruotsin vuosikymmeniä jatkunut nettokasvun lisäys on kuitenkin tasaantunut ja edellisessä kappaleessa kuvattujen metsätuhojen odotetaan myös vaikuttavan Pohjoismaissa. Yhdessä tulevaisuudessa odotetun puunkäytön lisäyksen kanssa nämä muutokset vaikuttavat merkittävästi mahdollisuuksiin saavuttaa asetetut hiilinielutavoitteet.

Suomen LULUCF-sektori muuttui vuosien 2022–2023 kasvihuonekaasuinventaarion tilastojulkistuksissa kasvihuonekaasujen nettonielusta niiden nettopäästöksi. Muutos selittyi metsien alentuneella nettonielulla, joka ei enää kattanut muiden maankäyttöluokkien päästöjä. Nettonielun pudotusta selittävät ja LULUCF-velvoitteen toteutumista vaikeuttavat alentunut puuston kasvu ja korkeammat hakkuumäärät. Näistä alentunutta kasvua on selitetty kasvun vuotuisella vaihtelulla (erityisesti mäntymetsien kuivuden takia epäsuotuisat kasvukaudet) ja metsien ikärakenteella, korkeita hakkuumääriä kotimaisen puunkäytön lisääntymisellä (Haakana ym. 2022).

Tietolaatikko 2. Suomen kasvihuonekaasuille laadittuja skenaarioita vuodesta 2018 alkaen.

Kaikki alla mainitut skenaariolaskelmat on tuotettu Luonnonvarakeskuksen MELA-ohjelmistolla (Hirvelä ym. 2017). Laskennan lähtöaineistona on ollut kunkin viimeisimmän Valtakunnan Metsien Inventoinnin (VMI) maastokoealoista johdetut laskentayksiköt, joille on tuotettu mahdollisia käsittely- ja kehitysvaihtoehtoja luonnonprosessien (puiden syntyminen, kasvu ja kuoleminen) sekä eri ajankohtina toteutettavien hakkuiden ja metsänhoitotöiden simuloinnin kautta. Kasvuennuste perustuu laskennallisesti muodostettuihin kuvauspuihin, joita kasvatetaan puutason kasvumalleilla. Skenaarioiden hakkuuohjelma määräytyy maakunnittain laadituissa optimointilaskelmissa, jotka jäljittelevät kannattavaa metsätaloutta (nettotulotavoitteen maksimointi) maakunnan metsäteollisuuden arvioidun puunkäyttötarpeen pohjalta asetetuilla rajoitteilla aines- ja energiapuun hakkuukertymille.

2018–2019 LULUCF-WEM (With Existing Measures)-perustaso ja lisätoimet-skenaariot Maatalous- ja LULUCF-sektorien päästö- ja nielukehitys vuoteen 2050 (MALULU, Aakkula ym. 2019)-hankkeessa Suomen pitkän aikavälin kokonaispäästökehityksen (PITKO-hanke) ja energia- ja ilmastostrategian 2016 puitteissa.

2019 LULUCF-WEM, Jatkuva kasvu ja säästö-skenaariot Maatalous- ja LULUCF-sektorien kasvihuonekaasujen päästö- ja poistumaskenaariot vuoteen 2050 (MALUSEPO, Koljonen ym. 2020)-jatkohankkeessa MALULU:n laskennallisten ja laadullisten analyysien päivitys vastaamaan silloista hallitusohjelmaa kanssa, tarkentamaan hiilineutraaliustavoitteen aikataulua ja siihen liittyntä päästövähennyspolkua.

2021 WEM-perusskenaario ja politiikkaskenaariot (WAM, With Additional Measures) Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (HIISI)-hankkeessa samanaikaisesti ja yhdenmukaisesti muiden sektoreiden kanssa (Maanvilja ym. 2021). LULUCF-sektorin ilmastosuunnitelman päästövähennystä täsmentävä politiikkaskenaario (MISU-WAM, Ollila ym. 2022).

2022 Kansallisen Metsästrategian 2035 valmistelussa käyttöön aiemmat HIISI-WEM ja HIISI-WAM- ja uudet WAM-BD- ja SY-BD-skenaariot, joissa eroja puun energiakäytön, kasvatuslannoitusten, harvennushakkuiden ja kunnostusojitusten toteuttamisen ja suojelupinta-alan ja luonnonhoitotoimien (säästöpuiden määrän ja leh-tisekapuuston osuuden lisääminen) osalta (Kärkkäinen ym. 2022).

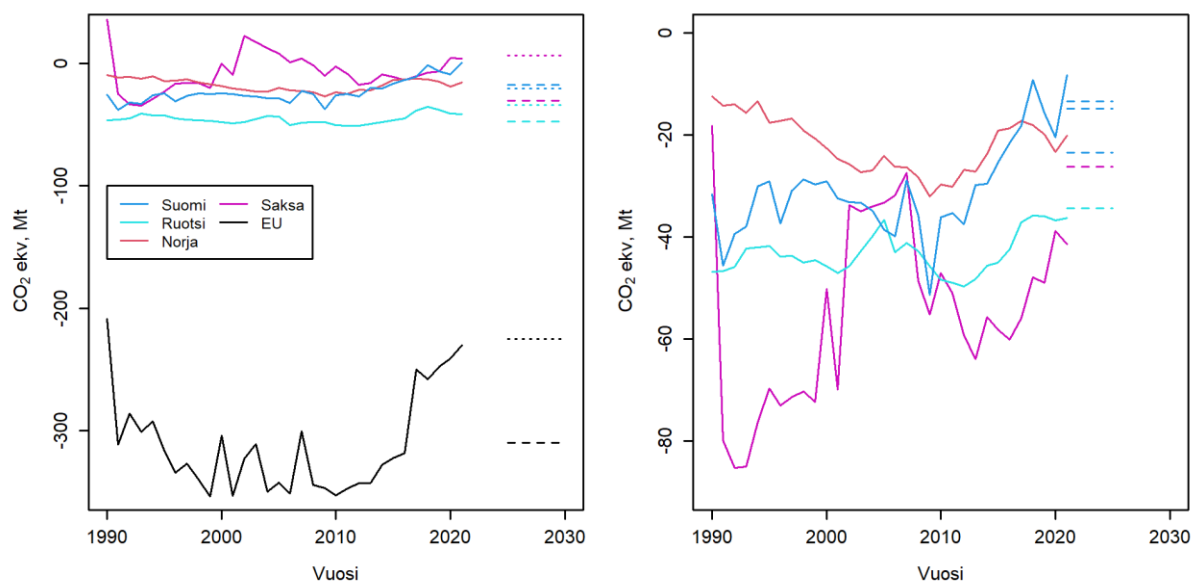
2024 MISU-WAM-skenaarion päästöjen ja poistumien päivitys toimintaympäristön muutosten, kotimaisen puunkäytön ja metsävarojen kehityksen seurauksena (Silfver ym. 2024).

Lisäksi MELA-ohjelmiston avulla lasketaan alueellisia tuotanto- ja käyttömahdollisuusarvioita valtakunnan metsien inventoinnin aineistojen avulla ja niitä ylläpidetään vapaasti käytettävissä olevassa MELA Tulospalvelussa (Luke 2023). Palvelu sisältää tällä hetkellä neljään eri inventointiin perustuvia arvioita, joista vanhimmat ovat vuosina 2004–2008 mitattuun VMI10-aineistoon perustuvia. Uusimpiin inventointeihin perustuvat laskelmat sisältävät ennusteen skenaarioiden mukaisesta kasvihuonekaasutaseen kehityksestä.

Suurin nettotulo (NT)-laskelma määrittää lähiajan suurimman välittömästi hakattavissa olevan aines- ja energiapuun hakkuukertymän (optimoinnin tavoite nettotulojen nykyarvon maksimointi 5 % tuottovaatimuksella), kun toiminnan kestävyys- ja lopputilan puustovaatimuksia ei huomioida. Laskelmassa hakataan kaikki metsänhoidon suositusten mukaiset hakkuukypsät puustot, jotka eivät täytä kasvatuksen tuottovaatimusta.

Suurin ylläpidettävissä oleva aines- ja energiapuun hakkuukertymä (SY)-laskelma määrittää hakkuiden ylärajan silloin, kun edellytetään metsätalouden taloudellista ja puuntuotannollista kestävyyttä. Laskelmassa on tavoitteena nettotulojen nykyarvon maksimointi 4 % tuottovaatimuksella ja laskelmakausittaiset rajoitteet nettotuloille ja aines- ja energiapuun kokonaishakkuukertymille, tukkipuukertymälle ja puuston tuottoarvolle. Laskelmassa ei rajoiteta kasvun ja poistuman suhdetta, metsien ikäluokkarakennetta tai uudistushakkuiden määrää eikä puulajeittaista kestävyyttä hakkuukertymän tai puuston rakenteen suhteen edellytetä.

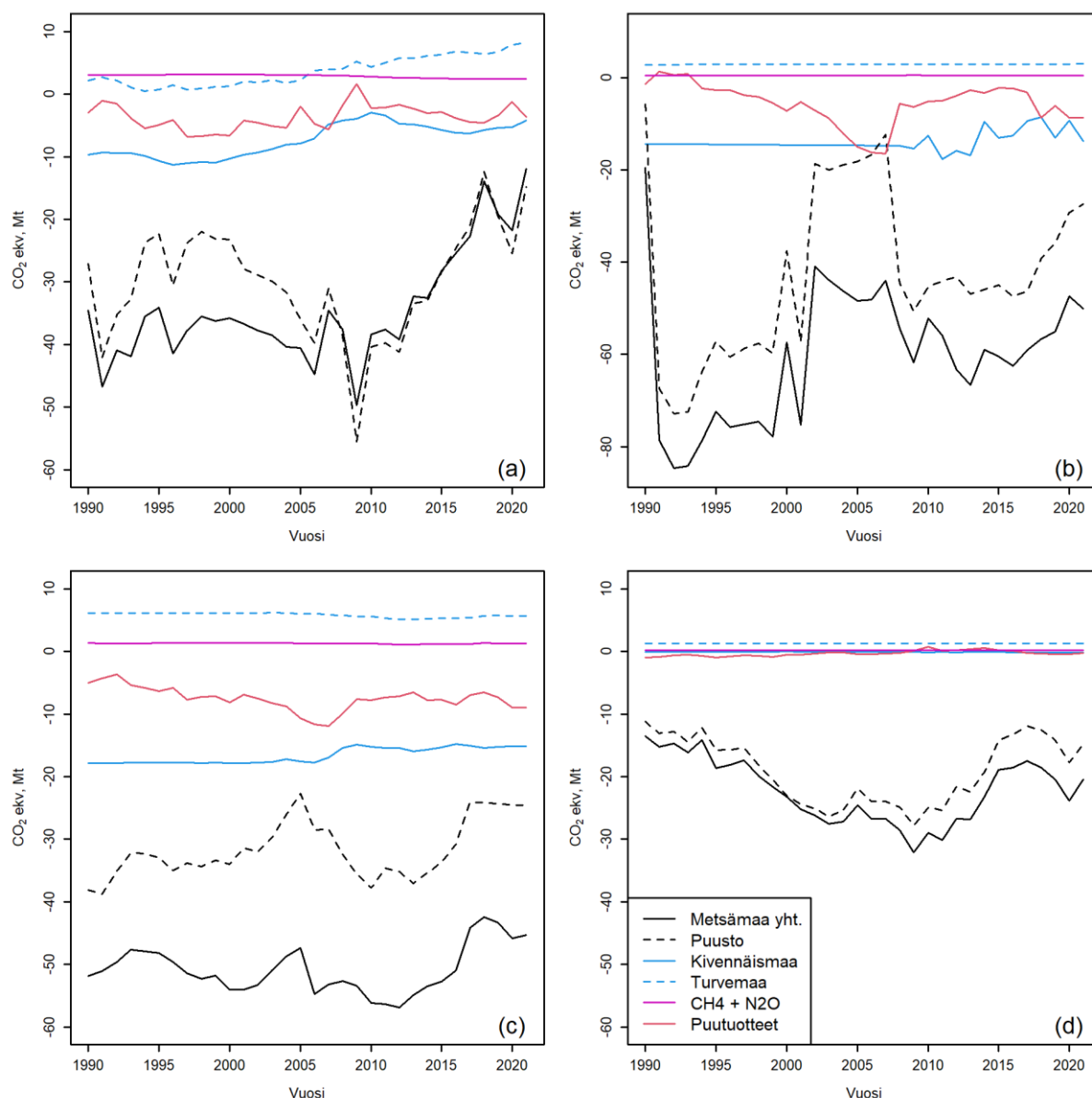
Toteutunut hakkuukertymä (TH)-laskelma kuvaa metsävarojen kehittymistä, jos aines- ja energiapuun hakkuuta jatketaan viime vuosien keskimääräisellä tasolla. Laskelmassa maksimoidaan nettotulojen nykyarvoa neljän prosentin korkokannalla siten, että kullakin laskelmakaudella hakkuumäärät vastaavat keskimääräisesti aiempien vuosien tilastoituja aines- ja energiapuun korjuumääriä maakunnittain. Laskelma ei rajoita hakkuupinta-aloja tai hakkuukertymiä toteutuneisiin hakkuutapoihin, kasvupaikkoihin tai läpimittaluokkiin.



Kuva 1. LULUCF-sektorin (vasemmalla) ja metsämaan (oikealla) kasvihuonekaasutase vuosina 1990–2021 ja tavoitteet LULUCF-nielun kehitykselle (katkoviivat). Yhtenäiset viivat kuvaavat viimeisimpien maakohtaisten kasvihuonekaasuinventaariorien tuloksia (lähde UNFCCC:n vuoden 2023 CRF-raportti; kaasut CO₂, CH₄ ja N₂O, joista jälkimmäiset muunnettu CO₂-ekvivalenteiksi AR5-kertoimilla). Katkoviivat kuvaavat tavoitteita: vasemmalla lyhyet katkoviivat kuvaavat Baseline- (yht. 225 Mt CO₂-ekv./vuosi) ja pidemmät Opt. 1.2- (yht. 310 Mt CO₂-ekv./vuosi) tavoitteita kokonaisuutena ja jäsenmaille jyvitettyinä EU:n komission työraportista (EC 2021; Table 12). Oikean puolen kuvaajassa tavoitteet ovat maakohtaiset vertailutasot ilman puutuotteita (Suomelle alkuperäinen ja kahden teknisen korjauksen jälkeinen taso järjestyksessä alhaalta ylöspäin).

Maaperä on boreaalisten metsien suurin hiilivarasto. Kivennäismailla maaperässä on kaksi kolmasosaa metsien koko hiilivarastosta, turvemilla tätä enemmän. Maaperän hiilivaraston vuosittaiset muutokset ovat usein pienempiä kuin puuston. Muutokset riippuvat puustosta, sillä maaperän hiilisyötteestä suurin osa on peräisin puuston tuottamasta karikkeesta ja hakkuutähteistä; pintakasvillisuus tuottaa kariketta puustoa vähemmän. Useiden vuosien ja vuosikymmenten aikaskaalalla maaperän hiilivaraston muutokset seuraavat puuston määrän muutoksia, koska kariketuotos vaihtelee puuston määrän mukaan. Vuosien välillä maaperän hiilimäärän muutokset vaihtelevat hakkuumäärien ja sääolojen mukaan. Suuret hakkuut tuottavat paljon hakkuutähteitä, mikä lisää maaperän hiilimäärää hetkellisesti. Näin maaperän hiilivaraston muutokset tasaavat puuston ja maaperän hiilivarastojen yhteenlasketun hiilimäärän vuosittaisia muutoksia. Vuodesta toiseen vaihtelevat sääolot vaikuttavat maaperän mikrobien hajotustoimintaan ja sen seurauksena maaperän hiilimäärän vuosittaisiin muutoksiin. Lämpimät ja kosteat säät lisäävät hiilen vapautumista maaperästä takaisin ilmakehään. Hakkuumäärien vaihtelun on arvioitu olleen sääolojen vaihtelua merkittävämpi syy maaperän hiilimäärämuutosten vuosittaiseen vaihteluun Suomessa (Liski ym. 2006).

Suomessa vuoden 2023 kasvihuonekaasuinventaarion yhteydessä uudistettu ojitettujen suomensien maaperän hiilidioksidipäästöjen laskentamenetelmä, joka ottaa huomioon turpeen ja karikkeen nopeamman hajoamisen ilmaston lämmitessä, aiheutti päästöjen kasvun erityisesti kasvihuonekaasuinventaarion aikasarjan (1990–2021) lopussa vanhaan menetelmään verrattuna (kts. myös luku 2). Suomen metsien vertailutasolaskentaan kasvihuonekaasuinventaarion menetelmämuutos vaikuttaa teknisenä korjauksena, jonka kautta vertailutason mukainen nielu pienenee muutosta vastaavasti. Suomen metsämaan alkuperäinen vertailutaso (-23,49 Mt CO₂-ekv. ilman puutuotteita) päivitettiin arvoihin -14,84 Mt CO₂-ekv. ja -19,3 Mt CO₂-ekv ensimmäisessä ja toisessa teknisessä korjauksessa (Luke 2024).



**Kuva 2. Metsämaan kasvihuonekaasutase vuosina 1990–2021 jaettuna puuston, kivennäis- ja turve-
maan maaperän ja puutuotteiden osuuksiin Suomessa (a), Saksassa (b), Ruotsissa (c) ja Norjassa (d).
Lähde: UNFCCC:n vuoden 2023 CRF-raportit, joista kaasujen poiminta ja käsittely kuten kuvassa 1.**

Puutuotteiden nettonielu kuvaa sahatavaran, puulevyjen sekä paperin ja kartongin hiilivarastoissa tapahtuvaa muutosta. Näiden tuoteryhmien tuotannon kasvaessa myös niiden nielu kasvaa, kun taas tuotteisiin sitoutuneen vanhan hiilivaraston poistuma alkaa pienentää nielua tuotannon pysyessä samana. Tuotteiden hiilivaraston suuruus on metsämaata pienempi ja metsämaalla tapahtuvista hakkuista riippuva, mutta vähemmän vaihteleva; esim. Kansallisen Metsästrategian 20235 taustaskenariossa puutuotteiden nettonielun oletettiin vaihtelevan 2,6 ja 3,7 Mt CO₂-ekv. välillä.

