



SUOMEN
ILMASTOPANEELI
The Finnish Climate
Change Panel

SKENAARIOANALYYSI METSIEN KEHITYSTÄ KUVAAVIEN
MALLIEN ENNUSTEIDEN YHTÄLÄISYYKSISTÄ JA EROISTA

TUOMO KALLIOKOSKI, TERO HEINONEN, JONATHAN HOLDER,
ALEKSI LEHTONEN, ANNIKKI MÄKELÄ, FRANCESCO MINUNNO,
MARKKU OLLIKAINEN, TUULA PACKALEN, MIKKO PELTONIEMI, TIMO
PUKKALA, OLLI SALMINEN, MART-JAN SCHELHAAS, JYRI SEPPÄLÄ,
JARI VAUHKONEN, MARKKU KANNINEN

Suomen ilmastopaneeli
Raportti 2/2019

Ilmastoviisas metsäbiotalous –osahanke 2

SKENAARIOANALYYSI METSIEN KEHITYSTÄ KUVAAVIEN MALLIEN ENNUSTEIDEN YHTÄLÄISYYKSISTÄ JA EROISTA

Tuomo Kalliokoski^{1,2,3*}, Tero Heinonen⁵, Jonathan Holder², Aleksi Lehtonen⁶, Annikki Mäkelä², Francesco Minunno², Markku Ollikainen⁷, Tuula Packalen⁸, Mikko Peltoniemi⁶, Timo Pukkala⁵, Olli Salminen⁶, Mart-Jan Schelhaas⁹, Jyri Seppälä¹⁰, Jari Vauhkonen⁸, Markku Kanninen^{3,4}

¹ INAR, Ilmakehätieteiden keskus/Fysiikka, PL 68, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, 00014 Helsingin yliopisto

² INAR, Ilmakehätieteiden keskus /Metsä, PL 27, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, 00014 Helsingin yliopisto

³ HELSUS-Kestävyystieteen instituutti, PL 27, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, 00014 Helsingin yliopisto

⁴ VITRI, Viikki Tropical Resources Institute, Metsä, PL 27, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, 00014 Helsingin yliopisto

⁵ Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, Itä-Suomen yliopisto, PL 111 80101 Joensuu

⁶ LUKE, Luonnonvarakeskus, PL 2, 00791 Helsinki

⁷ Taloustieteen osasto, Ympäristö- ja luonnonvaraekonomia, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto

⁸ LUKE, Luonnonvarakeskus, Yliopistokatu 6, 80100 Joensuu

⁹ WUR, Wageningen Environmental Research, Wageningen University and Research, P.O. Box 47 6700 AA Wageningen, The Netherlands

¹⁰ SYKE, Suomen ympäristökeskus, Kulutuksen ja tuotannon keskus, Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

[*tuomo.kalliokoski@helsinki.fi](mailto:tuomo.kalliokoski@helsinki.fi), +358 50 4487536

TIIVISTELMÄ

Maankäyttösektorin ja erityisesti metsien merkitys on kasvamassa entisestään ilmastopolitiikassa. Tässä tilanteessa on tarpeen tuntea päätöksenteon tukemiseen pääasiassa käytettävien metsien hiilitasetta kuvaavien mallityökalujen ennustuskyky. Selvityksessä arvioitiin miten Suomen metsien käytön hiilitasetta kuvaavien mallien ennusteet eroavat toisistaan ja mitkä tekijät malleissa keskeisesti selittävät eroja.

Selvityksessä tarkasteltiin kuuden eri metsien hiilitaseen kehitystä kuvaavan mallin (EFDM, EFISCEN, FORMIT, MELA, MONSU ja PREBAS) ennusteita kolmella eri hakkuuskenaariolla (Matala n. 40 milj.m³ vuosi⁻¹, Poliitiikka n. 80 milj.m³ vuosi⁻¹ ja Suurin kestävä n. 85 milj.m³ vuosi⁻¹). Tarkastelujakso vaihteli mallien välillä päättyen joko vuoteen 2065 tai 2100. Hiilitaseen laskennassa tarkastelutapana oli varaston muutos, jolloin metsän hiilivaraston kasvaessa metsä toimii hiilinieluna.

Keskeinen johtopäätös on, että mallit tuottavat hyvin erilaisia hiilitase-ennusteita. Kaikki mallit tuottivat tarkasteluilla aikaväleillä matalimmalla hakkuutasolla suurimman metsien hiilivaraston ja hiilinielun. Kuitenkin mallien ennusteet muun muassa puuston kasvusta hakkuutasoa madallettaessa eivät olleet edes laadullisesti samanlaisia; osassa malleja kasvu kiihtyi, kun osassa se laski. Tulokset koskevat pääasiassa ennusteita nykyilmastossa. Mallit poikkesivat ilmastomuutoksen vasteiden toteuttamisen näkökulmasta toisistaan niin paljon, että tarkastelun päätavoite, mallien välisten erojen esiin nostaminen ja niiden tulkinta, oli vaarassa jäädä ilmastomuutoksen tuoman lisävaihtelun peittoon.

Mallit ovat erilaisia, eikä niitä tehdyn analyysin perusteella voida laittaa paremmuusjärjestykseen. Tulevaisuuteen suuntaavat skenaarioanalyysit tulisi perustua mahdollisimman laajaan ymmärrykseen epävarmuuksista. Esimerkiksi hakkuiden vaikutus ennustettuun nielukehitykseen vaihteli mallien välillä voimakkaasti. Muun muassa MELA-mallissa hakkuiden vaikutus nielun vähentymiseen oli lähes kaksinkertainen PREBAS-malliin verrattuna. Maaperän hiilivaraston mallinnus sisältää erityisen suuren epävarmuuden kaikissa malleissa. Vaikka ilmastomuutoksen vaikutus jätetään tarkastelun ulkopuolelle, kokonaisuvarmuus hakkuiden vaikutuksesta hiilinieluun poikkesi mallien välillä enemmän kuin nykyisen metsien hiilinielun verran. Työn keskeinen havainto on, ettei mikään nykyisistä metsien hiilitasetta kuvaavista malleista pysty yksin ennustamaan luotettavasti metsien tulevaa kehitystä. Suunniteltaessa Suomen ilmastopolitiikkaa ja erityisesti metsäsektorin ohjausta päätöksenteon tueksi tulisi kehittää erilaisia mallien oletuksia yhtenäistäviä tarkastelumenetelmiä ja johtaa useammasta mallista päätöksentekoa tukevia indikaattoreita. Lisäksi tulisi käyttää erilaisia skenaarioita ennusteisiin liittyvän epävarmuuden pienentämiseksi.

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| 1. JOHDANTO | 6 |
| 1.1 Tausta | 6 |
| 1.2 Tavoitteet | 7 |
| 2. MALLIEN KESKEISET PIIRTEET | 7 |
| 2.1 Mallien valintakriteerit, harmonisointi ja keskeiset piirteet | 7 |
| 3. TULOKSET | 10 |
| 3.1 Hakkuuskenaariot | 10 |
| 3.2 Puuston kehitys | 12 |
| 3.3 Hiilivaraston ja hiilinielun kehitys | 19 |
| 3.4 Puutuotteiden nielu ja korvausvaikutukset | 27 |
| 3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus | 29 |
| 3.6 Rajoitteita/Kehityskohtia | 29 |
| 4. PÄÄVIESTIT/Johtopäätökset | 31 |
| 5. MALLIEN KUVAUKSET | 32 |
| 5.1 MELA | 32 |
| 5.1.1 Keskeiset piirteet | 32 |
| 5.1.2 Laskenta-aineisto | 35 |
| 5.1.3 Käsittelyvaihtoehtojen simulointi | 36 |
| 5.1.4 Hiilen varastomuutosten ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen laskenta | 38 |
| 5.2 EFISCEN | 39 |
| 5.2.1 Keskeiset piirteet | 39 |
| 5.2.2 Laskenta-aineisto | 40 |
| 5.2.3 Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi | 41 |
| 5.2.4 Puutuotteet | 42 |
| 5.3 FORMIT | 42 |
| 5.3.1 Keskeiset piirteet | 42 |
| 5.3.2 Laskenta-aineisto | 45 |
| 5.3.3 Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi | 46 |
| 5.3.4 Hiilen varastomuutosten ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen laskenta | 46 |
| 5.4 MONSU | 46 |
| 5.4.1 Keskeiset piirteet | 46 |
| 5.4.2 Laskenta-aineisto | 47 |
| 5.4.3 Käsittelyvaihtoehtojen simulointi | 47 |
| 5.5 PREBAS | 52 |
| 5.5.1 Keskeiset piirteet | 52 |

| | |
|---|----|
| 5.5.2 Laskenta-aineisto | 53 |
| 5.5.3 Käsitteyvaihtoehtojen simulointi | 54 |
| 5.6 EFDM | 56 |
| 5.6.1 Keskeiset piirteet | 56 |
| 5.6.2 Laskenta-aineisto ja sen luokittelu matriisimuotoon | 57 |
| 5.6.3 Siirtymätodennäköisyydet | 58 |
| 5.6.4 Toimenpiteiden osuudet ja kokonaishakkuumäärät | 59 |
| 6. Viitteet | 60 |