EU:n tarkistettu maankäyttöä koskeva sääntely velvoittaa jäsenvaltioita kehittämään kasvihuonekaasuinventaarion menetelmiä siten, että ensimmäisen tason (Tier 1) raportoinnista siirryttäisiin toisen ja kolmannen tason (Tier 2–3) raportointiin. Tasolla 1 raportoinnissa sovelletaan keskimääräisiä muunnosyhtälöitä ja -kertoimia, tasolla 2 maakohtaisia päästökertoimia ja tasolla 3 raportointi perustuu kansallisten mittauksen tai mittauksiin perustuvien mallien käyttöön. Suomen LULUCF-sektorin metsämaa ja puutuotteet on raportoitu tasojen 2–3 käytäntöjen mukaan, mutta kansainvälisesti näiden tasojen soveltaminen vaihtelee hyvin paljon: esimerkiksi vuoden 2020 inventaarioraporttien perusteella ja

maaperäpäästöjen osalta 19 / 27 EU-jäsenmaan raportointi perustui tasoon 1 vaadittavien tasojen 2-3 sijaan (Abad Viñas 2022). Edelleen metsien maaperän hiilitaseen osalta yli puolet EU:n metsämaan pinta-alasta perustui tason 1 raportointiin, minkä perusteella Bellassen ym. (2022) arvioivat maaperän hiilivarastojen voivan todellisuudessa olla tuplasti kasvihuonekaasuinventaariorissa raportoidun määrän. Raportointisäännösten kiristymisen voi odottaa tuottavan muutoksia EU-maiden hiilinieluihin. Suomen kasvihuonekaasuinventaarion osalta yllä kuvattu ojitettujen suometsien maaperän hiilidioksidipäästöjen laskentamuutos vastasi siirtymää tasolta 2 tasolle 3. Toisaalta Bellassen ym. (2023) mukaan myös Suomen ojitettujen turvemaiden luonnollisten ja hakkuiden aiheuttamien metaani- ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen tarkempi huomiointi voi edelleen aiheuttaa muutoksia laskelmiin.

Myös puutuotteiden raportointiin on useita vaihtoehtoisia menetelmiä (Soimakallio ym. 2021). Suomen puutuotteiden hiilivarastomuutokset raportoidaan tuotantotilastojen sekä tuotekategoriakohtaisten päästökerrointen ja puoliintumisaikojen perusteella. Tuotteiden elinkaareksi saadaan IPCC:n keskimääräisillä kertoimilla sahatavaraalle 35 vuotta, puulevyille 25 vuotta ja paperille ja kartongille 2 vuotta. Tuotteisiin sitoutuneen hiilen elinkaari olisi mahdollista laskea tarkemmin ja yksityiskohtaisemmissa kategorioissa (esim. Rätty ym. 2021), mutta EU:n LULUCF-velvoitteet rajoittavat laskentaa: kotimaahan jäävien puutuotteiden osalta laskenta voisi perustua kansallisiin puoliintumisaikoihin, mutta viennin osalta tulisi soveltaa vientimaan kertoimia (Soimakallio ym. 2021). Jos pitkäaikaisten puutuotteiden merkitys jatkossa kasvaa, niin tuotteiden kuvausta kasvihuonekaasuinventaariorissa voi olla perusteltua tarkentaa.

1.3. EU:n biodiversiteettistrategian ennakoitut vaikutukset Suomen metsien käytölle

EU:n vuoteen 2030 ulottuvan biodiversiteettistrategian mukaan biodiversiteetin häviämisen pysäyttäminen edellyttää luonnon suojelun ja ennallistamisen tehostamista. Strategiassa on esitetty koko EU:ta koskevat tavoitteet toimiksi biodiversiteetin häviämisen pysäyttämiseksi vuoteen 2030 mennessä. Tämä olisi toteutettava kehittämällä ja laajentamalla suojelualueiden verkostoa ja laitimalla kansallinen luonnon ennallistamissuunnitelma. EU:n biodiversiteettistrategian 30 prosentin suojelutavoite kattaa kaikki elinympäristöt. Biodiversiteettistrategian tavoitteet koskevat osittain koko EU:n aluetta, eikä tavoitteita ole jyvitetty yksittäisille jäsenmaille. Myös tavoitteiden ja niissä käytettyjen käsitteiden tulkinta on vielä osittain epäselvää. Lisäksi arvioinnissa käytettävissä olevien aineistojen ja menetelmien laatu vaihtelee tavoitteittain, mikä vaikuttaa eri tavoitteiden lähtötilanteen ja vaikutusten arvioinnin tarkkuuteen.

Suomen metsistä oli suojeltu 2022 tilastojulkistuksen mukaan noin 13 prosenttia metsäpinta-alasta, mikä on noin prosenttiyksikön enemmän vuoden 2016 tilastojulkistukseen verrattuna. Tilastoon lasketaan lakisääteiset suojelualueet, talousmetsien monimuotoisuuden suojelukohteet ja luontoarvojen suojelua tukevat erityisalueet Suomessa kansallisesti käytetyn määritelmän mukaisesti metsä- ja kitumaan yhteispinta-alana. Luokituserot kansallisissa ja kansainvälisissä tilastoissa vaikeuttavat suojelutilastojen vertailua. Valtakunnan metsien inventoinnissa metsämaa on jaettu kolmeen käyttöluokkaan: rajoittamattoman puuntuotannon metsiin, rajoitetun puuntuotannon metsiin ja puuntuotannon ulkopuolella oleviin metsiin. MELA-ohjelmistoon perustuvissa hakkuulaskelmissa käytetään samaa luokitusta siten, että rajoitetun puuntuotannon metsissä ei laskelmissa tehdä uudistushakkuuta ja puuntuotannon ulkopuolella olevissa metsissä ei tehdä mitään metsätaloustoimia.

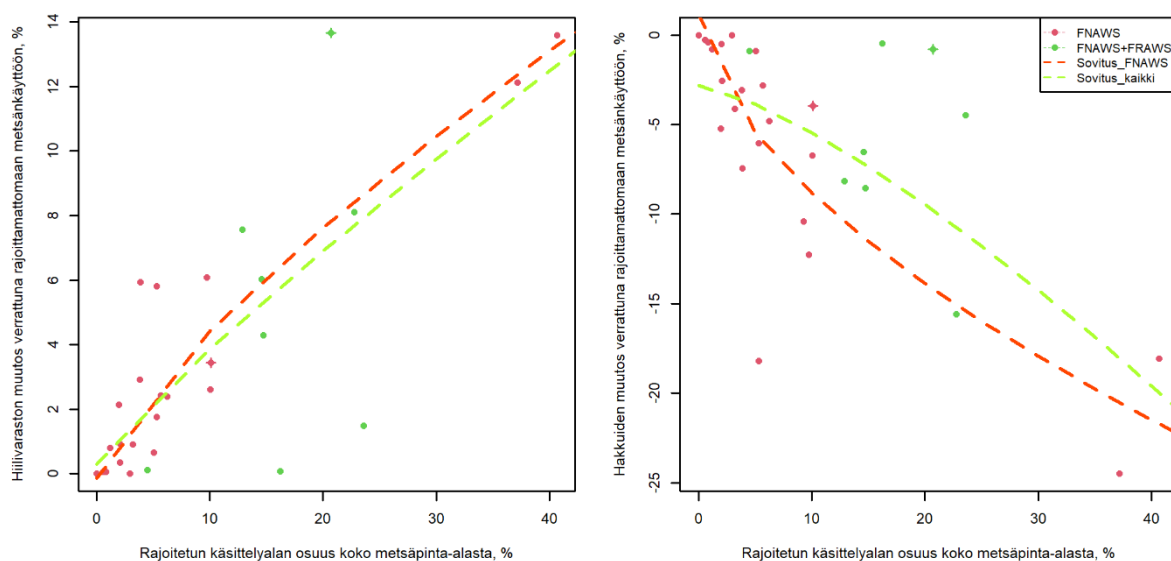
VMI-pohjainen jako rajoittamattomaan, rajoitettuun ja puuntuotannon ulkopuolella oleviin metsiin helpottaa vertailuja ainakin Euroopan VMI-aineistojen kesken. Edellä mainitut käsitteet vastaavat "puunhankintaan käytettävissä olevat metsät" (Forests Available for Wood Supply), "puunhankintaan rajoitustusti käytettävissä olevat metsät" (Forests with Restrictions on Availability for Wood Supply) ja "puunhankinnan ulkopuoliset metsät" (Forests Not Available for Wood Supply) -luokittelua, joka on saatavilla Euroopan VMI-aineistoista ja jota on yhdenmukaistettu metsien käyttöön vaikuttavien hallinnollisia rajoituksia koskevien määritelmien ja oletusten osalta (esim. Alberdi ym. 2016, Fischer ym. 2016). Vauhkonen ym. (2019) mallinsivat 23 Euroopan maan puuntuotannon ulkopuolisen pinta-alan vaikutuksia

hiilivarastoon ja hakkuukertymiin verrattuna teoreettiseen tilanteeseen, jossa rajoitetun puuntuotannon tai puuntuotannon ulkopuoliset metsät olisivat puuntuotannossa. Muihin maihin verrattuna Suomen metsämaalla on suhteellisen paljon puuntuotannon rajoituksia, mutta varsinkin rajoitetusti puunhankintaan käytettävissä olevat metsät ovat vähäpuustoisia tai niitä voidaan käsitellä pienipiirteisesti niin, että vaikutukset hiilivarastoon ja hakkuusiin poikkeavat muista Euroopan maista (Kuva 3).

Jos puuntuotannon rajoitukset lisääntyisivät, uudet rajoitetut kohteet olisivat todennäköisesti puustoisempia ja vaikuttaisivat voimakkaammin metsien käyttöön ja näihin tunnuksiin. Vauhkonen ja Packalen (2019) simuloivat uusien metsän käytön rajoitusten vaikutuksia siirtämällä metsiä FRAWS- ja FNAWS-kategorioihin ja simuloimalla niiden kehitystä, kuten metsiä, joissa näitä rajoitteita oli VMI-aineiston mukaan. Rajoitteet kasvattivat hiilivarastoja ja vähensivät hakkuita rajoitettujen kohteiden puustoisuudesta riippuen (neljä erilaista metsien käytön rajoitusten allokaatiota puuston perusteella). Artikkelin mukaan suurimmat vaikutukset kohdistuivat puunhankinnan yksikkökustannuksiin erityisesti, jos metsien käytön rajoitusten myötä puunhankinta kohdistuu vähemmän järeisiin puustoihin ja niiden poimintahakkuisiin. Myös Luken jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen synteisiraportin (Routa & Huuskonen 2022) mukaan hakkuun ja metsäkuljetuksen pienempi tuottavuus nostaa poimintahakkuun korjuukustannuksia korkeammiksi kuin avohakkuussa, koska työn suunnittelu ja alempien latvuserrosten varominen hidastavat työtä. Lisäksi EU-politiikkojen mahdollisia korjuukustannusvaikutuksia on tarkasteltu kolmessa tulevaisuuden toimintaympäristöskenaariossa (Väättäinen ym. 2023). Skenaariosta riippuen ja olettaen vuotuisen ainespuun korjuumäärän vastaavan vuosien 2017–2021 keskimääräistä tasoa lisäkustannuksiksi arvioitiin 28–117 miljoonaa euroa koko Suomen osalta. Samanaikaisesti korjuukaluston ja koneenkuljettajien tarve kasvaisi 2–15 prosenttia.

Luken skenaariolaskelmien mukaan (Kärkkäinen & Koljonen 2023) metsä- ja kitumaiden noin 5 prosentin lisäsuojelu kokonaisuus-alasta lisäisi uudistushakkuita talousmetsissä, minkä seurauksena nuorten metsien kokonaispinta-ala kasvaisi verrattuna skenaarioon, jossa suojelutoimet ovat nykytasolla. Laskelmat tehtiin oletuksella, että lisäsuojelu toteutettaisiin heti ja vuotuiset hakkuumäärät olisivat 72,4 miljoonaa kuutiometriä seuraavan 30 vuoden aikana. Laskelmissa ei pystytty arvioimaan sitä, vaikuttaisiko lisäsuojelu puun tarjontaan ja sitä kautta hakkuumääriin. Lisäsuojeluprosentti saatiin vähentämällä biodiversiteettistrategiassa mainituista 30 %:n tavoitteesta arvioitu tämänhetkinen suojeluprosentti. Näin lisäsuojeluprosentiksi saatiin noin 11 %, joka jaettiin metsä- ja kitumaan, joutomaan ja muiden maa-alueiden (sis. makean veden) kesken samassa suhteessa kuin nykyinen suojelu, ja päädyttiin 5 prosentin lisäsuojeluun metsä- ja kitumaalla.

Kaikki Kärkkäisen ja Koljosen (2023) tarkastelujen lisäsuojeluvaihtoehdot kasvattivat puuston kokonais-tilavuutta ja lisäsivät uudistushakkuiden pinta-alaa, ja siksi lisäsuojelua sisältävissä skenaarioissa kokonaistilavuus kasvoi vähemmän kuin nykyisen suojelutason skenaariossa. Kun lisäsuojelu toteutettiin tiukkana lisäsuojeluna, vanhoissa metsissä olevan puuston tilavuus kasvoi. Lisäsuojelun aiheuttama hakkuupaine kohdistuisi kuitenkin suojelun ulkopuolisiin vanhempiin metsiin, joten suojelun toteutus-tapa voi vaikuttaa merkittävästi siihen millaisia metsiä suojelun tuloksena kokonaisuutena säästyy. Onkin huomioitava, että muun lisäsuojelun mallintamiseen liittyy selkeästi enemmän epävarmuuksia kuin muihin mallituloksiin ja muun suojelun ekologisten vaikutusten arviointi vaatii tarkempaa analyysiä. Kärkkäisen ja Koljosen (2023) tarkastelussa ei laskettu suojelun toteuttamisen kustannuksia ja niiden vaikutuksia, jotka voisivat olla merkittäviä jo lisäsuojelualueilla olevan yli 100 miljoonan puukuutiometrin arvo huomioimalla. Edelleen tässä tarkastelussa vaikutukset kantorahatuloihin, hakkuukertymiin ja metsäteollisuuden tuotantoon olivat vähäiset verrattuna näiden vaihteluun 2000-luvulla tai lopputuotteiden kysynnän mahdollisiin vaikutuksiin. Tässä suhteessa tarkastelujen tulokset eroavat merkittävästi riippuen oletetaanko lisäsuojelun siirtävän hakkuut niiden nykyisessä laajuudessaan suojelun ulkopuolisiin metsiin vai vähentävän hakkuumääriä kokonaisuutena. Kniivilän ym. (2022) tarkastelussa vaikutus suurimpaan ylläpidettävissä olevaan hakkuukertymäarvioon oli 1–2 tai 7–11 miljoonaa kuutiometriä vuodessa suojelun toteutuksesta riippuen. Edelleen tiukan lisäsuojelun arvonlisäystä alentava vaikutus oli 200 tai 400–800 euroa vuodessa lisäsuojeltua hehtaaria kohti toteutuksesta, tarkastelujaksosta ja laskentamenetelmästä riippuen.



Kuva 3. Rajoitetusti metsätalouteen käytettävissä olevan pinta-alan (FNAWS, puunhankinnan ulkopuoliset metsät ja FRAWS, puunhankintaan rajoitetusti käytettävissä olevat metsät) vaikutus hiilivarastoon (puuston tilavuus) ja hakkuihin verrattuna teoreettiseen tilanteeseen, jossa kaikki metsäpinta-ala on käytettävissä puuntuotantoon. Kuva perustuu 23 Euroopan maan aineistoon artikkelissa Vauhkonen ym. (2019).

1.4. Muut skenaariotarkastelut

Kansallisen metsästrategian 2035 valmistelun taustaselvitys (Kärkkäinen ym. 2022) sisältää edellä mainittuihin tunnuksiin liittyvien tarkastelujen lisäksi myös skenaarioita muille kuin puuntuotantoon liittyville tunnuksille. Metsien monimuotoisuutta eri skenaarioissa tarkasteltiin puuston rakennepiirteiden ja aluskasvillisuuden peittävyden kautta. Rakennepiirteet liittyivät haavan ja muiden lehtipuiden kuin koivujen suosimiseen säästöpuina, mikä kasvatti näiden puiden tilavuuksia. Aluskasvillisuutta kuvaavia muuttujia olivat mustikan, puolukan, jäkälien, ruohojen, heinien ja kanervan peittävydet. Niitä ennustettiin 8. VMI:n pysyvien koealojen kasvillisuusaineistosta laadituilla malleilla kasvupaikka- ja puustotunnusten sekä metsänkäsittelyä kuvaavia tunnusten (hakuut ja maanmuokkaus) perusteella. Käsitteilyjen vaikutusta marjasatoihin mallinnettiin keskimääräisen satovuoden mustikka- ja puolukkasatomalleilla, joiden selittäjinä käytettiin metsikölle malleilla ennustettua marjalajin peittävyttä sekä metsikön kasvupaikka- ja puustotunnuksia. Lisäksi työssä huomioitiin luonnontuotteiden keruumahdollisuudet sellaisten kohteiden pinta-aloina, joilla on mahdollista kerätä kuusenkerkkiä, valuttaa koivunmahlaa, viljellä (ympätä) pakuria eläviin koivuihin ja viljellä lakkakääpää sekametsien tuoreisiin harvennuskantoihin. Työssä laskettiin vuosittainen vesistökuormitus eri metsätaloustoimenpiteiden ominaiskuormituksena, joka sopii eri metsätaloustoimien runsaussuhteissa tai pinta-aloissa tapahtuvien muutosten vertailuun. Typen, fosforin ja liukoisen orgaanisen hiilen kuormitukset kasvoivat toimenpiteiden runsastumisen myötä. Monimuotoisuustoimilla (suojeltujen metsien pinta-alan, säästöpuiden määrän ja lehtisekapuuston lisääminen) voitiin lisätä metsien virkistysarvoa, mutta muuten skenaarioiden välillä oli vähän eroa kaikissa edellä mainituissa tunnuksissa.

Edellä mainittu työ sisältää arviot metsäteollisuuden ja -talouden arvonlisäyksestä ja työllisyyden kehityksistä kerrannaisvaikutuksineen. Markkinakehitys ja toimintaympäristön muutostekijät vaikuttivat Suomessa tuotettujen metsäteollisuustuotteiden tuotantomääriin, puun kysyntään ja metsätalouteen. Skenaariot, joissa perinteisen sahateollisuuden tuotosta käytettiin enemmän jatkojalostukseen kotimaisessa muussa puutuoteteollisuudessa, tuotti tulosten mukaan noin kolmasosan suuremman metsäsektorin tuottaman oman arvonlisäyksen vuonna 2050 kuin vuonna 2020.

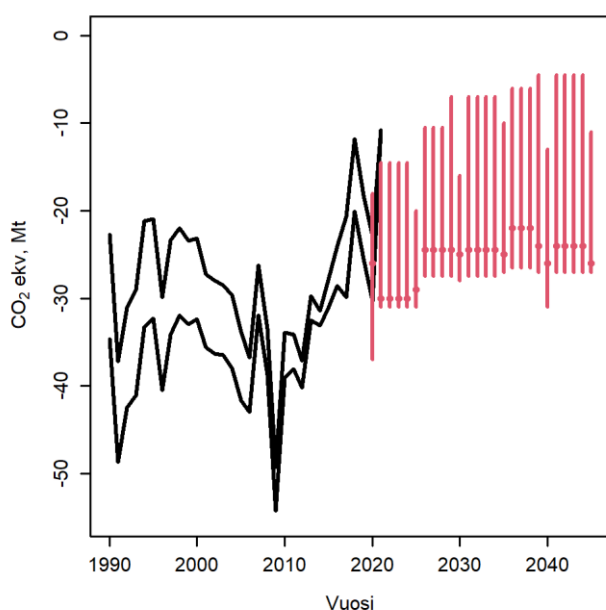
2. Näkökulmia ja tutkimustarpeita

2.1. Kasvihuonekaasuinventaarion tarkentuminen haastaa ennakkointia

Tilastokeskuksen mukaan ”kasvihuonekaasujen inventaarion päästö- ja poistumaluvut tarkentuvat koko aikasarjan osalta joka vuosi, koska inventaariossa tehdään jatkuvasti parannuksia ottaen huomioon inventaarion kansainvälisten tarkastusten suositukset ja päästölaskentamenetelmien tieteellisen perustan kehittyminen. Laskentamuutokset kuvataan vuosittain YK:lle ja EU:lle toimitettavassa inventaarioraportissa.”

Tärkeimpinä vuoden 2023 raportoinnin uudistuksina ovat jo luvussa 1.2. mainittu metsämaan ojitettujen turvemaiden maaperän ja karikkeen hiilidioksidipäästöjen laskennan uusi menetelmä (Alm ym. 2023). Laskennan periaate on sama kuin vanhassa menetelmässä: maaperän hiilidioksidipäästöt arvioidaan turpeen ja karikkeen hajoamisen (vapauttaa hiiltä maaperästä hiilidioksidina ilmakehään) ja puiden ja aluskasvillisuuden karikesyötteen (tuo ilmakehän hiilidioksidista sidottua hiiltä maaperään) erotuksena. Tulosten ero selittyy sillä, että lämpenevä ilmasto kiihdyttää turpeen ja karikkeen hajoamista. Lisäksi koko puustobiomassan aikasarja vuodesta 1990 lähtien on päivitetty VMI:n kasvunlaskentaan toteutettujen muutosten seurauksena.

Uudistukset luultavasti tarkentavat tietoa kyseisten tunnusten osalta, mutta toisaalta ennusteiden vaihtelu yli ajan luo päätöksenteon kannalta vaikeasti ennakoitavan tilanteen, jossa tämänhetkiset parhaat tiedot voivat olennaisesti muuttua vuosien tai vuosikymmenien päästä. Esimerkkinä koko kasvihuonekaasuinventaariossa raportoidun historiallisen aikasarjan muuttuminen ainoastaan vuosien 2019–2023 raportoinneissa (Kuva 4 ja 5). Kasvihuonekaasuinventaarion vuotuinen vaihtelu yhdessä tietojen tarkentumisen aiheuttaman vaihtelun kanssa vastaa suuruusluokaltaan skenaarioiden nieluennusteissa olevaa hajontaa, joskin skenaariot tyypillisesti ennustavat suurempia nieluja kuin on viime vuosina toteutunut (Kuva 4).



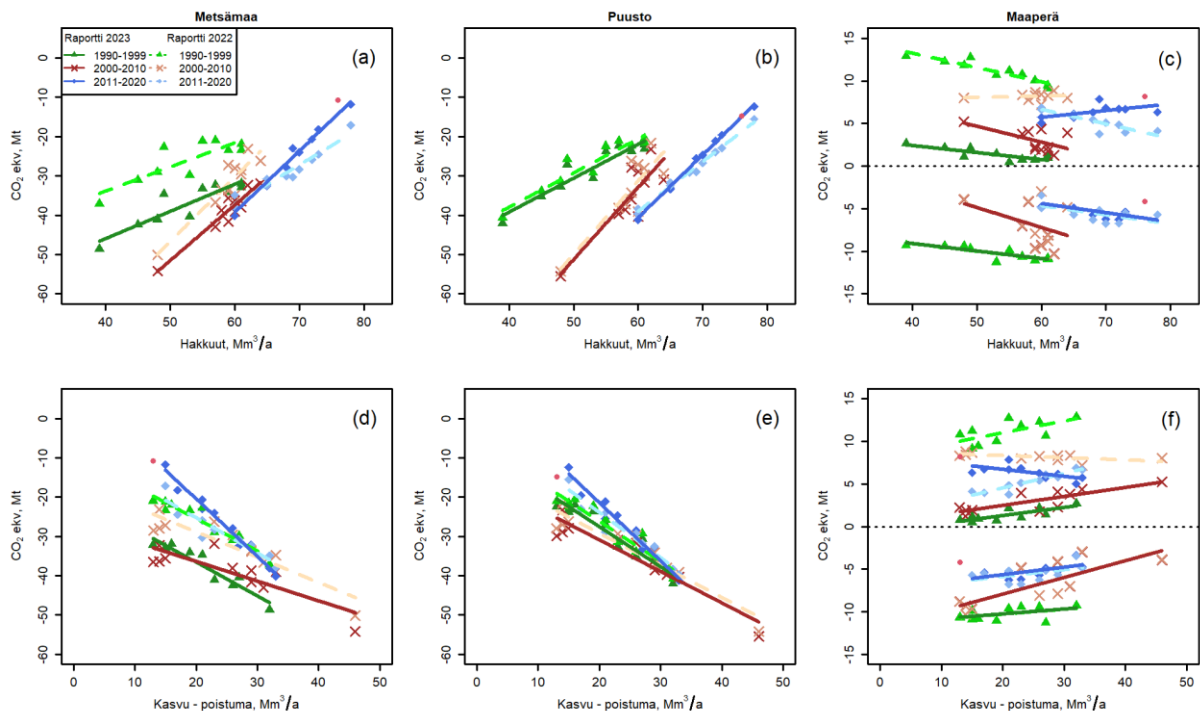
Kuva 4. Suomen metsämaan nielun vaihtelu vuosien 2019–2023 kasvihuonekaasuinventaarioraportteissa (mustat yhtenäiset viivat) ja nielun ennusteet Tietolaatikon 2 kehitysskenaarioissa (punaiset pisteet ja viivat kuvaavat vuosikohtaisten ennusteiden mediaaneja \pm kvartiilivälin pituus). Lähde: UNFCCC:n vuosien 2019–2023 CRF-raportit; huomioitu metsämaan (puusto ja maaperä) CO₂.

Kansallisen tason hakkuu- ja nielutilastojen välillä on yleensä raportoitu vahva lineaarinen relaatio (kts. esim. Kuva 7 raportissa Silfver ym. 2024), mutta sen tarkka muoto vaihtelee huomattavasti riippuen siitä (1) minkä vuosien havaintoihin ja (2) minkä vuoden inventaarioraportointiin tiedot perustuvat (Kuva 5). Näiden tekijöiden osuutta voi arvioida historiallisten aikasarjojen perusteella kuvasta 5:

1. Kuvan 5 eriväristen viivojen vertailuna, miten erisuuruiset hakkuut (Kuva 5, yläriivi) ja kasvun ja poistuman erotus (Kuva 5, alarivi) ovat vaikuttaneet eri ositteiden CO₂-nieluun, ja
2. Kuvan 5 samanväristen yhtenäisten- ja katkoviivojen vertailuna, miten havaintojen muuttuminen (tietojen tarkentuminen) inventaarioraporttien välillä on vaikuttanut näihin tunnuksiin, kun kuvassa 5 tarkastelussa on kahden vuoden (2022 ja 2023) välisten inventaarioraporttien ero samojen tunnusten aikasarjoissa.

Koko metsämaan nielu (Kuva 5, osakuvat a ja d) muodostuu pääasiassa puustobiomassan nielusta, johon hakkuut ja kasvun ja poistuman erotus ovat vaikuttaneet erilaisella voimakkuudella tähän tarkasteluun valittuina tasavuosikymmeninä (Kuva 5, osakuvat b ja e). Maaperänielu lisää tuloksiin ennen kaikkea eri vuosikymmeninä vaihtelevan tasoeron (Kuva 5, osakuvat c ja f). Tässä kuvatut vaikutukset näkyvät erityisesti nielun ja kasvun ja poistuman erotusta kuvaavan relaation osakuvissa.

Hakkuiden tai kasvun ja poistuman vaikutus maaperätaseisiin on ollut melko neutraali, ainakin puustobiomassan vaihteluun verrattuna, mutta eritasoinen eri vuosikymmeninä. Eri vuosien inventaarioraporttien välisen tietojen tarkentumisen vaikutus on puustobiomassan ja kivennäismaan maaperän osalta vähäisempi, mutta merkittävä turvemaiden osalta: edellä mainittu turvemaiden laskennan menetelmämuutos muuttaa näitä relaatioita siten, että kahden eri vuoden inventaarioraporttien perusteella hakkuiden tai kasvun ja poistuman erotuksen ja koko metsämaan nielun välisestä suhteesta olisi mahdollista tehdä hyvin erilaisia päätelmiä.



Kuva 5. Metsämaan ja sen ositteiden CO₂-tase vs. hakkuut (yläriivi) tai kasvun ja poistuman erotus (alarivi). Metsämaa yhteensä (osakuvat a ja d) muodostuu puustobiomassan (b ja e) ja maaperän (c ja f; kivennäis- ja turvemaiden luvut samoissa osakuvissa siten, että negatiiviset nielut kuvaavat edellisiä ja positiiviset päästöt jälkimmäisiä) osataseista. Pisteet kuvaavat vuosien 2022 ja 2023 kasvihuonekaasuinventaarioraportoitua tietoa (lähde: UNFCCC:n ao. CRF-raportit). Viivat kuvaavat x- ja y-akselin tunnusten välille estimoitua yhden selittäjän lineaarista regressiomallia, kun se on sovitettu viivan kanssa samanvärisillä symboleilla esitettyihin havaintoihin.

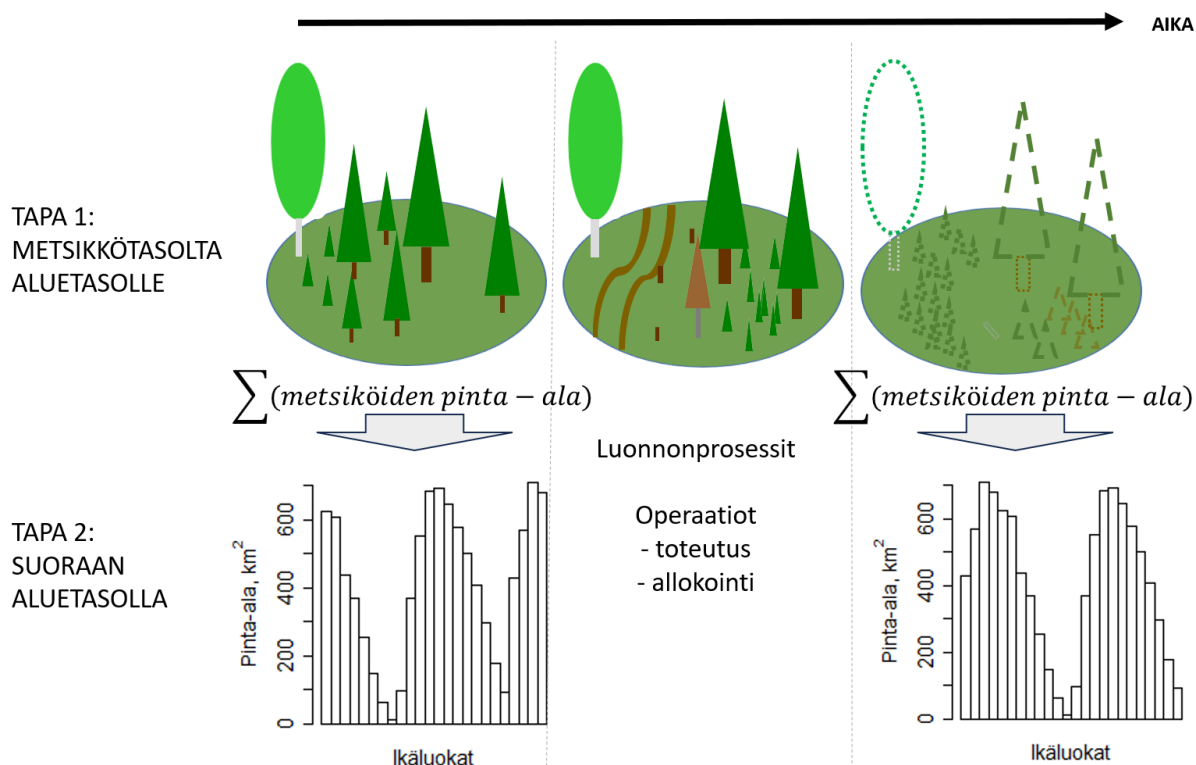
Hakkuiden tai kasvun ja poistuman erotuksen ja metsämaan nielun välinen vaihtelu selittyy loogisesti yhtäältä sillä, että yli ajan erilaisiin puustoihin eri voimakkuuksina kohdistuvat hakkuut vaikuttavat nieluun eri tavoin ja toisaalta (vähäisemmin) yli ajan laskentamenetelmien muutoksella. Tulos selittää esim. Silfverin ym. (2024, Kuva 7) havaitseman eri vuosikymmenille laadittujen skenaarioiden ja viimeisten vuosien inventaariotietojen välisen tasoeron. Toisaalta tulos rajoittaa aiemmin käytetyillä laskentaperiaatteilla laadittujen vanhempien skenaarioiden soveltamista ja vertailukelpoisuutta ilman niiden laskentojen päivytystä vastaamaan nykyhetkeä. Puustobiomassan vahvempi relaatio kasvun ja poistuman erotuksen kuin pelkkien hakkuumäärien välillä voi tarkoittaa, että jatkossa skenaariotöiden vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi niistä tulisi raportoida kasvut ja poistumat ja laskea koko metsämaan hiilinielu jälkeenkäin kulloinkin sovellettavilla menetelmillä.

Edellä kuvatun suuruista laskelmien yhteensopimattomuutta voi aiheutua erilaisista laskentaoletuksista (vrt. esim. MALUSEPO-raportin laskentavertailu varastojen muutoksina tai muunnoskertoimilla, Taulukko 12 raportissa Koljonen ym. 2020) ja kansainvälisissä laskelmissa eri maille erilaisilla tarkkuudeltaan poikkeavilla biomassamalleilla laskennasta (Neumann ym. 2016) tai vaihtelevista maiden välisistä raportointikäytännöistä (vrt. luku 1.2.). Vaikka EU:n tarkentuvat LULUCF-raportointivaatimukset voivat tuoda parannusta jälkimmäisten osalta, niin vaihtoehtoisesti voi olla mahdollista pohtia, toisiko menetelmämuunnos ja esimerkiksi kaukokartoitusaineistojen hyödyntäminen yleistettävämpiä tuloksia. Esimerkiksi NASA:n Orbiting Carbon Observatory-satelliittimittausten avulla on mahdollista kartoittaa luonnollisia ja ihmisen aiheuttamia hiilidioksidipitoisuuksia (Byrne ym. 2023). Satelliitissa kolme kameran kaltaista spektrometria mittaavat kaasua epäsuorasti heijastuneen auringonvalon osuuksina. Menetelmä havainnoi todennäköisesti hyvin erityisesti maankäytön muutoksiin liittyviä hiilidioksidin päästöjä ja nieluja ja samantapainen menetelmä voi olla laajennettavissa muille kasvihuonekaasuille. Ennen kaikkea menetelmä mittaa objektiivisesti ja samalla tavalla kaikkialta.

2.2. Ennusteiden vertailuja tarvitaan, mutta vakioiduin oletuksin

Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman vuoden 2024 skenaariotarkastelun päivitys (Silfver ym. 2024) sisältää tarkastelun, jossa skenaariomäärittelyiltään ja aineistoltaan sama laskenta toteutettiin kahdella työkalulla (Motti- ja J-ohjelmistoilla tai MELA-ohjelmistolla). Vertailussa runkopuun kokonaistilavuudet poikkesivat toisistaan skenaariojakson alussa 2,3 %, minkä raportointiin johtuvan puujoukon muodostuksen menetelmäeroista: MELA-laskelmassa kasvatettava puusto on muodostettu pääosin suoraan VMI-koelaloilta mitatuista puusta, kun taas MOTTI tuottaa simuloitavan puujoukon puusto-ositteittain mitatuista puuston keskitunnuksista läpimitta- ja pituusjakaumamallien avulla. Lisäksi MELA-laskelmassa runkopuun kokonaistilavuus ja puulajeittaiset tukkitilavuudet kalibroidaan laskelmien alkutilanteessa vastaamaan VMI:n tilvuusarvioita maakunnittain. Myös kasvu- ja luonnonpoistumamalleissa todettiin eroja, mutta lopputuloksissa erot pysyivät puuston lähtötilavuuksien kanssa samassa suuruusluokassa. Suuraluetasolla tulosten väliset erot olivat pienet, minkä pääteltiin johtavan metsämaan osalta samanlaiseen maankäyttösektorin kokonaisnieluun.

Kalliokoski ym. (2019) raportoi aiemman, useamman mallin vertailun perusteella edellä kuvatun kanssa päinvastaisesti hyvin suuren ja osittain epä johdonmukaisen mallien välisen vaihtelun. Kalliokosken ym. vertailemat mallit edustavat laajempaa mallien ominaisuuksien vaihtelua: testatuista malleista EFDM ja EFISCEN olivat ikäluokka- tai vastaavaan luokitteluun perustuvia alueellisia jakaumamalleja, FORMIT ja PREBAS prosessipohjaisia metsikkötason malleja ja MELA ja MONSU empiirisiä puutason malleja. Tässä raportissa aiemmin tarkasteltu MELA poikkesi muista ennakoimalla kasvun lähtevän jyrkkään nousuun muutaman vuosikymmenen kuluttua laskentajakson alusta. Tästä huolimatta mallien välinen vahva hajonta on osaltaan seurausta siitä, että malleille annettiin kolme vaihtoehtoista tavoitehakkuumäärää, mutta vertailun asetelmaa ei standardoitu millään muulla tavalla (kukin ratkaisu perustui esim. erilaiseen koelaa-aineistoon).



Kuva 6. Suuralueen metsävarojen keskeiset mallinnusperiaatteet: metsikkötason simulointi ja yleistäminen aluetasolle koalojen edustamien pinta-alapainojen kautta (tapa 1) tai metsäpinta-alojen kehityksen simulointi aluetasolla (tapa 2). Luonnonprosessien ja operaatioiden vaikutukset simulointien kuluessa riippuvat niiden toteutuksista mallinnustavoissa ja osamalleissa. Kuva perustuu artikkeleihin Mohamedou ym. (2022) ja Vauhkonen ym. (2021).