LIITTEET

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteiden saavuttaminen vaatii ennen näkemättömiä ilmaston lämpenemistä rajoittavia toimia. Vuosisadan puolenvälin jälkeen tarvitaan globaalisti nettonegatiivisia päästöjä. Näiden tuottamisessa IPCC:n 1.5 raportissa (IPCC 2018) keskeisessä roolissa ovat sekä hiilen sitomiseen ja varastointiin perustuvat teknologiat että ekosysteemien nielujen kasvattaminen. Joissakin analyyseissä maankäyttösektorilla tehtävien nieluja lisäävien toimien on laskettu yltävän jopa 37% kokonaispäästövähennyksestä 2030 mennessä polulla, joka johtaa alle kahden asteen tavoitteeseen (Griscom ym. 2017, Natural Climate Solutions, NCS). Erittäin tärkeää on ymmärtää, että 1.5 ja 2 asteen tavoitteeseen tähtäävien skenaarioiden hiilibudjeteissa nykyiset nielut ovat jo mukana, eli nettonegatiivisiin päästöihin ei lasketa mukaan nykyisiä ekosysteemien nieluja, vaan vain nykyisen tason ylittävä nielujen osuus (IPCC 2018). Tämä tarkoittaa, että metsien käyttö nousee sekä globaalisti että ennen kaikkea Suomen kaltaisessa maassa entistäkin voimakkaammin mukaan energia- ja ilmastopolitiikkaan.

Suomen Energia- ja ilmastostrategian (E & I) mukaiset vuosittaiset lisähakkuut nykyisestä noin 70 miljoonasta kuutiosta 80 miljoonaan kuution vuoteen 2025 mennessä voivat merkitä Suomen ilmastopolitiikan toteutumisen kannalta hyvin erilaista lopputulosta riippuen muun muassa siitä, millaisen metsien hiilivaraston muutoksen hakkuutaso nosto tuottaa ja millä aikajänteellä tämä muutos toteutuu. Kaavailut teollisuusinvestoinnit, puutuotteiden kysyntä ja metsäteollisuuden tuoteinnovaatiot määrittävät yhdessä metsien hiilivarasto- ja nielumuutoksen. Metsiin pohjautuvan biomassan ilmastovaikutus syntyy metsien, ja puutuotteiden hiilivarastomuutosten sekä puutuotteiden ja -energioiden korvaushyötyjen kautta Korvaus- eli substituutiohyötyjä syntyy kun puutuotteilla ja -energiolla voidaan välttää elinkaari- ja tuotantovaiheiden suuressä osassa tuotteiden ja -energioiden käyttöä. Maankäyttösektoriin kohdistuvien ilmastopolitiikan ohjauskeinojen valinnassa ja mitoittamisessa olennainen tekijä on myös, kuinka maankäyttösektorin laskennallinen nielu EU:n LULUCF:n (Land Use Land Use Change and Forestry) pelisääntöissä referenssitasona toteutuu.

Suunniteltaessa Suomen ilmastopolitiikkaa ja erityisesti maankäyttösektorin ohjausta, tarvitaan tulevaisuuteen suuntaavia skenaarioanalyysejä. Niiden tulisi pohjata mahdollisimman laajaan ja syvälliseen ymmärrykseen metsien käyttöön ja nieluun liittyvistä epävarmuuksista. Lisäksi nämä epävarmuudet tulisi yrittää kvantifioida. Kaikki skenaariomallinnustyökälut sisältävät merkittävän määrän oletuksia, minkä vuoksi hillintään tähtäävät toimet voivat tuottaa yllättäviä vaikutuksia erityisesti eri muuttujien välisten vuorovaikutusten vuoksi. Näin ollen päätöksenteon tukemisessa käytettävien työkalujen vertaaminen muihin vastaaviin työkaluihin on arvokasta ja auttaa varautumaan paremmin epävarmuuksiin.