Skenaarioanalyseissa on edelleen tilausta mallien tai mallinnustapojen vertailulle (Kuva 6), mutta edellä olevien kahden esimerkin perusteella sitä olisi syytä tehdä laadullisesti vahvemmin ja standardoidummin esim. purkamalla osiin seuraavien tekijöiden vaikutus skenaarioennusteissa:

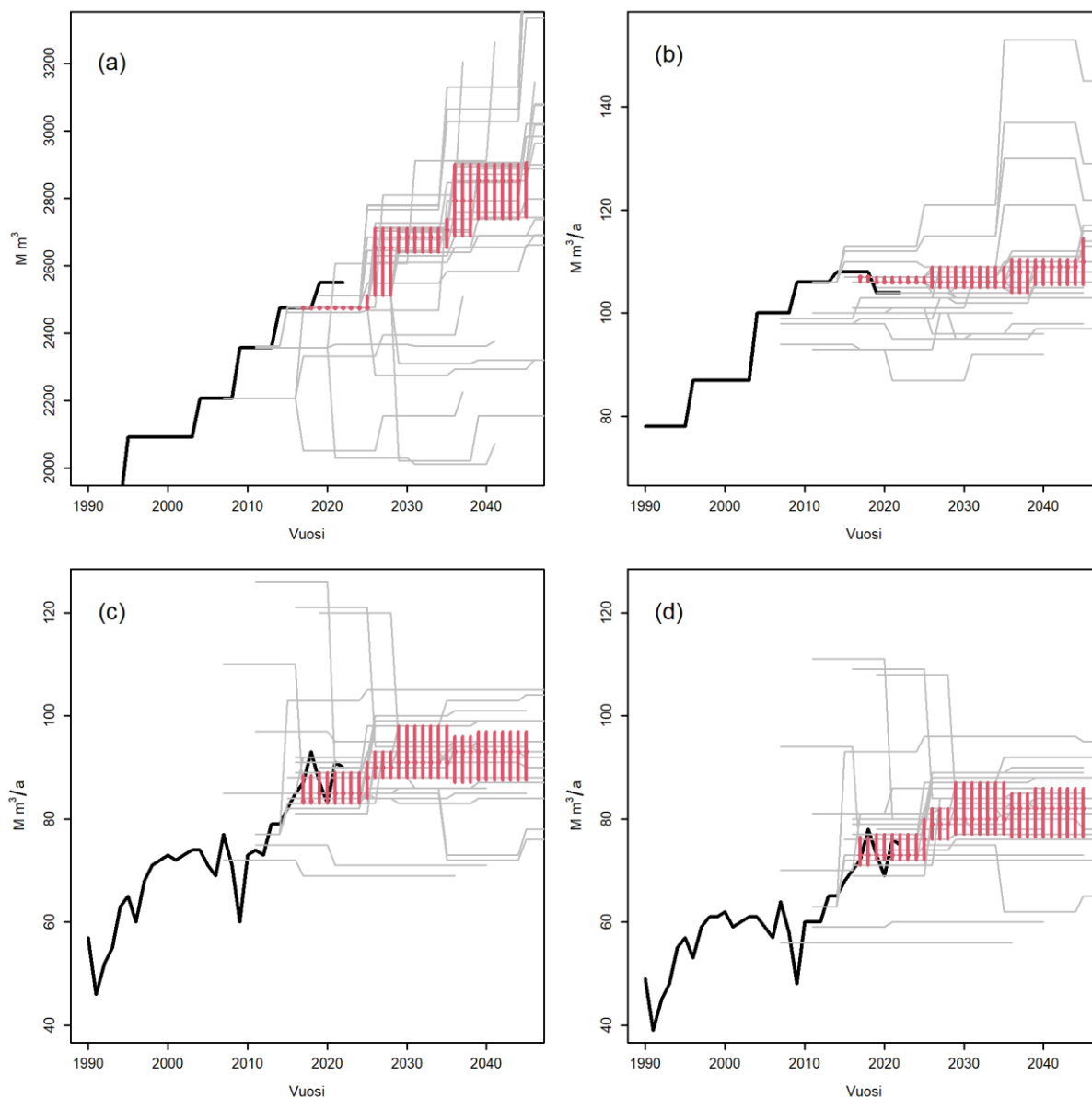
- käyttääkö menetelmä mitattuja puita tai miten menetelmä muodostaa puujoukon syötteenä olevista metsikkötunnuksista,
- miten menetelmä toteuttaa puun kasvuun vaikuttavat tekijät tai miten yhteyttämistuotteiden jakautuminen puun eri osiin toteutuu,
- miten metsänhoitotoimenpiteet ja hakkuut toteutetaan (esim. mitkä puut harvennetaan),
- mitkä metsiköt valitaan käsiteltäviksi,
- miten luonnonpoistuma ja häiriöt mallinnetaan (toimenpiteiden tai käsittelemättömyyden seurauksena).

Tässä työssä laajasti käsitellyssä MELA-mallissa puiden syntymiselle, kasvulle ja kuolemiselle on empiiriset tilastolliset mallit. Prosessipohjaisissa malleissa toisaalta kuvataan puiden elintoimintoja kuvaavien prosessimallien avulla fotosynteesi, respiraatio, haihdunta, yhteyttämistuotteiden jakautuminen puun eri osiin. Prosessimallit sopivat potentiaalisesti puiden kasvureaktioiden mallintamiseen muuttuvassa ympäristössä, koska niissä kasvuun vaikuttavat kasvuympäristön lämpö-, sadanta-, ravinne-, säteily- yms. olosuhteet. Tilastolliset mallit on sovitettu aineistoon, joka on kerätty vallitsevissa olosuhteissa kasvaneiden puiden menneistä kasvuista, eikä niillä ole kykyä sopeutua muuttuvaan ilmastoon. Toisaalta jako prosessipohjaisiin ja empiirisiin malleihin on osittain keinotekoinen, sillä huolellisesti laadittu tilastollisen mallin tulisi perustua yleiseen teoriaan mallinnettavan ilmiön käyttäytymisestä.

Kasvun mallinnus voi sinänsä olla nykyisiä empiirisiä malleja perustellumpaa prosessimalleissa, mutta sen allokointi yhteytyksestä runkopuun kasvuksi puutasolla ei ole yksiselitteistä. Toisaalta nykyisissä prosessimalleissa on parantamisen varaa ihmistoiminnan (hakkuut ja metsänhoidon toimenpiteet) kuvauksen osalta. Mallien pitäisi tuottaa vaihtoehtoisia toimenpiteitä (vrt. MELA-mallin toimenpidepuun haaroitus). Erityisesti eri-ikäisrakenteisen puuston käsittelyt todennäköisesti edellyttävät puulistaa syötetietona ja niiden huomiointi mutta toisaalta myös toimenpiteiden ja niiden jälkeisen kehityksen mallinnus voi vaatia mallien kehittämistä.

Erityyppisten mallien vertailutarpeet korostuvat ylikansallisissa laskelmissa. Myös tässä tapauksessa todennäköisiä kehityslinjoja ovat kuvan 6 vaihtoehdot: erilaisten kansallisten mallien yhdistämisen sijaan kehitystyö painottunee joko laajaan prosessipohjaisen mallin kalibrointiin yli Euroopan (vrt. Härkösen ym. 2019 FORMIT-mallin käyttö, joka edustaa kuvan 6 tapaa 1) tai yleisen aluetason mallin tai mallinuskelihkon parametrisointiin potentiaalisesti maakohtaiselle osaamisella ja erityispiirteiden tuntemuksella (vrt. Vauhkosen ym. 2019 siirtymämatriisilla EFDM tekemä Euroopan harmonisoitujen skenaarioiden tarkastelu, joka edustaa kuvan 6 tapaa 2).

Toinen mahdollisuus tarkentaa päätöksentekoa tulevaisuudesta liittyy aiemmin laadittujen skenaarioiden synteeseihin. Skenaarioita on laadittu erilaisilla oletuksilla ja määrittelyillä eikä niiden tavoitteena ole ennustaa toteutuvaa. Esimerkiksi Tietolaatikossa 2 kuvatut NT-laskelmat tuottavat vertailukohdan suurimmasta lähiajan aines- ja energiapuukertymästä ilman toiminnan kestävyys- ja lopputilan puustovaatimuksia. Muihin skenaarioihin verrattuna ne kuvautuvat äärevämpinä lähiajan hakkuukertyminä (Kuva 7, d), mikä ei tarkoita skenaarion epäluotettavuutta vaan poikkeavalla tehtävänmuotoilulla haettua ääriarvoa. Kuvassa 7 on pyritty skenaarioiden puuston kokonaismäärän, kasvun, poistuman ja hakkuumäärien kokonaisvaihtelun esittämisen lisäksi korostamaan sellaisia Tietolaatikossa 2 esitettyjä skenaarioita, jotka ovat likimain toteuttaneet n. vuosina 2015–2022 havaitun kehityksen. Tällaisen tarkastelun logiikkana on, että havaitun aikasarjan tuottaneet skenaariot voinevat täsmällisemmin kuvata myös tulevaa (olosuhteiden pysyessä samoina). Tarkastelua rajoittaa lyhyt aikasarja, jolta skenaarioista on yhteisiä ennusteita, mutta myöhemmin kertyvä aikasarjan myötä tällaista tarkastelua voisi tehdä huomattavasti laajemmin, meta-analyysityyppisesti ja numeerisemmin esimerkiksi mallipohjaisena päättelynä ennusteiden virheistä (Kangas 1999), jonka avulla tulevaisuutta koskevien ennusteiden virhettä tai sen ylärajaa voi olla mahdollista ennakoida olettaen olosuhteiden pysyvänä muuttumattomina.



Kuva 7. Toteutuneet vs. ennustetut puuston kokonaismäärä (a), kasvu (b), kokonaispoistuma (c) ja hakkuukertymä (d). Mustat paksut viivat kuvaavat historiallisia toteumatietoja ao. tilastoista ja harmaat ohuet viivat tietolaatikon 2 yksittäisten skenaarioiden ennusteita. Punaisella esitetty vaihtelu kuvaa niitä skenaarioita, jotka ovat likimain toteuttaneet vuosina 2015–2022 havaitun kehityksen; punaisilla pisteillä ja viivoituksella näiden skenaarioiden mediaanit \pm kvartiilivälin pituus.

3. Metsien uusimmat kehitysskenaariot tämän hankkeen laskelmien mukaan

Luvun tavoitteena on esittää ja vertailla kahden erilaisen metsien kehityssimulaation tuloksia (Kuva 6). Metsien pitkän aikavälin kehitystä simuloitiin Luonnonvarakeskuksessa äskettäin kehitetyllä ikäluokkasimulaattorilla, jonka avulla arvioitiin metsien kasvun ja poistuman suhdetta 500 vuoden aikajaksolla erilaisilla hakkuutasoilla. Tuloksia verrattiin samasta lähtöaineistosta Luonnonvarakeskuksen MELA-ohjelmistolla laadittuihin tuloksiin.

3.1. Menetelmät

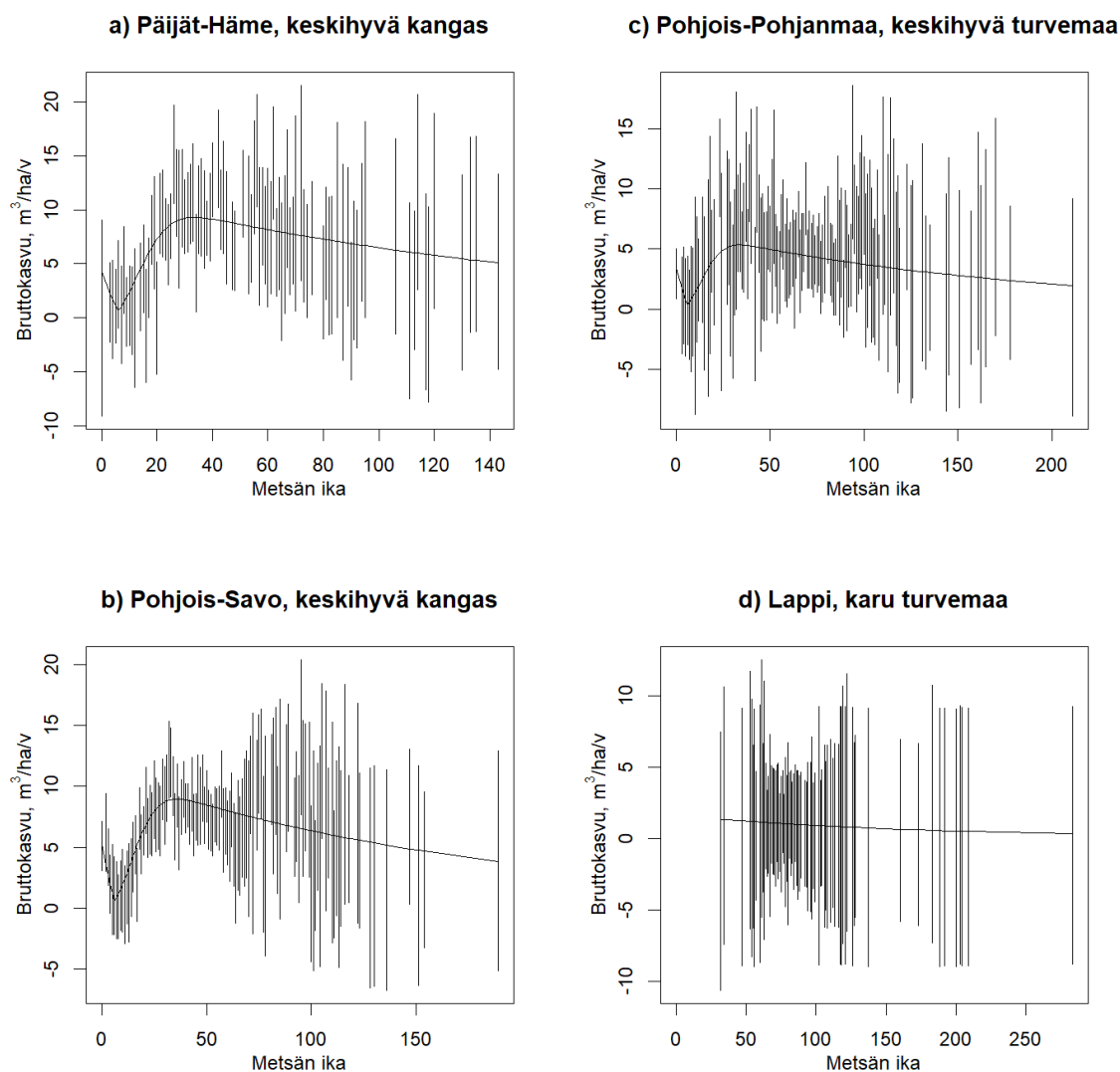
3.1.1. Kasvukäyrien laadinta

Ikäluokkasimulaattorissa metsien kehityksen simulointi perustuu ositekohtaisiin ikäluokkajakaumiin, jotka kertovat metsän pinta-alan kussakin ikäluokassa, sekä kasvukäyriin, jotka kuvaavat puuston hehtaarikohtaisen kasvun metsikön iän suhteen. Kasvukäyrät estimoitiin maakunnittain VMI13-aineiston pysyvien koealojen vuosien 2019–2022 toistomittausten avulla, joiden avulla saadaan kullekin koe-puulle menneen 5-vuotiskauden kasvu. Kunkin maakunnan metsät jaettiin kahdeksaan eri kasvupaikkaan, jotka kuvaavat neljää eri ravinteisuustasoa: rehevä (lehtomainen kangas ja rehevämpi tai vastaava suo), keskihyvä (tuore kangas tai vastaava suo), karuhko (kuivahko kangas tai vastaava suo) sekä karu (kuiva kangas ja sitä karumpi tai vastaava suo) erikseen kivennäis- ja turvemaidella. Kasvuaineistossa ei ollut mukana Ahvenanmaan eikä Ylä-Lapin mittauksia. Kussakin ositteessa puutason kasvut summattiin yhden vuoden ikäluokissa ja jaettiin ko. ikäluokan estimoidulla pinta-alalla samalla tavalla kuin VMI:ssä lasketaan metsien kasvuarvio. Myös kasvujakson aikana syntyneet ja poistuneet puut huomioitiin. Näin muodostui yhteensä 144 laskentaositetta, josta kustakin oli käytössä ikäluokittaisia keskikasvuja.

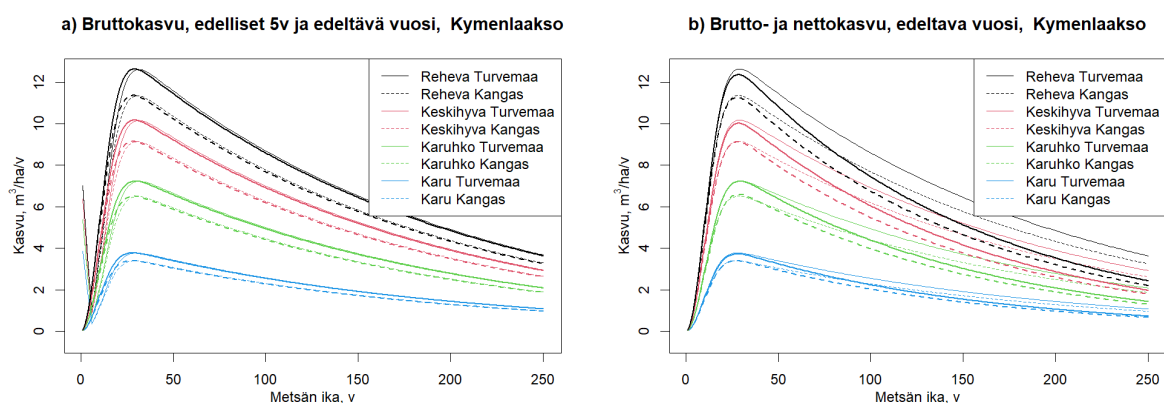
VMI-koealojen kasvumittauksien perusteella laskettiin koealojen puuston bruttokasvun (vuoden aikana syntyneen uuden runkopuun tilavuus) ja luonnonpoistuman (vuoden aikana kuolleiden puiden runkopuun tilavuus) ($m^3/ha/v$) keskiarvot vuoden ikäluokissa maakunnittain em. kahdeksassa kasvupaikka-luokassa, ja näiden avulla estimoitiin käyrät bruttokasvulle sekä nettokasvulle, joka on bruttokasvun ja luonnonpoistuman erotus. Metsäalan kirjallisuudessa julkaistut yleisesti käytetyt epälineaariset kasvukäyrät (Salas-Eljatib ym. 2021) eivät sopineet aineistoon, joten tässä työssä kehitettiin uusi kolmiparametrinen kasvukäyrä (Kuva 8). Metsän kuluvan vuoden kasvua (current annual increment, CAI) vastaava edeltävän 5 vuoden keskikasvun käyrä (periodic annual increment, PAI) sovitettiin em. ikäluokittaisten keskikasvujen aineistoon epälineaarisella regressiolla niin, että kukin mallin kolmesta parametrasta riippui maakunnasta, kasvupaikasta ja suo/kangas jaosta, ja havaintoja painotettiin kunkin ikäluokan koe-alamäärällä (Mehtätalo & Lappi 2020). Kuvassa 8 on esitetty näin saatu menneen viisivuotiskasvun kasvu sekä havaittujen ikäluokkien kasvut muutamassa esimerkiositteessa. Ikäluokkasimuloinnissa käytettiin vuotuisen kasvun käyrää, joka saatiin käyttämällä sovitetun mallin parametrejä alkuperäisessä kuluvan vuoden kasvukäyrässä (Kuva 9a). Kasvukäyrät sovitettiin sekä brutto- että nettokasvulle (Kuva 9b). Ikäluokkasimulointi perustui nettokasvun käyrään, jolloin saatu poistuma voitiin tulkita kokonaisuudessaan hakkuupoistumaksi.

Hetkellisen kasvun käyrän avulla laskettiin keskikasvun käyrä (mean annual increment, MAI), joka kertoo puuston vuotuisen keskikasvun kiertoajan funktiona (Kuva 10). Jaksollisessa kasvatuksessa puuntuotanto maksimoituu, kun metsät uudistetaan säännönmukaisesti siinä iässä, jolloin keskikasvu on suurimmillaan. Samassa iässä myös hetkellisen kasvu painuu keskikasvun käyrän alapuolelle (Pukkala 2007). Nettokasvun maksimoivat kiertoajat vaihtelivat 61 ja 78 vuoden välillä ja olivat keskimäärin 70,5 vuotta. Bruttokasvun maksimoivat kiertoajat vaihtelivat 67 vuodesta 86 vuoteen (keskiarvo 78 vuotta). On huomattava, että keskikasvun käyrä on hyvin laakea puuntuotantoa maksimoivan kiertoajan ympäristössä, joten hakkuuajan aikaistaminen tai rajukaan viivästyttäminen eivät laske metsien

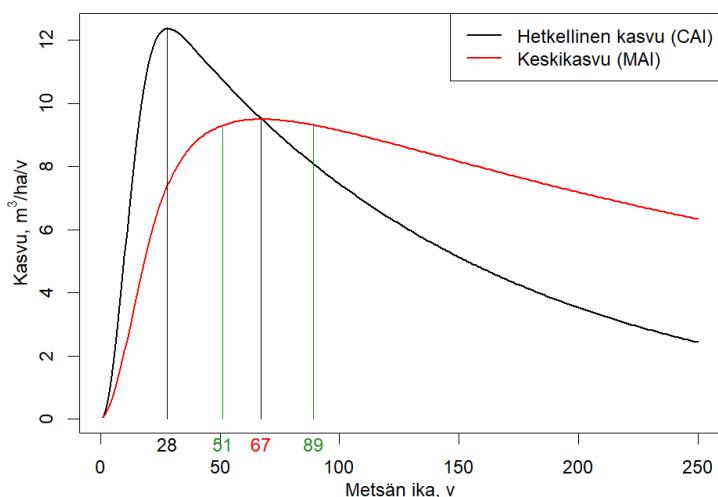
keskimääräistä puuntuotosta merkittävästi. Tässä työssä estimoitujen nettokasvun käyrien perusteella kiertoajan lyhentäminen keskimäärin 17 vuodella tai jatkaminen 21 vuodella puuntuotantoa maksimoivaan kiertoaikaan verrattuna säilyttivät pitkän ajan nettokasvun yli 98 %:n tasolla maksimitasoon verrattuna.



Kuva 8. Estimoidut edeltävän viisivuotiskauden keskikasvut neljässä osoitteessa vuoden ikäluokissa (pystyviivat) sekä sovitetun mallin ennusteet (käyrä). Kukin pystyviiva näyttää ikäluokan keskikasvuestimaatin 95 % luottamusvälin (koealojen kasvujen keskiarvo ± 2 *mallin jäännöshajonta/ $\sqrt{\text{koealamäärä}}$). Nuorimmissa ikäluokissa jakson kasvu on laskeva, koska sovitteisiin vaikuttaa myös edeltävä puusukupolvi.



Kuva 9. Esimerkkimaakunnalle sovitetut menneen kasvujakson bruttokasvun käyrät (kuva a, ohuet viivat) ja niitä vastaavat edeltävän vuoden kasvun käyrät (kuva a, paksut viivat ja kuva b, ohuet viivat) sekä edeltävän vuoden nettokasvun käyrät (kuva b, paksut viivat).



Kuva 10. Kymenlaakson rehevien kangasmetsien estimoitu hetkellinen nettokasvu ja sen perusteella muodostettu keskikasvun käyrä. Hetkellinen kasvu on korkeimmillaan 28 vuoden iässä. Puuntuotannon maksimoiva kiertoaika on 67 vuotta. Jos kiertoaika on 51 ja 89 vuoden välillä, keskikasvu säilyy yli 98 %:n tasolla maksimiin nähden.

3.1.2. Ikäluokkasimulaattori

Ikäluokkasimulaattori (ILS) on yksinkertainen ja läpinäkyvä tapa tarkastella metsien kasvua ja hakkuumääriä sääntöpohjaisesti pitkällä aikavälillä. Simuloinnin lähtötietona käytetään valitun ositteen (esim. Pohjois-Karjalan rehevät kankaat) ikäluokkajakaumaa ja kasvukäyrää, jotka on saatu VMI:n maastomittauksista (Kuva 11). Simulaattorissa edetään vuoden askelilla. Kullakin askeleella tehdään seuraavat toimet:

3. Harvennetaan metsiä tavanomaisen harvennusohjelman mukaisesti ja lasketaan harvennuspoistuma. Harvennuksia tehtiin kaikista ikäluokista niin, että ne vastasivat 15 vuoden välein toistuvia harvennuksia, joissa kussakin poistuma oli 25 % kokonaistilavuudesta
4. Tehdään uudistushakkuita vanhimpiin ikäluokkiin niin, että vaadittu hakkuupoistumatavoite täyttyy (ns. bucket fill -menetelmä). Uudistushakatut metsät siirretään ikäluokkaan 0.

5. Kasvatetaan metsiä yksi vuosi siirtämällä kaikki metsät seuraavaan ikäluokkaan ja kasvatetaan ko. ikäluokan tilavuutta kasvukäyrän määräämän kasvun verran.

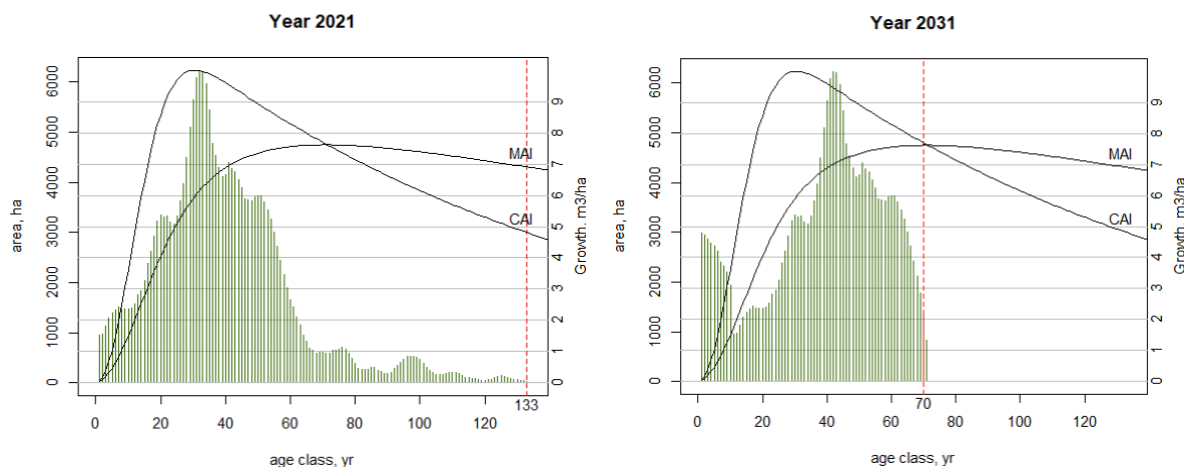
Koska simulaattori on sääntöpohjainen, ja perustuu vain ikäluokkien pinta-aloihin ja keskikasvuihin, on sillä teknisesti mahdollista simuloida metsien kehitystä satojen ja tuhansien vuosien aikaskaalalla. Ikäluokkasimulaattoria on käytetty aiemmin, kun arvioitiin suojelualueiden vaikutusta metsien kasvuun ja hiilinieluihin (Hynynen ym. 2023). Tuossa analyysissä oli käytössä vain bruttokasvun käyrät neljälle kasvupaikalle Pohjois- ja Etelä-Suomeen. Siksi poistumaa ei voitu jakaa luonnonpoistumaan ja hakkuupoistumaan ja karkea luokittelu heikensi analyysin uskottavuutta. Tätä työtä varten tarkastelu tehtiin erikseen kahdeksalle kasvupaikalle maakuntatasolla ja käytössä oli kasvukäyrät sekä brutto- että nettokasvulle.

Koska valtaosa Suomen metsämaan alasta (85 %) on rajoittamattoman puuntuotannon metsiä (kts. määritelmä luvusta 1) ja ikäluokkasimuloinnissa simuloidaan uudistushakkuisiin perustuvaa jaksollista kasvatusta, keskityttiin tässä analyysissä pelkästään niihin. Laskenta perustui em. 144 ositteeseen, joiden rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsien ikäluokkajakauma perustui vuosien 2017–2021 VMI-aineistoon. Jakaumaa tasoitettiin kernel-menetelmällä (esim. Mehtätalo & Lappi 2020). Kullekkin ositteelle laskettiin teoreettinen suurin puuntuotannollisesti kestävä hakkuutaso kertomalla ositteiden pinta-ala keskimääräisen nettokasvun (MAI) maksimiarvolla. Näin saatu hakkuupoistuman taso, joka voitaisiin ylläpitää äärettömän pitkään olettaen alkutilanteessa kaikkia ikäluokkia olevan yhtä paljon ja vanhimman ikäluokan iän olevan suurimman puuntuotoksen kiertoaika tai sitä suurempi, oli rajoittamattoman puuntuotannon metsämaalle (pl. Ahvenanmaa ja Ylä-Lappi) 83,2 milj. m³/v. Ositteissa, joissa on hakkuusäästöjä, on hakkuumäärää mahdollista nostaa näin saatuun arvoon verrattuna tilapäisesti. Toisaalta jos ositteessa on tehty hakkuuta runsaasti, ei ko. tasoa voida ylläpitää ilman, että aluksi hakataan vähemmän. Tätä analysoitiin kokeilemalla ikäluokkasimulointiin erilaisia hakkuumääriä ja etsimällä suurin mahdollinen hakkuupoistuman taso, joka voitiin ylläpitää 1000 vuotta. Näin saatu suurin puuntuotannollisesti kestävä poistuman taso 82,3 milj. m³/v on n. prosentoin em. teoreettista lukua pienempi. Ero selittyy sillä, että metsiä on uudistettu pääsääntöisesti puuntuotannon maksimoivaa kiertoaikaa nuorempina. Ikäluokkasimuloinnit toteutettiin kussakin ositteessa asettamalla hakkuumääräksi em. kokeilemalla saatu suurin puuntuotannollisesti kestävä poistuman taso, sekä pudottamalla hakkuutaso 90 %, 80 % ja 70 %:iin tästä tasosta. Laskelma tehtiin 500 vuoden ajanjaksolle.

Laskelmissa hakkuupoistuma perustuu nettokasvun käyryyn, joten se sisältää kaiken hakkuissa, taimikonhoidossa ja raivauksessa kaadetun runkopuun. Kokonaispoistumat perustuvat bruttokasvun käyryyn, joten ne sisältävät hakkuupoistuman lisäksi luonnonpoistumana kuolleen runkopuun.

Pohjois-Karjala, Reheva Kangas: HarvestVolume = 1.68118725922268

Pohjois-Karjala, Reheva Kangas: HarvestVolume = 1.68118725922268



Kuva 11. Ikäluokkasimulaattorin alkutilanne ja simuloitu tilanne 10 vuoden simuloinnin jälkeen Pohjois-Karjalan rehevien kangasmaiden rajoittamattoman puuntuotannon metsämaan metsissä.

3.1.3. MELA-laskelmat

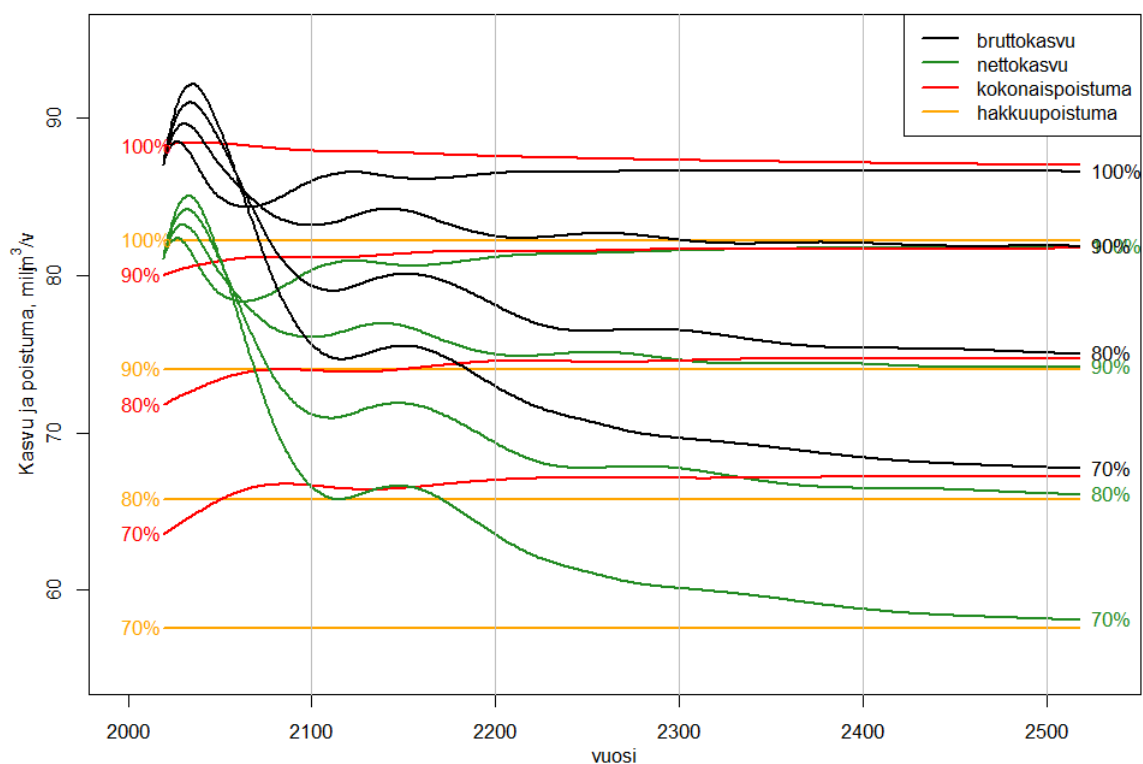
Ikäluokkasimuloinnin tulosten vertailemiseksi toteutettiin samaan VMI-aineistoon perustuvat maakunnittaiset laskelmat myös MELA2016-ohjelmistolla (Hirvelä ym. 2017). MELA-laskelmissa koeala-aineistolle simuloitiin vaihtoehtoisia käsittely- ja kehitysketjuja, joista valittiin lineaarisen optimoinnin (Lappi 1992) avulla aluekohtaisten puuston kehitykselle ja metsien käytölle asetettujen vaatimusten mukainen ratkaisu. Laskenta-aikana käytettiin 90 vuoden simulointiaikaa jaettuna yhdeksään kymmenvuotiskaudteen. VMI-aineisto kuvaa metsävarojen tilaa keskimäärin vuonna 2019, joka oli laskelmien aloitusvuosi. Myös näissä laskelmissa Ahvenanmaan maakunnan ja Ylä-Lapin alueet olivat rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Optimoinnilla tuotettiin maakunnittain suurin ylläpidettävissä oleva aines- ja energiapuun hakkuukertymäarvio käyttäen 4 % laskentakorkoa. Laskentamenetelmä ja sovelletut laskentamääritykset olivat tarkastelujaksoa sekä Ahvenanmaan ja Ylä-Lapin aluetta lukuun ottamatta samat kuin MELA Tulospalvelun VMI12-13-aineistoon perustuvien hakkuumahdollisuusarvioiden laadinnassa (Luke 2023). Laskelmissa oli mukana kaikki metsä- ja kitumaat samalla tavalla kuin MELA Tulospalvelussa esitetyissä arvioissa, mutta tässä tuloksia tarkasteltiin vain rajoittamattoman puuntuotannon metsämaan osalta. Lisäksi toteutettiin laskelmat, jossa hakkuukertymätaaso maakunnittain rajoitettiin 90 %, 80 % ja 70 %:iin suurimman ylläpidettävissä olevan hakkuukertymän mukaisesta arviosta.

On huomattava, että MELA-laskelmassa käytetyn suurimman ylläpidettävissä olevan aines- ja energiapuun hakkuukertymän määritelmä poikkeaa ikäluokkasimuloinnilla määritellystä suurimmasta puuntuotannollisesti kestävästä hakkuupoistumasta. MELA-laskelmassa suurin ylläpidettävissä oleva hakkuukertymä perustuu optimointitehtävään, jossa maksimoidaan nettotulojen nykyarvoa 4 %:n laskentakorolla, kausittaiset nettotulot ja aines- ja energiapuun kokonaishakkuukertymät pysyvät vähintään edellisen laskelmakauden tasolla, tukkipuun kertymä säilyy koko laskelma-ajan vähintään ensimmäisen laskelmakauden tasolla ja puuston tuottoarvo 4 %:n korkokannalla laskettuna on laskelma-ajan lopussa vähintään alkutilanteen tasolla. Ikäluokkasimuloinnissa suurin puuntuotannollisesti kestävä hakkuumäärä on suurin hakkuupoistuma, jonka käytössä oleva metsä ja nettokasvun käyrä mahdollistavat vähintään 1000 vuoden ajaksi. Hakkuupoistuma sisältää ainespuun (tukki- ja kuitupuun) ja energiarunkopuun hakkuukertymän sekä hakkuissa, taimikonhoidossa ja raivauksessa metsään jäävän runkohakkuupuun. Vaikka laskelman hakkuutaso määritettiin MELA-laskelmissa hakkuukertymän ja ikäluokkasimuloinnissa hakkuupoistuman kautta, raportoidaan tuloksissa molempien laskelmien osalta hakkuupoistumia. MELA-ohjelmistolla tuotetuissa laskelmissa kertymän rakenteeseen vaikuttavien rajoitteiden ja nollaa suuremman korkokannan tulisi alentaa hakkuupoistuma-arviota ikäluokkasimulointiin verrattuna. Toisaalta ikäluokkasimuloinnissa puuntuotannon kestävyys vaadittiin kullekin ositteelle erikseen, ja sitä määritettäessä hakkuurästien purkaminen ajoittui tasaisesti 1000 vuoden ajalle, mikä rajoittaa ikäluokkasimuloinnin hakkuumääriä verrattuna MELA-laskelmaan. Arviot hakkuupoistumasta, kasvusta ja kokonaispoistumasta on kuitenkin tuotettu mahdollisimman vertailukelpoisina.