Suomen metsien käyttöä on kuvattu ja simuloitu useilla eri malleilla. Ilmastopaneelin vuosien 2015 ja 2017 selvitysten yksi keskeinen viesti oli, että Suomen metsien tulevaa kehitystä kuvaavia mallilaskelmia olisi hyvä täydentää analyyseillä eri mallien ennusteiden eroavaisuuksista ja pyrkiä tulkitsemaan näitä eroavaisuuksia. Suomen metsäpolitiikassa, sekä Energia- ja ilmastostrategiassa käytetyn MELA-mallin skenaarioennusteiden tulkitsemista helpottaa kun niitä voidaan verrata muiden mallien ennusteisiin. Tunnetut mallien väliset erot

eri prosessien kuvauksissa auttavat myös suuntaamaan mallien kehitystyötä tieteellisen kiinnostavuuden lisäksi päätöksenteon kannalta olennaisiin asiakysymyksiin.

1.2 Tavoitteet

Tässä selvityksessä tarkastellaan miten Suomen metsien käytön hiilitasetta kuvaavien mallien ennusteet eroavat toisistaan ja mitkä tekijät malleissa keskeisesti selittävät eroja.

Selvitykseen valituilla malleilla tuotettiin metsäekosysteemin (puusto + maaperä) hiilivaraston muutos eri skenaarioissa. Alkuperäisenä tavoitteena oli lisäksi pyrkiä arvioimaan *puutuotteiden hiilivarasto- ja substituutiovaikutukset*. Puutuotteiden hiilivaraston muutosmallinnus toteutui kuitenkin ainoastaan kahdella mallilla, joten mallien vertaaminen ei ollut mahdollista tässä suhteessa.

Lisäksi selvityksesstä toteutettiin RCP2.6 ilmastoskenaarion ilmastoprojektion vaikutuksia kuvaava simulaatio kullakin mallilla. RCP2.6 ilmastoskenaario kuvaa tilannetta, jossa globaali lämpötilan nousu jää alle 2 asteen (66% todennäköisyys, IPCC 2013).

2. MALLIEN KESKEISET PIIRTEET

2.1 Mallien valintakriteerit, harmonisointi ja keskeiset piirteet

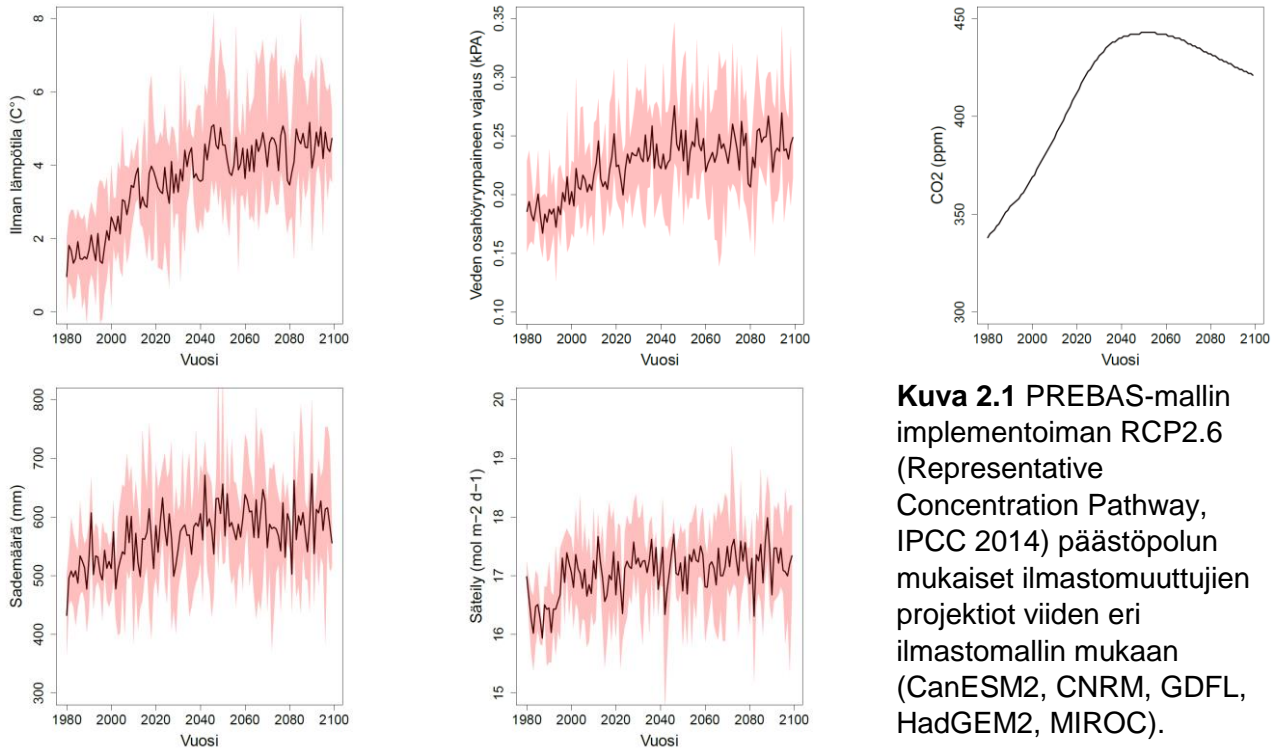
Mallien tärkein valintakriteeri oli mahdollisuus toimeenpanna E & I -strategian mukainen vuotuinen hakkuutaso, 80 milj.m³/vuosi (Politiikka-skenaario, Policy). Lisäksi selvityksessä toteutettiin madalletun hakkuutason skenaario, 40 milj.m³/vuosi (Matala, Low), sekä MELA-mallin ennustama Suurin kestävä-skenaario (MaxSust, n. 85 milj.m³/vuosi).