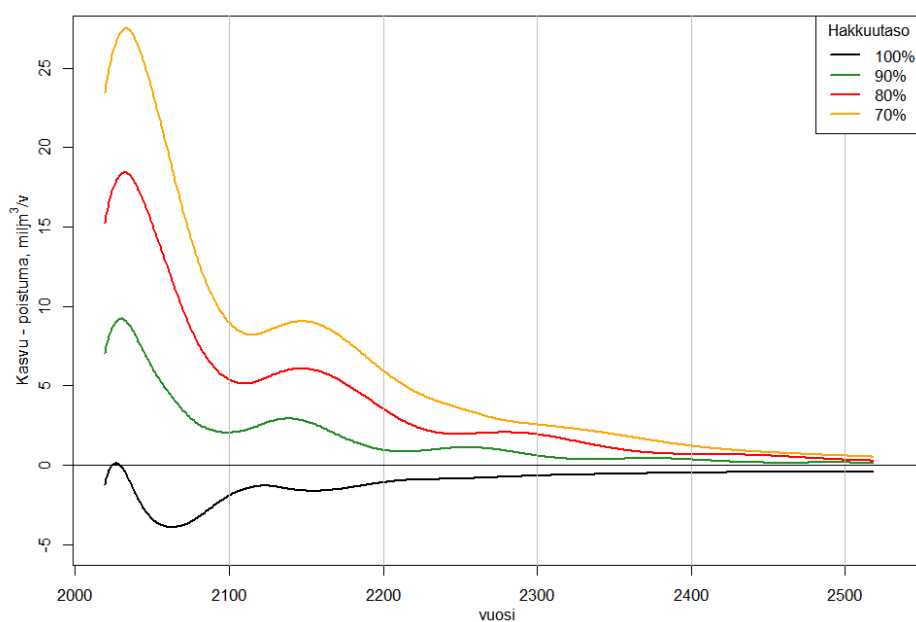
3.2. Tulokset

3.2.1. Ikäluokkasimulaattori

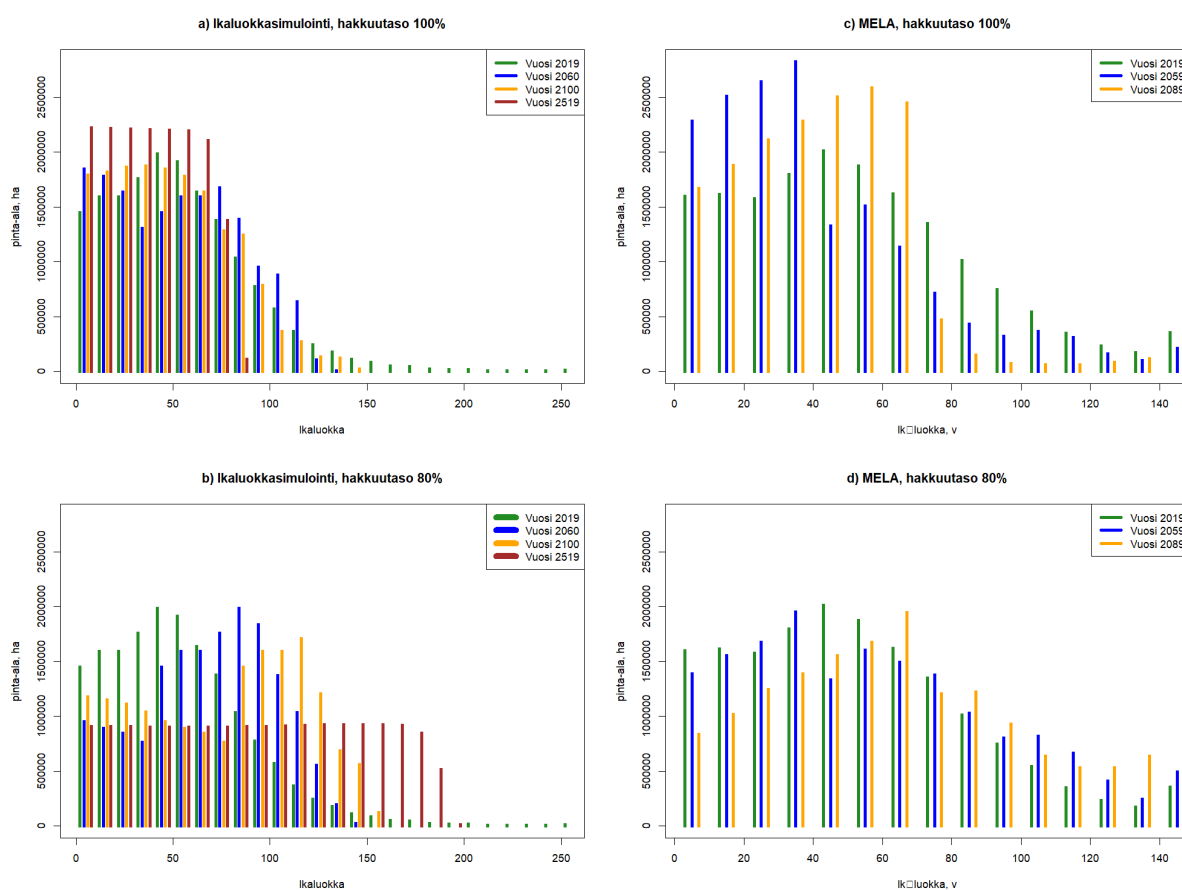
Rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsämaan metsien brutto- ja nettokasvun ja sekä kokonais- ja hakkuupoistuman pitkän aikavälin kehitys ikäluokkasimuloinnissa on esitetty kuvassa 12. Ikäluokkasimulointi ennakoii hieman nousevaa kasvun tasoa lähivuosille erityisesti silloin, jos hakkuupoistuman taso pidetään suurinta puuntuotannollisesti kestävä tasoa alhaisempina. Kasvun ennustetaan lähtevän laskuun kuitenkin 10–20 vuoden kuluessa ja laskevan sitä voimakkaammin mitä alhaisempi on hakkuutaso. Tämä johtuu siitä, että nettokasvu lähestyy valittua hakkuutasoa vuosisatojen kuluessa, kun metsien ikäjakauma vakiintuu valitun hakkuutason määrittämään tilaan (Kuva 14). Jos pitäydyttäisiin 70 %:n hakkuutasolle, bruttokasvu olisi vuosisadan lopulla 12 % ja nettokasvu 17 % alhaisempi kuin se olisi 100 %:n hakkuutasolla. Vastaavat pudotukset 80 % ja 90 %:n hakkuutasolla olisivat bruttokasvuun 8 % ja 3 % ja nettokasvuun 11 % ja 5 %.



Kuva 12. Rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien Suomen metsämaan metsien (pl. Ahvenanmaa ja Ylä-Lappi) runkotilavuuden brutto- ja nettokasvun sekä kokonais- ja hakkuupoistuman kehitys 500 vuoden pituisessa ikäluokkasimuloinnissa eri hakkuutasoilla.



Kuva 13. Kuvassa 12 esitettyjen kasvun ja poistuman erotuksen kehitys eri hakkuutasoilla. Kuvaajat voidaan ajatella joko bruttokasvun ja kokonaispoistuman tai nettokasvun ja hakkuupoistuman erotuksena, jotka ovat laskentatavasta johtuen samoja.

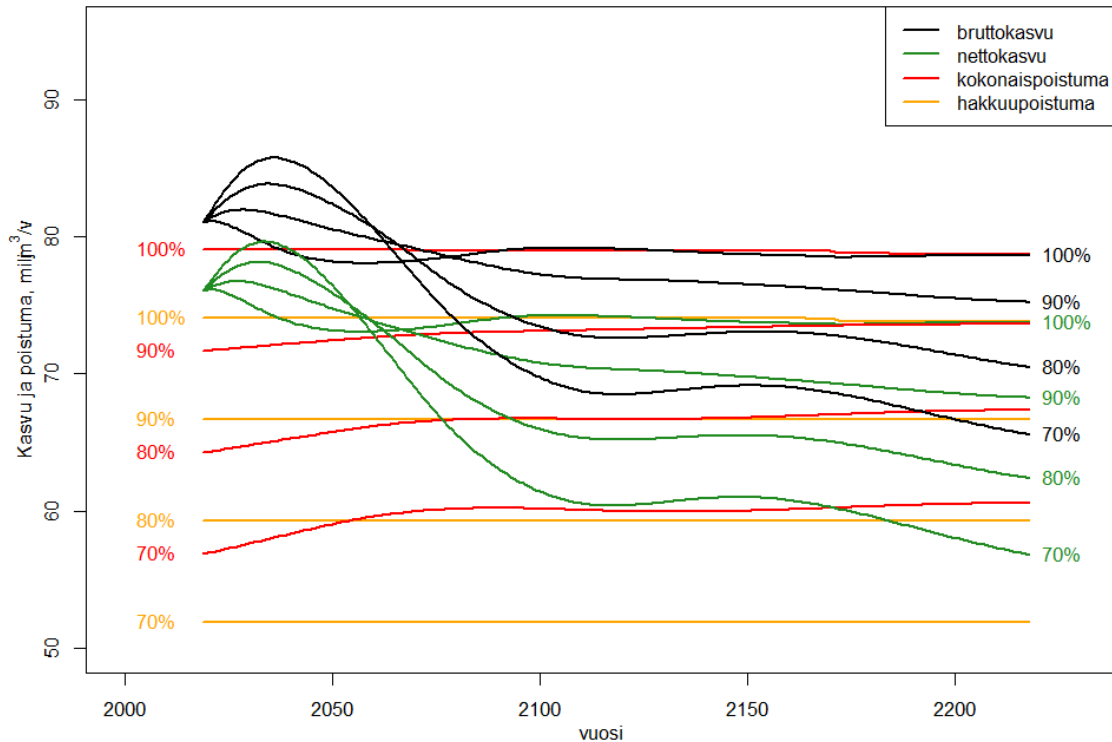


Kuva 14. Ositteiden yhteenlasketun ikäjakauman kehitys ikäluokkasimuloinnissa (a, b)) ja MELA-laskelmissa (c, d) 100 % (a, c) ja 80 % (b, d) hakkuutasoilla.

Metsien kasvun ja poistuman erotus, joka on avainasemassa metsien hiilinielun laskennassa, on sitä suurempi mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään. Kasvun taantumisen vuoksi erotus kuitenkin pienenee ajan kuluessa (Kuva 13), ja on esim. 70–90 %:n hakkuutasoilla painunut vuosisadan loppuun mennessä 30–40 %:iin vuoden 2019 tasoon verrattuna. Mikäli hakkuutasona käytetään ikäluokkasimuloinnin suurinta puuntuotannollisesti kestävää hakkuupoistuman tasoa, nettokasvu on jatkuvasti hakkuumäärää alhaisempi, ja erotus on suurimmillaan vuosina 2070 aikoihin n. 3,9 milj. m³/v. Tämän jälkeen se alkaa hitaasti lähestyä nollaa. Muilla tarkastelluilla hakkuutasoilla kasvun ja poistuman erotus säilyy koko 500 vuoden tarkastelujakson ajan positiivisena.

Laskelmat tehtiin vain metsämaan metsille, joihin ei kohdistu puuntuotannon rajoituksia. Tarkastelun ulkopuolella ovat metsät, joihin kohdistuu lakiin ja tiedossa olevaan omistajan päätökseen perustuvia rajoitteita (mm. lakiin perustuvat suojelualueet, omistajan päätöksellä suojellut alueet, suojeluun varatut alueet, alueet joissa maakunta- tai seutukaava rajoittaa hakkuita, suojeluun varatut alueet, sekä maastossa havaitut metsälain tärkeät elinympäristöt, rantametsät, asutuksen välittömässä läheisyydessä olevat metsät, maisema-arvot, uhanalaisen tai harvinaisen lajin esiintymiset tai pesimiset tai muut toimenpiteitä rajoittava syyt; ks. VMI:n maastotyöopas, VMI13 2021). Rajoittamattoman puuntuotannon metsämaan piirissä on kuitenkin metsiä, jotka ovat jo selvästi ylittäneet puuntuotoksen maksimoivan kiertoaajan (ks. esim. Kuvat 11 ja 14). Nämä voivat olla metsätalouden piirissä tai ne voivat olla alueita, jotka metsänomistajat ovat jättäneet metsätaloustalouden ulkopuolelle joko tilapäisesti tai kokonaan ilman virallista päätöstä. Jos metsät, joiden ikä on yli 1,4-kertainen puuntuotannon maksimoivaan kiertoaikaan verrattuna, jätetään laskelmissa kokonaan hakkuutoiminnan ulkopuolelle, laskee rajoittamattoman puuntuotannon piirissä oleva metsämaan ala n. 10 % ja suurin puuntuotannollisesti kestävä hakkuupoistuma arvio n. 9 %, 83,2 miljoonasta 76,2 miljoonaan kuutiometriin. On huomattava, että suuri osa ikäluokkasimuloinnin kasvun noususta ensimmäisinä vuosikymmeninä johtuu siitä, että

uudistushakkuut kohdistuvat aluksi näihin metsiin (Kuva 11), joten niiden jättäminen hakkuiden ulkopuolelle lieventää ikäluokkasimuloinnin ennakoimaa lähivuosien kasvun nousua (Kuva 15).

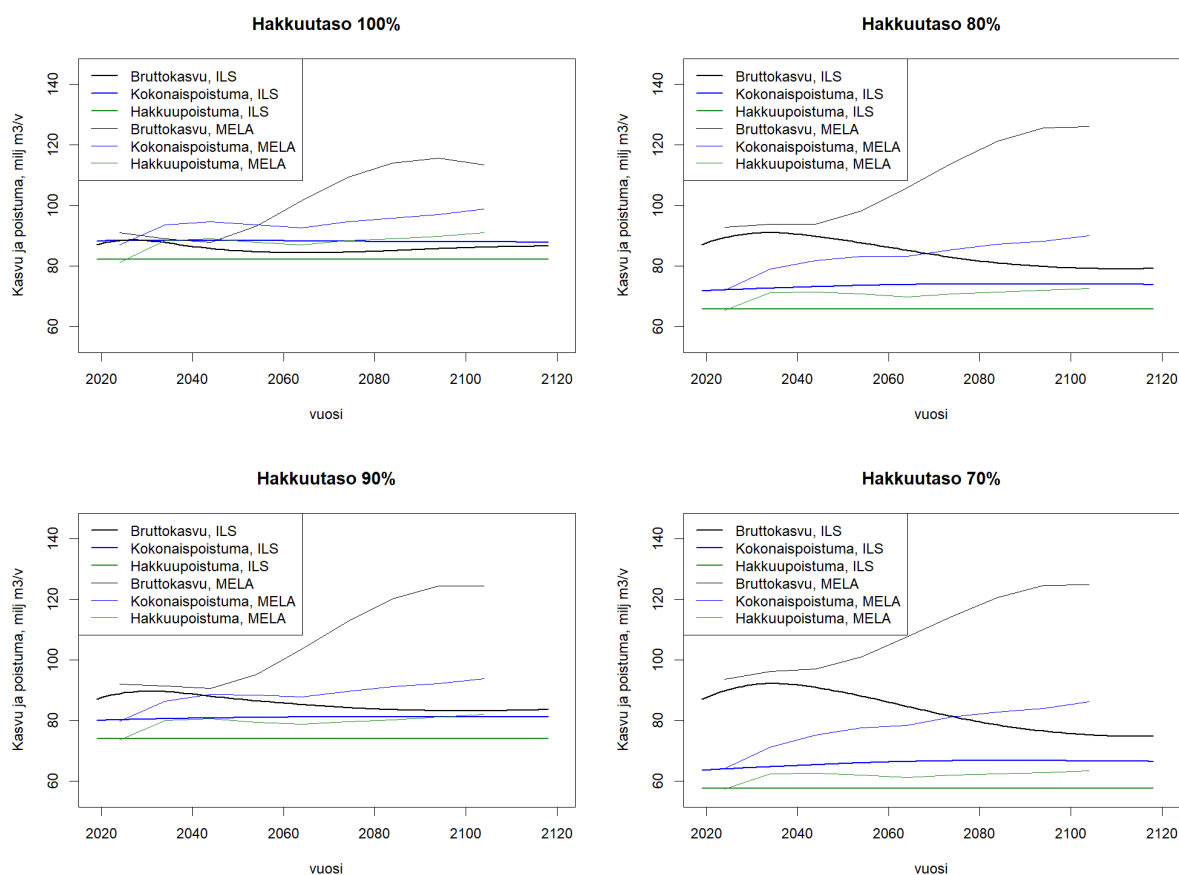


Kuva 15. Kasvun ja poistuman kehitys ikäluokkasimuloinnissa, kun metsät, joiden ikä on yli 40 % korkeampi kuin puuntuotannon maksimoiva ikä, on jätetty tarkastelujen ulkopuolelle. Merkinnät, ks. Kuva 12.

3.2.2. Vertailu MELA-tuloksiin

Ensimmäisillä laskentakausilla ikäluokkasimuloinnilla ja MELA-ohjelmistolla lasketut hakkuu- ja kokonaispoistuman tasot olivat hyvin lähellä toisiaan kaikilla hakkuutasoilla (Kuva 16). MELA-laskelmassa kasvun taso oli hieman ikäluokkasimuloinnilla saatua korkeampi. Ero selittyy sillä, että ikäluokkasimuloinnin kasvukäyrät perustuvat VMI13:n kasvujaksoon, jolla kasvuindeksit olivat hieman normaalia alempana (Hynynen ym. 2023). Ensimmäisellä kymmenvuotiskaudella 2019–2028 vuotuinen kokonaispoistuma oli ikäluokkasimuloinnissa 88,5 milj. m³ ja MELA-laskennassa 87,1 milj. m³. Bruttokasvut olivat vastaavasti 88 milj. m³/v ja 91 milj. m³/v ja hakkuupoistumat 82,5 ja 81,2 milj. m³/v.

Kasvun trendit ensimmäisen 30 vuoden aikana olivat samanlaisia molemmissa laskelmissa: puuston kasvuarvion taso alenee hieman, kun taas alemmilla hakkuutasoilla kasvu hieman nousee. Kaudesta 2049–2058 alkaen MELA-arviot poikkeavat ikäluokkasimuloinnista merkittävästi. MELA-arviot ennakoivat kasvuun jyrkkää nousua, joka on pääosin sitä suurempaa mitä alhaisempi on hakkuutaso. Tarkastelujakson kuluessa kasvun nousu kuitenkin tasaantui ja 100 %:n hakkuutasolla kasvu hieman pieneni viimeisellä kymmenvuotiskaudella. Ikäluokkasimulointi sen sijaan ennakoi kasvuun sitä voimakkaampaa laskua mitä alhaisempi on hakkuutaso. Puukohtaisiin kasvumalleihin perustuvassa MELA-laskelmassa metsien kasvu iän suhteen voi muuttua laskelman aikana hakkuiden ja metsien kehityksen seurauksena, kun taas ikäluokkasimuloinnissa metsien kasvukäyrän oletetaan pysyvän samanlaisena jatkuvasti. Toisesta kaudesta 2029–2038 lähtien MELA-laskelman hakkuupoistuma-arviot tasaantuvat noin 3–5 milj. m³/v korkeammalle tasolle kuin ikäluokkasimuloinnissa, ja kokonaispoistuman erot nousevat vielä suuremmiksi.