Mallien valinnassa pidettiin tärkeänä myös, että ne pystyvät kuvaamaan kaikkien kolmen suomalaisen pääpuulajin, männyn (*Pinus sylvestris*), kuusen (*Picea abies*) ja koivun (*Betula* spp.) kasvudynamiikkaa tai kasvudynamiikat.

Hankkeeseen saatiin mukaan seuraavat mallit (Taulukko 2.1); MELA (Hirvelä ym. 2016), MONSU (Pukkala 2013, 2014), EFISCEN (Schelhaas 2007), FORMIT (Härkönen ym. 2019), PREBAS (Minunno ym. 2018) ja EFDM (Vauhkonen & Packalen 2017, 2018, vain puuston tilavuuden ja kasvun kehitys kahdessa skenaariossa,).

Käytetty VMI data vaihteli mallien välillä sekä mallien kalibroinnin että syöttötietojen osalta. EFDM, EFISCEN, MELA ja MONSU alustettiin VMI11 aineistolla, FORMIT VMI10 aineistolla, kun PREBAS-malli käytti ainoana monilähdeinventointidataa MVMI11.

Kaikki mallit käyttivät YASSO maamallia maaperän hiilen dynamiikan mallinnukseen. PREBAS-malli käytti mallista versiota YASSO15 (Repo ym. 2017), muut mallit versiota YASSO07 (Tuomi ym. 2011).



Kuva 2.1 PREBAS-mallin implementoiman RCP2.6 (Representative Concentration Pathway, IPCC 2014) päästöpölyn mukaiset ilmastomuuttujien projektiot viiden eri ilmastomallin mukaan (CanESM2, CNRM, GDFL, HadGEM2, MIROC).

Ilmastomuutoksen toteutus malleissa poikkesi kaikissa malleissa toisistaan (Taulukko 2.1). MELA ja PREBAS-malleissa lähtötietoina käytettiin samoja globaalien ilmastomallien (Global Circulation Model, GCM) RCP2.6 ilmastoksenaarion ilmastoprojektioita (Kuva 2.1), mutta PREBAS-malli kykenee huomioimaan ilmastomuuttujat huomattavasti laajemmin kuin MELA.

FORMIT tuotti ilmastovasteen yhden GCM RCP2.6 ilmastoprojektioista, kun taas MONSU käytti Sima-ohjelman ennusteisiin ja alkuperäkokeisiin perustuvia metamalleja. EFISCEN tuotti ilmastovasteen SRESB1 skenaarioon pohjautuen. EFDM:n siirtymätodennäköisyyksiä päivitettiin lisäämällä niihin keskimääräisen RCP2.6-ilmastoksenaarion hiilidioksidin ja lämpötilan nousua vastaava, ennustettu lisäkasvu.

Tässä selvityksessä tehtyjen simulointien pohjana ovat Poliitikka ja Suurin kestävä-skenaarioiden osalta MELA-mallin käyttämät hakkuukertymät Lehtonen ym. (2016) hakkuuskenaarioihin pohjautuen. Mallinnuksen toteutus poikkeaa kuitenkin monilta osin Lehtonen ym. skenaarioista, joten tässä tehtyjä simuloitteja ja niiden tuloksia ei voi suoraan verrata ko. selvityksen tuloksiin.

Taulukko 2.1 Selvityksessä mukana olleet mallit ja niiden keskeiset piirteet.

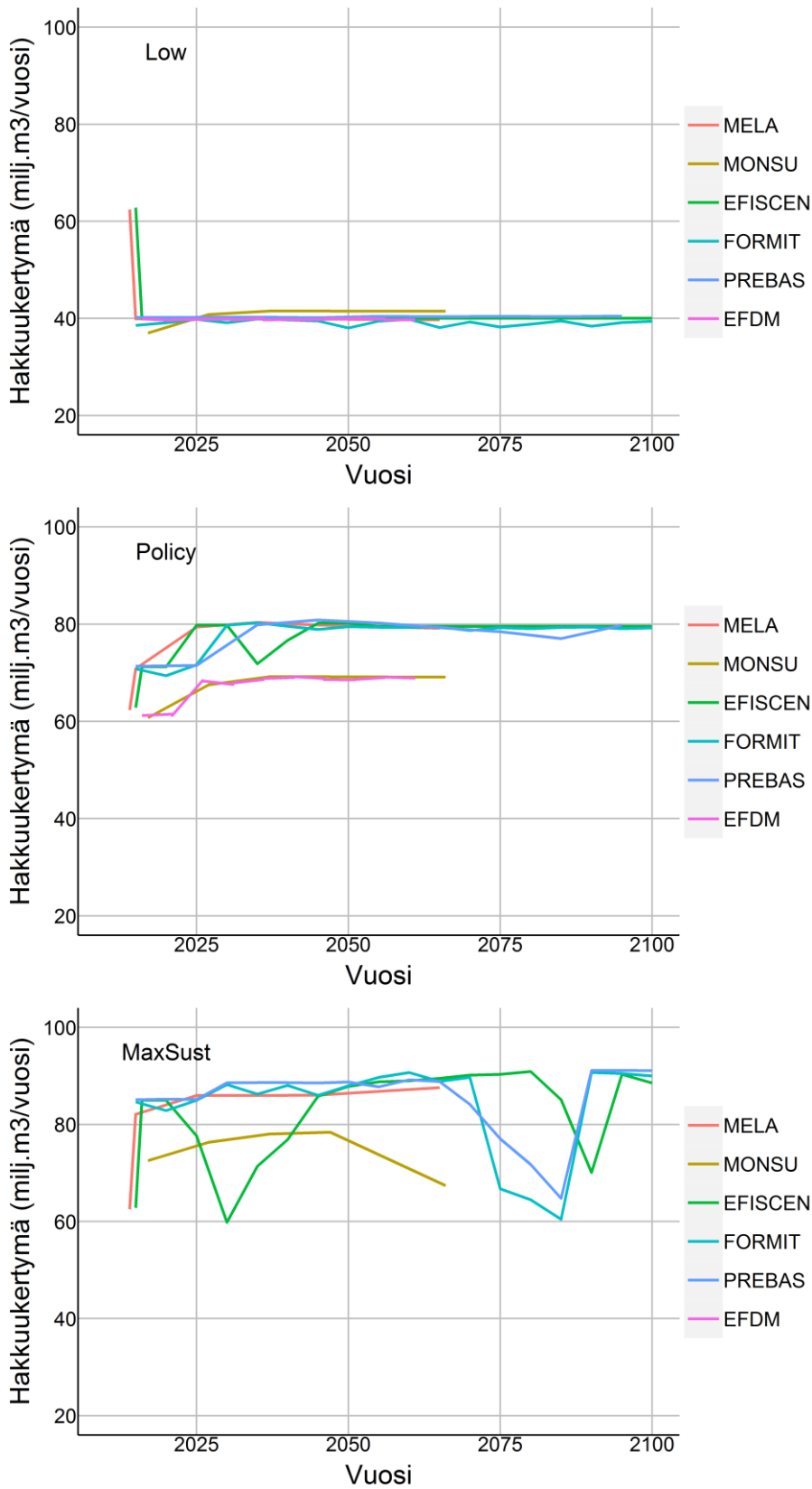
| | Malli/Instituutti | | | | | |
|-------------------------------------|---|---|--|---|--|--|
| Muuttuja | EFDM/LUKE | EFISCEN/EFI | FORMIT/HYO | MELA/LUKE | MONSU/UEF | PREBAS/LUKE-HYO |
| Kalibrointi/Lähtötilanteen puusto | VMI11 | VMI11 | VMI10 | VMI11 | VMI11 | MVMI11 |
| Kasvumallit | Ei mallia (VMI11/VMI10 pysyvilta koelaloilta mallinnetut siirtymätodennäköisyydet) | Matriiseihin jaetut alueelliset empiiriset tuotostaulukot | Fotosynteesituotoksen huomioivat empiiriset kasvumallit metsikön keskipuulle | Empiiriset puutason kasvumallit | Empiiriset puutason kasvumallit | Prosessipohjaiset kasvumallit metsikön keskipuulle |
| Hakkuiden toteutus | Hyvän metsänhoidon suositusten mukaisia hakkuutodennäköisyyksiä iteroimalla | Hakkuiden jakautuminen alueellisesti mallin ulkopuolelta | Hakkuiden alueellinen jakautuminen perustuu havaintoihin, alueen sisällä satunnaistettu | Hakkuiden optimointi mallin kolmella suuralueella | Hakkuiden optimointi mallin sisällä kolmella suuralueella | Hakkuiden jakautuminen satunnaistettu metsäkeskusalueittain, niille kohteille, joilla Metsänhoidon suositukset saavutetaan |
| Hakkuutavoite | Vuotuinen kokonaismäärä | Vuotuinen kokonaismäärä jaettuna harvennus- ja päätehakkuisiin | Vuotuinen kokonaismäärä jaettuna harvennus- ja päätehakkuisiin | Ainespuun kokonaiskertymä ja tukkipuun kertymä | Kuitu- ja tukkitilavuus puulajeittain 10-vuotis kausittain | Vuotuinen kokonaismäärä, noudattaen MELA:n hakkuutavoitteita. |
| Ilmastoprojektioiden implementointi | Tilavuuskasvua lisätään siirtymätodennäköisyyksiä muuttamalla Matalan ym. (2005) funktioiden perusteella huomioiden kasvun stokastinen vaihtelu. Funktioissa huomioidaan ilmakehän CO2 pitoisuus ja ilman lämpötila. Matalan ym. funktiot perustuvat FinnFor malliin. | Suhteellinen NPP lisäys perustuen 4C mallin ennustamaan muutokseen. | PRELES malliin perustuva GPP:n lisäys, joka muunnetaan VMI mittauksiin pohjautuvalla empiirisellä mallilla NPP:ksi. FORMIT simuloinneissa huomioidaan ilman lämpötila, sadanta, valovuon voimakkuus, maaperän kosteus. | Mallin pituusboniteettia muutetaan Matalan ym. (2005) funktioiden perusteella. Funktioissa huomioidaan ilmakehän CO2 pitoisuus ja ilman lämpötila. Matalan ym. funktiot perustuvat FinnFor malliin. | Metamallit, jotka perustuvat SIMA malliin ja alkuperäkokeisiin. SIMA ennusteet perustuvat FinnFor malliin. | PRELES malliin perustuva GPP:n lisäys, joka annetaan syötteenä CROBAS kasvumallille. PREBAS simuloinneissa huomioidaan CO2, Ilman lämpötila, sadanta, valovuon voimakkuus, ilmankosteus, maaperän kosteus. |