Kuva 16. Rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien Suomen metsämaan metsien (pl. Ahvenanmaa ja Ylä-Lappi) runkotilavuuden bruttokasvun, kokonaispoistuman ja hakkuupoistuman kehitys 100 vuoden aikana ikäluokkasimuloinnin ja MELA-laskelman perusteella, kun hakkuutasot vaihtelevat 70 % - 100 % MELA-laskelman suurimman ylläpidettävissä olevan aines- ja energiapuun hakkuukertymän arviosta/ Ikäluokkasimulaattorin suurimman puuntuotannollisesti kestävä hakkuupoistuman arviosta.

MELA-laskelman tulosten perusteella laskettiin hehtaarikohtaiset vuotuiset kasvut ensimmäisen ja viimeisen kymmenvuotiskauden aikana ositekohtaisesti Etelä- ja Pohjois-Suomessa ja verrattiin niitä ikäluokkasimuloinnissa käytetyillä kasvukäyrillä saatuihin arvoihin (Taulukko 1). MELA-laskelmissa kasvun tason arvioidaan nousevan etenkin kangasmaiden ositteissa. Lisäys on suurimmillaan jopa 60 % Etelä-Suomen karuilla turvemaidella ja Pohjois-Suomen karuhkoilla kankailla. Kasvun tason nousuun vaikuttaa muun muassa se, että laskelmassa puuston hehtaarikohtainen tilavuus lisääntyy näissä ositteissa. MELA-laskelmassa tilavuudet ja kasvut laskelman lopussa vaikuttavat joissain ositteissa varsin korkeilta VMI-aineistoon perustuvaan alkutilanteeseen verrattuna. Kasvun yksityiskohtaisempi analyysi edellyttäisi lisätarkasteluja kasvusta ikäluokittain ja hakkuiden kohdentumista ositteittain.

Kuva 17 esittää puuston runkotilavuuden kehityksen eri laskelmissa. Ikäluokkasimuloinnin ja MELA-laskelman tulokset ovat hyvin samanlaisia ensimmäisen 40 vuoden ajan. Tämän jälkeen MELA-laskelmissa puuston tilavuuden arvioidaan lisääntyvän selvästi nopeammin kuin vastaavissa ikäluokkasimuloinneissa.

Taulukko 1. MELA-laskelmien metsien keskikasvu ja tilavuus ositteittain simuloinnin alussa ja lopussa ja kasvun vertailu VMI13-datasta estimoitujen kasvukäyrien perusteella laskettuihin keskikasvuihin.

Tunnus / osite	Etelä-Suomi			Pohjois-Suomi		
	VMI 2019–2022	MELA 2019–2028	MELA 2099–2108	VMI 2019–2022	MELA 2019–2028	MELA 2099–2108
Keskimääräinen kasvu, m ³ /ha/v						
Rehevä kangas	9,21	9,14	11,30	3,51	5,83	6,56
Keskihyvä kangas	7,17	6,64	9,03	3,50	4,26	5,51
Karuhko kangas	5,03	5,17	7,38	314	3,36	5,26
Karu kangas	2,51	3,50	4,10	342	2,80	3,33
Rehevä turvemaa	7,80	7,01	8,88	344	4,99	6,41
Keskihyvä turvemaa	5,96	5,79	4,92	3,45	4,72	3,77
Karuhko turvemaa	4,14	4,03	3,19	3,49	3,49	2,23
Karu turvemaa	2,23	2,92	4,68	3,46	2,64	3,17
Keskitilavuus kymmenvuotis- kauden alussa, m ³ /ha	VMI 2019–2022	MELA 2019–2028	MELA 2099–2108	VMI 2019–2022	MELA 2019–2028	MELA 2099–2108
Rehevä kangas		182,0	229,1		127,5	148,7
Keskihyvä kangas		146,0	196,8		95,3	137,7
Karuhko kangas		105,6	160,9		66,8	125,4
Karu kangas		67,8	126,2		45,9	88,8
Rehevä turvemaa		163,0	154,3		108,9	127,6
Keskihyvä turvemaa		148,3	113,4		117,4	89,9
Karuhko turvemaa		120,2	88,1		88,8	60,8
Karu turvemaa		83,6	118,4		64,2	81,2

3.3. Tulosten tarkastelua

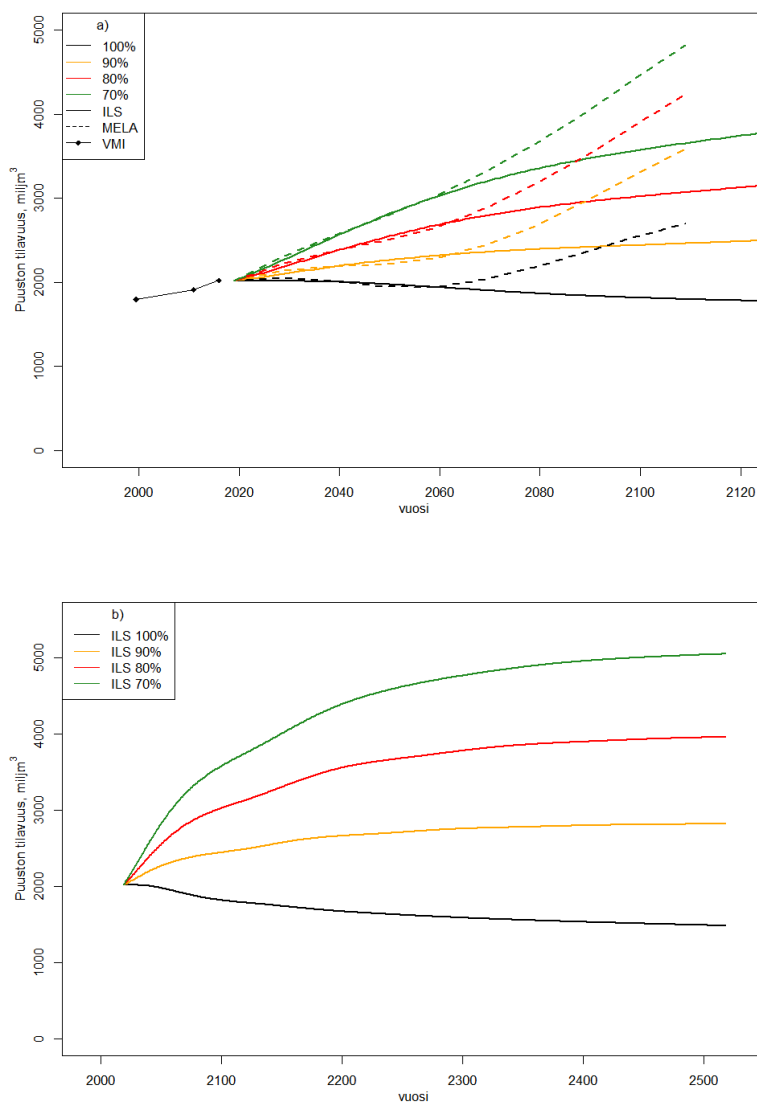
Ikäluokkasimulointi ja MELA-arviot antavat samansuuntaisen kuvan rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsämaan metsien kasvun ja runkotilavuuden kehityksestä lähivuosikymmeninä eri hakkuutasoilla. Pidemmällä aikavälillä menetelmillä saadut arviot poikkeavat merkittävästi toisistaan, sillä MELA-laskelmassa kasvunarvion taso ja sen myötä puuston tilavuus nousevat selvästi. Tähän arviioon on syytä suhtautua kriittisesti. Se voi osin olla seurausta siitä, että nykyistä paremmalla metsänhoidolla voitaisiin nostaa metsien kasvun tasoa, mutta se voi olla myös seurausta tässä sovelletuista MELA-laskelmien laskentamäärityksistä tai MELA-ohjelmistossa käytettävien kasvumallien puutteista, joiden vaikutusta optimointi korostaa etenkin pitkän aikavälin laskelmissa. Havaittujen erojen selvittäminen vaatii tarkempaa analyysiä.

Ikäluokkasimuloinnin kasvukäyrät perustuivat VMI13-aineiston vuosien 2019–2022 kasvumittauksiin. Ne kuvaavat sitä, miten eri ikäluokissa olevat metsät kasvoivat tuona ajanjaksona kunkin ositteen eri ikäluokissa. Jos ilmastonmuutoksen vaikutusta ei oteta huomioon, käytetyt kasvukäyrät kuvaavat miten metsät kasvavat, jos niitä hoidetaan sellaisilla metsänhoitomenetelmillä ja käytetään sellaisia harvennusohejelmia, joita on keskimäärin käytetty aiemmin, ja kun puulajisuhteissa ja tuhojen esiintymisessä ei tapahdu muutoksia. Jaksolliseen kasvatukseen ja alaharvennuksiin perustuva metsänhoito on ollut Suomessa käytössä jo noin yhden metsän kiertoajan verran, joten lähes kaikki VMI13-aineiston päätehakkuuikä nuoremmat metsät ovat olleet tällaisen metsänhoidon piirissä. Siksi mahdollisuudet vaikuttaa kasvukäyriin tulevaisuudessa hakkuutapojen ja uudistamismenetelmien kehittämisellä ovat

aiempiin vuosikymmeniin verrattuna rajalliset. Tulevaisuudessa mm. ilmastonmuutos ja metsänjalostus voivat aiheuttaa muutoksia metsien kasvuun ja tuhoalttiuteen. Niitä ei huomioitu MELA-laskelmissa eikä myöskään ikäluokkasimuloinnissa. MELA-ohjelmistossa käytössä oleva malli ennustaa vain satunnaisluontoiset pienialaiset tuhot (Ojansuu ym. 1991).

Ikäluokkasimuloinnin kasvukäyrien mallinnusaineiston mittausaikana metsien kasvun vuotuista vaihtelua kuvaavat kasvuindeksit olivat hieman normaalia alempana, minkä vuoksi ikäluokkasimuloinnin antamat arviot kasvusta ja poistumasta lienevät lieviä aliarvioita.

Kasvukäyrien laadinta-aineiston yli 70 vuotta vanhat metsät ovat syntyneet 1950-luvulla tai aiemmin. Niistä suuri osa on vanhoja harsintametsiä. Istutuksiin jalostetulla taimiaineeksella perustettujen metsien kasvu tulee varmasti poikkeamaan vanhojen harsintametsien kasvusta, mitä ei ikäluokkasimuloinnissa voitu ottaa huomioon. Toinen ongelma kasvukäyrissä on hakkuiden vaikutus. VMI-aineiston vanhimmat metsät ovat säästyneet jostain syystä päätehakkuulta. Syy voi liittyä siihen, että ne eivät ole vielä täyttäneet päätehakkuun järeysrajoja, mikä tarkoittaisi, että niiden kasvu on tavanomaista heikompaa.



Kuva 17. Puuston runkotilavuuden kehitys Ikäluokkasimuloinnissa ja MELA-laskelmissa eri hakkuutasoilla Suomen rajoittamattoman puuntuotannon metsämaan metsissä (pl. Ahvenanmaa ja Ylä-Lappi) sekä viimeisimpien valtakunnan metsien inventointien (VMI9, VMI11 ja VMI12) mukaiset tilavuudet 100 vuoden ajalla (a) sekä ikäluokkasimuloinnin ennakoima 500 vuoden kehitys (b).

Voi olla, että niitä ei ole päätehakattu, koska ne ovat ikäisekseen hyvässä kasvukunnossa. On myös mahdollista, että vanhat metsät on jätetty hakkuiden ulkopuolelle kasvun tasosta riippumattomista syistä. On huomattava, että kasvun mallinnuksessa olivat mukana myös koealat, joilla oli puuntuotannon rajoituksia tai jotka olivat suojeltuja. Edellä kuvatut kasvunmallinnuksen ongelmat liittyvät jossain määrin myös MELA-ohjelmiston nykyisiin kasvumalleihin, jotka perustuvat Luken pysyviin kokeisiin. Näissä MELA-laskelmissa puun pohjapinta-alan kasvumallit on kalibroitu VMI11-koeala-aineiston perusteella ja lisäksi tilavuuskasvun arviota on tarkennettu ottamalla huomioon vuoteen 2017 mennessä tapahtunut ilman keskilämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus puuston kasvuun (Luke 2023).

MELA-arvioissa havaittu kasvun nousu laskelman kuluessa lienee pääosin seurausta siitä, että laskennan aikana hakatut metsät alkavat yhä enenevässä määrin saavuttaa nopeimman kasvun vaiheensa. Lisäksi MELA-ohjelmiston optimointiin perustuvassa laskelmassa hakkuut ja niiden seurauksena myös metsien kehitys ohjautuvat laskelman kannalta optimaalisella tavalla, millä on vaikutusta myös puuston kasvun kehitysarvioon. On huomattava, että tarkastelujakson lopussa suurin osa metsistä on MELA-laskennassa malleilla perustettuja metsiä. Kasvuarvion kehityksen taustalla lienee se, että Suomen nykyiset metsät ja niiden rakenne eivät vastaa suurimman ylläpidettävissä olevan hakkuukertymän taustalla olevan optimointitehtävän (alkutilanteen tuottoarvon maksimoinnin ja optimointirajoitteiden muodostaman kokonaisuuden) mukaista optimaalista metsien tilaa laskelmien alkutilanteessa.

Malleihin perustuvat arviot ovat kuitenkin todellisuutta yksinkertaistavia ja niin MELA-ohjelmistolla optimoinnin tuloksena kuin ikäluokkasimuloinnilla saadut maakunnittaiset hakkuumäärät, hakkuiden rakenne ja hakkuiden kohdentuminen eivät vastaa käytännössä toteutunutta tai toteutuvaa. Metsien kasvu MELA-laskelman tuottamalla optimaalisella metsän rakenteella on optimoinnin käytön vuoksi luultavasti yliarvio, eikä yliarvion suuruutta tunneta. Yleisesti laskentaan liittyvien epävarmuuksien seurauksena arvioiden luotettavuus heikkenee sitä enemmän mitä pitemmälle tulevaisuuteen laskennassa edetään.

Tarkastelussa oli mukana vain rajoittamattomassa puuntuotannossa olevat metsämaan metsät. Jos mukaan otettaisiin myös suojellut ja rajoitetussa puuntuotannossa olevat metsät, muuttuisivat tulokset esim. kasvun ja poistuman eron suhteen (vrt. Hynynen ym. 2023).

Ikäluokkasimuloinnissa metsien kasvu ei reagoi harvennuksiin, mutta valittu harvennusohjelma vaikuttaa uudistus- ja harvennushakkuiden osuuteen poistumasta. Ikäluokkasimuloinnissa on siksi pyrittävä jäljittelemään tavanomaista harvennusohjelmaa. Tässä työssä päädyttiin harvennuspoistumaan, joka vastaa 15 vuoden välein tehtyjä harvennuksia, joissa poistuma on 25 % senhetkisestä tilavuudesta 90 vuoden ikään asti. Tämän ikävaiheen jälkeen harvennuksia ei enää tehty. Tällä harvennusohjelmalla metsikön puuston hehtaarikohtainen tilavuus 90 vuoden iässä vaihteli heikkokasvuisimpien ositteiden 42 kuutiometristä hehtaarilla nopeakasvuisimpien ositteiden 408 kuutiometriin hehtaarilla. Valittu harvennusohjelma ei vaikuta ikäluokkasimuloinnin avulla laskettuihin pitkän ajan hakkuumahdollisuuksiin, mutta se vaikuttaa erityisesti siihen, kuinka nopeasti metsien kasvu laskennassa mukautuu valittuun hakkuutasoon ja sitä kautta siihen, kuinka nopeasti kasvun ja poistuman erotus ajan kuluessa pienenee eri hakkuutasoilla. Ikäluokkasimulaattorin kehittämiseksi harvennusohjelma tulisi mallintaa VMI-aineistosta erikseen kullekin ositteelle niin, että harvennusvoimakkuudet ja intensiteetti vaihtelevat ositteiden välillä ja metsän vanhetessa.

4. Lopuksi

Euroopan metsien hiilinielua pidettiin pysyvänä keinona hiilen sitomiseen ilmakehästä, kunnes Nabuurs ym. (2013) ensimmäisenä varoittivat hiilinielun saturoitumisesta metsien ikääntymisen, kasvaneiden metsätuhojen ja äärevämpiä sääolosuhteiden vuoksi. Sittemmin useassa raportissa (esim. Pilli ym. 2022, ESABCCC 2024) tunnustetaan metsien ikärakenne, metsänhoito ja ilmastonmuutos avaintekijöiksi metsien ja hiilinielujen tulevaisuuden ennustamisessa (kts. myös esim. Grassi ym. 2019 ja Korosuo ym. 2023 näihin liittyvistä varauksista ja epävarmuuksista).

Tämä raportti sisältää näkökulmia metsien ikäluokkarakenteen ja metsänhoidon (käytännössä hakkuutaso) osalta, mutta ei huomioi tulevaa ilmastonmuutosta. Esimerkiksi Henttonen ym. (2024) arvioivat ympäristötekijöiden, käytännössä lämmenneen ilmaston selittäneen merkittävän osan siitä 90-luvun puolivälin jälkeisestä kasvun lisäyksestä, jota kasvutekijät eivät selittäneet. Toisaalta myös Henttosen ym. (2024) mukaan samaisten tekijöiden vaikutuksesta metsien kasvu on viimeisellä vuosikymmenellä kääntynyt laskuun ja metsien käyttöön liittyvien tavoitteiden kannalta on hyvin merkittävää, onko kyse lyhytaikaisesta vai pysyvämmästä ilmiöstä. Ilmastonmuutosta huomioimattomat mallit eivät kummasakaan tapauksessa pysty oikealla tavalla arvioimaan näiden tekijöiden vaikutusta.

Metsävarojen kehittymistä kuvaavissa skenaarioissa ilmastonmuutos ja siihen liittyvät puiden kuolleisuuden ja tuhojen vaikutukset rajataan usein tarkastelujen ulkopuolelle. Tuhoihin keskittyviä tarkasteluja kyllä on (Venäläinen ym. 2020), mutta koska tuhojen seuraukset riippuvat niiden aiheuttajasta (esim. Nevalainen ym. 2015) ja harjoitetusta metsänhoidosta (esim. Nevalainen 2017, Subramanian ym. 2019), niiden integrointi metsävarojen kehittymistä kuvaaviin skenaarioihin ei ole suoraviivaista ja se tulee olemaan skenaariotöiden keskeisimpiä haasteita lähitulevaisuudessa. Tuhoihin liittyvän epävarmuuden odotetaan lisääntyvän huomattavasti meneillään olevan vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla (Honkaniemi ym. 2024).

Raportissa tuotettiin metsien erittäin pitkän aikavälin kehityksen vertailulaskelma samaan syöttötietoon mutta erilaisiin mallinnusperiaatteisiin perustuen. Laadittujen skenaarioiden perusteella sekä ikäluokkasimuloinnissa että MELA-laskelmassa rajoittamattomassa puuntuotannossa olevien metsien hakkuupoistuman arvio vuosille 2019–2028 oli 81–83 milj. m³/v ja menetelmät antavat samansuuntaisen kuvan puuntuotannon mahdollisuuksista noin vuoteen 2050 asti. Sitä pitemmälle aikavälille ulottuvat ikäluokkasimuloinnin ja MELA-laskelman arviot poikkeavat toisistaan merkittävästi.