3.TULOKSET

3.1 Hakkuuskenaariot

Eri hakkuuskenaarioiden toteutus poikkesi eri malleissa hieman toisistaan, mikä vaikuttaa tuloksiin. Matalimmassa hakkuuskenaariossa erot olivat vähäisiä ja kaikki mallit saavuttivat 40 milj.m³ vuotuisen hakkuutason v. 2015 jälkeen (Kuva 3.1). Tulosten tulkinnassa on syytä huomioda, että Matala-skenaariossa metsät tihenevät ja vanhenevat suuremmissa osuuksissa, missä tilanteessa kaikkien mallien ennustekyky heikkenee. Skenaariossa ei kuitenkaan mennä kasvumallien kalibrointiin käytetyn datan ulkopuolelle (hakkuukertymä esim. vuonna 2009 48,3 milj.m³ ja 1991 39,4 milj.m³). Sen sijaan Poliitikka ja Suurin kestävä- skenaarioissa MONSU-mallin hakkuukertymä jäi selvästi alemmaksi tavoiteltua. Myöskään EFISCEN-malli ei pystynyt pitämään hakkuukertymää näissä hakkuuskenaarioissa koko tarkastelujakson ajan tavoitellulla tasolla. Lisäksi FORMIT- ja PREBAS-mallien hakkuukertymä romahti Suurin kestävä-skenaariossa voimakkaasti vuoden 2060 jälkeen.