Metsien kasvun ja poistuman erotus, joka on avainasemassa metsien hiilinielun laskennassa, on sitä suurempi mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään. Ikäluokkasimulointi ennakoii hieman nousevaa kasvun tasoa lähivuosille erityisesti silloin, kun hakkuumäärää alennetaan suurimman puuntuotannollisesti kestäväen hakkuupoistuman tasosta (tarkasteltu 90 %, 80 % ja 70 % tästä tasosta) ja päätehakkuiden annetaan aluksi kohdistua selvästi puuntuotannon maksimoivan kiertoajan ylittäviin metsiin. Näillä hakkuutasoilla kasvu alkaa kuitenkin laskea 10–20 vuoden kuluttua, sitä voimakkaammin mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään, ja lähestyy hitaasti valittua hakkuutasoa.

Pitkällä aikavälillä ikäluokkasimulointi ja MELA-laskelma johtavat erilaiseen puuston kehitykseen: Ikäluokkasimuloinnissa puuston kasvu laskee ja on sitä alhaisempi mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään, mutta MELA-laskelmissa kasvun arvioidaan nousevan, ja nousu on pääosin sitä suurempaa mitä alhaisempaa hakkuutasoa käytetään. MELA-laskelman tulos on todennäköisesti merkittävältä osin seurausta simulointiin ja optimointiin perustuvan laskentamenetelmästä, ja siten saatuihin tuloksiin on syytä suhtautua varauksella, etenkin pitkän aikavälin tuloksiin. Toisaalta ikäluokkasimuloinnilla ei voida huomioida metsänhoidon mahdollisuuksia metsien kasvun lisäämisessä. Molemmissa menetelmissä on myös epävarmuuksia sen suhteen, kuinka tämän hetken taimikot ja nuoret metsät tulevat vuosikymmenten kuluttua kehittymään. Kumpikaan menetelmä ei myöskään tällä hetkellä pysty ennakoimaan ilmastonmuutoksen kokonaisvaikutusta, joka toisaalta lisää kasvuun tulevaisuudessa, mutta lisää myös tuhoriskejä.

Tässä työssä hyvin pitkän aikavälin simulointia käytettiin tunnistamaan ennusteissa olevia trendejä ja vastaava menettelytapa on perusteltu mallien pitkän aikajänteen loogisen toiminnan tarkasteluun. Myöskään Tietolaatikossa 2 esitettyjen skenaarioanalyysien tavoitteena ei ole alun perinkään ollut laatia toteutettaviksi tarkoitettuja hakkuusuunnitteita. Silti voi pohtia millaiselle aikajänteelle tulevaisuuden suuntautuvia laskelmia on mielekästä laatia niin, että skenaario-oletukset pitävät paikkansa. Esimerkiksi Vauhkonen ym. (2021) pitivät haastavana jo vertailutasolaskennan vertailukauden ja sitoumuskauden (30 vuotta) välistä aikaa markkinoihin ja ilmastonmuutokseen liittyvien häiriöiden ja niihin kytkeytyvien puun hakkuumäärien vaihtelun ennakkoinnin osalta. Vauhkonen ym. (2023) päätyi riippumatta samaan 30 vuoden ennusteeseen suuraluetason hirvituhomallin realistista toimintaa arvioimalla ja Tietolaatikossa 2 esitettyjä MELA-ohjelmistolla laadittuja arvioita raportoidaan pääosin korkeintaan 30–40 vuoden pituiselle tarkasteluajalle.

Raportin lukujen 1 ja 2 pohjalta korostuvat erityisesti EU-maiden välisten laskelmien ja raportointien harmonisointiin liittyvät tarpeet ja haasteet. Kasvihuonekaasuinventaarion tietojen muuttuminen yli ajan tarkentaa tietoja, mutta toisaalta ennusteiden vaihtelu yli ajan luo päätöksenteon kannalta vaikeasti ennakoitavan tilanteen, jossa tämänhetkiset parhaat tiedot voivat olennaisesti muuttua vuosien tai vuosikymmenien päästä. Erityyppisten mallien vertailua tarvitaan, mutta vakioiduin oletuksin, ja nämä tarpeet korostuvat erityisesti ylikansallisissa metsien kehityslaskelmissa.

Kaikkia metsiin kohdistuvia tavoitteita ei ole mahdollista saavuttaa samanaikaisesti, vaan päätöksentekijät joutuvat tekemään valintoja metsien käyttöä koskien. Esimerkiksi tässä esitetyt tarkastelut tuottavat tutkimuspohjaa, joihin metsien käytön, suojelun ja ilmastotavoitteiden mahdollisia yhdistelmiä voidaan perustaa.

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. 71 s.
- Abad Viñas, R. 2022. Assessment of Tiers methods used for LULUCF reporting and their compliance with Regulation (EU) 2018/841. Raportissa Korosuo, A., Abad Viñas, R., Rossi, S., Blujdea, V., Pilli, R., Fiorese, G., Vizzarri, M., Melo, J., Roman, R. & Grassi, G. Improved GHG inventories for better forest policies: JRC work in 2020-2023. Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC135881. DOI: 10.2760/74849
- Alberdi, I., Michalak, R., Fischer, C., Gasparini, P., Brändli, U.B., Tomter, S.M., Kuliesis, A., Snorrason, A., Redmond, J., Hernández, L., Lanz, A., Vidondo, B., Stoyanov, N., Stoyanova, M., Vestman, M., Barreiro, S., Marin, G., Cañellas, I. & Vidal, C. 2016. Towards harmonized assessment of European forest availability for wood supply in Europe. *Forest Policy and Economics* 70: 20–29. DOI: 10.1016/j.forpol.2016.05.014
- Alm, J., Wall, A., Myllykangas, J.P., 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. DOI: 10.5194/bg-20-3827-2023
- Bellassen, V., Angers, D., Kowalczewski, T. & Olesen, A. 2022. Soil carbon is the blind spot of European national GHG inventories. *Nature Climate Change* 12(4): 324–331. DOI: 10.1038/s41558-022-01321-9
- Bellassen, V., Cienciala, E. & Lehtonen, A. 2023. Moving to higher tiers for soil carbon. Korosuo, A., Blujdea, V., Rossi, S. & Grassi, G. (toim.) Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC134645. DOI: 10.2760/056380
- 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, DOI: 10.5194/essd-15-963-2023
- EC 2021. European Commission, Commission staff working document, Impact assessment report accompanying the document proposal for a regulation of the European parliament and the council amending regulations (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the compliance rules, setting out the targets of the Member States for 2030 and committing to the collective achievement of climate neutrality by 2035 in the land use, forestry and agriculture sector, and (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review. Verkkodokumentti <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021SC0609>. Viitattu 5.4.2024.
- ESABCCC 2024. European Scientific Advisory Board on Climate Change: Towards EU climate neutrality – Progress, policy gaps and opportunities. Assessment Report 2024. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 359 s. DOI: 10.2800/216446
- Fischer, C., Gasparini, P., Nylander, M., Redmond, J., Hernandez, L., Brändli, U.B., Pastor, A., Rizzo, M. & Alberdi, I. 2016. Joining criteria for harmonizing European Forest available for wood supply estimates. Case studies from National Forest Inventories. *Forests* 7:104. DOI: 10.3390/f7050104

Grassi, G., Cescatti, A., Matthews, R., Duveiller, G., Camia, A., Federici, S., House, J., de Noblet-Decoudré, N., Pilli, R. & Vizzarri, M. 2019. On the realistic contribution of European forests to reach climate objectives. *Carbon Balance and Management*, 14(8). DOI: 10.1186/s13021-019-0123-y

Haakana, M., Haikarainen, S., Henttonen, H., Hirvelä, H., Hynynen, J., Korhonen, K.T., Launiainen, S., Mehtätalo, L., Miettinen, A., Mutanen, A., Mäkinen, H., Ollila, P., Pitkänen, J., Rätty, M., Salminen, H., Tikkasalo, O.-P., Tuomainen, T., Viitanen, J. & Vikfors, S. 2022. Suomen LULUCF-sektorin 2021–2025 velvoitteen toteutuminen. Luonnonvarakeskus, lausunto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022123074123>

Henttonen, H., Nöjd, P. & Mäkinen, H. 2024. Environment-induced growth changes in forests of Finland revisited - a follow-up using an extended data set from the 1960s to the 2020s. *Forest Ecology and Management* 551. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121515

Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. Luonnonvarakeskus. 547 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>

Honkaniemi, J., Albrich, K., Repo, A., Aalto, J., Graf, L., Haikarainen, S., Huitu, O., Hantula, J., Hynynen, J., Jantunen, A., Kolstela, J., Lehtonen, I., Matala, J., Nikula, A., Poutanen, J., Salminen, H. & Vauhkonen, J. 2024. Multifunctional forests and their risks under climate change. *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 28/2024. Natural Resources Institute Finland. Helsinki. 59 p.

Hynynen J., Korhonen K.T., Kärkkäinen L., Mehtätalo, L., Mutanen, A., Rautio, P. & Viitala, E.-J. (toim.) 2023. Metsälain ilmastovaikutusten arviointi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 49/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 88 s.

Härkönen, S., Neumann, M., Mues, V., Berninger, F., Bronisz, K., Cardellini, G., Chirici, G., Hasenauer, H., Koehl, M., Lang, M., Merganicova, K., Mohren, F., Moiseyev, A., Moreno, A., Mura, M., Muys, B., Olshofsky, K., Del Perugia, B., Rörstad, P.K., Solberg, B., Thivolle-Cazat, A., Trotsiuk, V & Mäkelä, A. 2019. A climate-sensitive forest model for assessing impacts of forest management in Europe. *Environmental Modelling & Software*, 115: 128–143. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.009

Kalliokoski, T., Heinonen, T., Holder, J., Lehtonen, A., Mäkelä, A., Minunno, F., Ollikainen, M., Packalen, T., Peltoniemi, M., Pukkala, T., Salminen, O., Schelhaas, M.-J., Seppälä, J., Vauhkonen, J. & Kanninen, M. 2019. Skenaarioanalyysi metsien kehitystä kuvaavien mallien ennusteiden yhtäläisyyksistä ja eroista. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 2/2019. 88 s.

Kangas, A.S. 1999. Methods for assessing uncertainty of growth and yield predictions. *Canadian Journal of Forest Research* 29(9): 1357–1364. DOI: 10.1139/x99-100

Kniivilä, M., Hirvelä, H., Lintunen, J., Mutanen, A., Vatanen, E., Viitanen, J. & Kurttila, M. 2022. Metsien tiukan lisäsuojelun hakkuumahdollisuus-, arvonlisäys- ja työllisyysvaikutusten arviointi : Skenaariotarkastelu EU:n biodiversiteettistrategiasta Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 37 s.

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 Technology 366. ISBN 978-951-38-8722-3. 150 s.

Korosuo, A., Pilli, R., Abad Viñas, R., Blujdea, V.N., 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 and Management* 18(1). DOI: 10.1186/s13021-023-00234-0

Kärkkäinen, L., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Kniivilä, M., Kohl, J., Korhonen, K.T., Kurttila, M., Lempinen, R., Miina, J., Mutanen, A., Neuvonen, M., Nieminen, M., Ollila, P., Piirainen, S., Sarkkola, S., Tolvanen, A.,

- Tuomainen, T., Tyrväinen, L., Vatanen, E. & Viitanen, J. 2022. Taustaselvitys Kansallinen metsästrategia 2035:n valmistelua varten: Skenaarioihin perustuva tarkastelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 61/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 131 s.
- Kärkkäinen, L. & Koljonen, S. (toim.) 2023. Arvio EU:n biodiversiteettistrategian 2030 vaikutuksista Suomessa (2. painos). Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 33/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 359 s.
- Lappi, J. 1992. JLP: A linear programming package for management planning. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 414. 134 s.
- 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. DOI: 10.1051/forest:2006049
- Luke 2023. MELA Tulospalvelu, VMI12-13 (mittausvuodet 2017–2021). Luonnonvarakeskus, verkkojulkaisu <http://www.luke.fi/mela-metsalaskelmat>. Viitattu 18.12.2023.
- Luke 2024. Metsien vertailutason laskenta. Luonnonvarakeskus, verkkosivusto <https://www.luke.fi/fi/ajankohtaista/teemat-ja-kampanjat/metsien-vertailutason-laskenta>. Viitattu 5.4.2024.
- 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. ISBN 978-952-383-263-3. 104 s.
- Mehtätalo, L. & Lappi, J. 2020. Forest biometrics with examples in R. Chapman & Hall / CRC, Boca Raton, FL, USA. ISBN 978-1-4987-1148-7. 411 s.
- Mohamedou, C., Kangas, A., Hamedianfar, A. & Vauhkonen, J. 2022. Potential of Bayesian formalism for the fusion and assimilation of sequential forestry data in time and space. *Canadian Journal of Forest Research* 52(4): 439-449. DOI: 10.1139/cjfr-2021-0145
- Mutanen, A., Vauhkonen, J., Packalen, T. & Asikainen, A. 2019. LULUCF-asetus ja metsien vertailutaso. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 4/2019. 25 s.
- Nabuurs, G. J., Lindner, M., Verkerk, P. J., Gunia, K., Deda, P., Michalak, R. & Grassi, G. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 3(9): 792-796. DOI: 10.1038/nclimate1853
- Neumann, M., Moreno, A., Mues, V., Härkönen, S., Mura, M., Bouriaud, O., Lang, M., Achten, W.M.J., Thivolle-Cazat, A., Bronisz, K., Merganič, J., Decuyper, M., Alberdi, I., Astrup, R., Mohren, F. & Hasenauer, H. 2016. Comparison of carbon estimation methods for European forests. *Forest Ecology and Management*, 361: 397-420. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.11.016
- Nevalainen, S. (2017). Comparison of damage risks in even-and uneven-aged forestry in Finland. *Silva Fennica* 51(3). DOI: 10.14214/sf.1741
- Nevalainen, S., Sirkiä, S., Peltoniemi, M. & Neuvonen, S. 2015. Vulnerability to pine sawfly damage decreases with site fertility but the opposite is true with Scleroderris canker damage; results from Finnish ICP Forests and NFI data. *Annals of Forest Science* 72: 909-917. DOI: 10.1007/s13595-014-0435-8
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) - Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1164-3>

- 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.
- Pilli, R., Alkama, R., Cescatti, A., Kurz, W.A. & Grassi, G. 2022. The European forest carbon budget under future climate conditions and current management practices. *Biogeosciences* 19(13): 3263–3284. DOI: 10.5194/bg-19-3263-2022
- Pukkala, T. 2007. Metsäsuunnittelun menetelmät. Joen Forest Program Consulting Oy, Gummerus Kirjapaino Oy, Vaajakoski. ISBN 978-952-92-1731-1. 208 s.
- Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.). 2022. Jatkuvaiteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 132 s.
- Räty T., Häkkinen T. & Pesu J. 2021. Pitkäaikaisten biohiilivarastojen arviointimenetelmät: Esiselvitys puutuotteista, Tuloruudut. 58 s. Luonnonvarakeskus, Suomen ympäristökeskus. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021081843543>. Viitattu 5.4.2024.
- Salas-Eljatib, C., Mehtälä, L., Gregoire, T.G., Soto, D.P. & Vargas-Gaete, R. 2021. Growth equations in forest research: mathematical basis and model similarities. *Current Forestry Reports* 7. DOI: 10.1007/s40725-021-00145-8
- 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.
- Soimakallio, S., Häkkinen, T. & Seppälä, J. 2021. Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina – Puurakentamisen lisäämisen vaikutukset kasvihuonekaasutaseisiin Suomessa vuoteen 2035 mennessä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 45/2021. ISBN 978-952-11-5437-9
- Subramanian, N., Nilsson, U., Mossberg, M., & Bergh, J. (2019). Impacts of climate change, weather extremes and alternative strategies in managed forests. *Ecoscience*, 26(1): 53-70. DOI: 10.1080/11956860.2018.1515597
- Vauhkonen, J., Berger, A., Gschwantner, T., Schadauer, K., Lejeune, P., Perin, J., Pitchugin, M., Adolt, R., Zeman, M., Johannsen, V.K., Kepfer-Rojas, S., Sims, A., Bastick, C., Morneau, F., Colin, A., Bender, S., Kováčevics, P., Solti, G., Kolozs, L., Nagy, D., Nagy, K., Twomey, M., Redmond, J., Gasparini, P., Notarangelo, M., Rizzo, M., Makovskis, K., Lazdins, A., Lupikis, A., Kulbokas, G., Antón-Fernández, C., Castro Rego, F., Nunes, L., Marin, G., Calota, C., Pantić, D., Borota, D., Roessiger, J., Bosela, M., Šebeň, V., Skudnik, M., Adame, P., Alberdi, I., Cañellas, I., Lind, T., Trubins, R., Thürig, E., Stadelmann, G., Ditchburn, B., Ross, D., Gilbert, J., Halsall, L., Lier, M. & Packalen, T. 2019 Harmonised projections of future forest resources in Europe. *Annals of Forest Science* 76. DOI: 10.1007/s13595-019-0863-6
- Vauhkonen, J., Matala, J. & Nikula, A. 2023. Future browsing damage in seedling stands according to projected forest resources and moose population density. *Silva Fennica* 57(2). DOI: 10.14214/sf.23012
- Vauhkonen, J., Mutanen, A., Packalen, T. & Asikainen, A. 2021. Initial forest age distribution may generate computational sinks or sources of carbon: a generic approach to test assumptions underlying the EU LULUCF forest reference levels. *Carbon Balance and Management* 16(1). DOI: 10.1186/s13021-021-00177-4
- Vauhkonen, J. & Packalen, T. 2019. Shifting from even-aged management to less intensive forestry in varying proportions of forest land in Finland: impacts on carbon storage, harvest removals, and harvesting costs. *European Journal of Forest Research*, 138: 219–238. DOI: 10.1007/s10342-019-01163-9

Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O.P., Viiri, H., Ikonen, V.P. & Peltola, H. 2020. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: a literature review. *Global Change Biology* 26: 4178–4196. DOI: 10.1111/gcb.15183

VMI13 2021. Valtakunnan metsien 13. inventointi (VMI13), Maastotyön ohjeet 2021. Luonnonvarakeskus. 163 s.

Väätäinen, K., Mutanen, A., Anttila, P., Laitila, J., Routa, R., Kniivilä, M., Ahtikoski, A. & Lindblad, J. 2023. EU-politiikkojen mahdollisia vaikutuksia puun korjuukustannuksiin: kustannuslaskentamallin kehittäminen ja skenaariotarkastelu. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 39 s.



METSÄBIOTALOUDEN
TIEDEPANEELI

METSÄBIOTALOUDEN TIEDEPANEELI
Yhteystietoja tähän

www.metsatiedepaneeli.fi