Harjoituksessa toteutettu Suurin kestävä (puuntuotannollinen kestävyys) -skenaario määritelmä perustuu MELA-mallin ennusteeseen. Ajatuksena on, että hakkuuta tulisi pystyä jatkamaan kyseisellä tasolla ilman, että hakkuumahdollisuudet pienentyvät tulevaisuudessa. Esimerkiksi MONSU-mallissa aiemmin tehdyissä tutkimuksissa Suurin kestävä -skenaarion määritelmän on ollut, että jäljelle jäävän puuston tilavuus ei saa laskea. Tässä selvityksessä Suurin kestävä -skenaarion tavoitteena myös MONSU-mallissa oli MELA-mallin saavuttamat hakkuumäärät. MELA-mallin ennustama Suurin Kestävä -hakkuutaso (n. 85 mill.m³/vuosi,) osoittautui liian korkeaksi FORMIT- , EFISCEN- ja PREBAS-malleille. MONSU-mallissa toteutetussa laskennassa ei mukana ollut energiapuun korjuuta lainkaan, mikä selittää n. 10 milj.m³/vuosi pienemmän hakkuukertymän. Tämä tarkoittaa myös, että mallin ennustamat todelliset hakkuumahdollisuudet eivät tulleet testatuksi Suurin kestävä -skenaariossa. Tästä huolimatta hakkuukertymä MONSUssa laski Suurin kestävä -skenaarion jaksolla 2055-2065 voimakkaasti. EFISCENissä päätehakkuut pienenevät voimakkaasti Poliitikka-skenaariossa kaudella 2036-2045, kun taas mallin mukaan harvennushakkuuta ei pystytty toteuttamaan lainkaan Suurin kestävä-skenaariossa kaudella 2031-2035. Ainoastaan MELA-mallissa hakkuuden jakautumisen optimointi maan sisällä tapahtuu mallin sisällä. Muissa malleissa tällaisen optimoinnin puuttuminen, tai hakkuuden tekninen toteuttamistapa muutoin voi aiheuttaa hakkuumahdollisuuksien alueellista aliarviointia verrattuna MELA-mallin ennustamiin hakkuumahdollisuuksiin. Esimerkiksi PREBAS-mallissa Suurin kestävä-skenaariossa muutamalla metsäkeskusalueella ei saavutettu asetettua hakkuutavoitetta laskennan teknisen toteutuksen vuoksi. Harvennushakkuuden vaikutus jäävän puuston kasvuun eroaa todennäköisesti malleissa, mikä osaltaan myös selittää tätä tulosta. Tässä selvityksessä tätä vaikutusta ei eritelty. Myös hakkuutavoitteen/-rajoitteen tyyppi on merkittävä rajoite laskennoissa.



Kuva 3.1 Hakkuuskenaariot, hakkuukertymä, milj.m³/vuosi. MONSU-mallissa toteutetussa laskennassa ei mukana ollut energiapuun korjuuta lainkaan, mikä selittää n. 10 milj.m³/vuosi pienemmän hakkuukertymän.

Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet esim. Monsun kohdalla, että ilman puulajeittaisia tavoitteita puutavaralajeille, on mahdollista saavuttaa 80 milj.m³ hakkuut, nyt tämä ei onnistunut viimeisellä kaudella kun puulajeittaiset puutavaralajit huomioitiin rajoitteena. Tämä vaikuttaa esimerkiksi myös puuston tilavuuden kehitykseen skenaarioissa. Osalla malleista tavoitellaan vain kokonaiskertymää (EFDM, EFISCEN, FORMIT, PREBAS), mikä antaa lisämahdollisuuksia hakkuiden toteuttamiseen alueellisesti. EFISCEN käytti Suurin kestävä -skenaariossa kunkin alueen kaikki hakkuumahdollisuudet, mutta esimerkiksi PREBAS-mallin hakkuiden toteutus mahdollistaa sen että, joillakin metsäkeskusalueilla osa hakkuumahdollisuuksista jää käyttämättä, vaikka toisissa metsäkeskuksissa hakkuutavoite saavutettaisiinkin. MONSU-mallin laskelmat tehtiin tässä tutkimuksessa yhdelle suuralueelle kerrallaan, mikä johti suureen määrään laskentayksiköitä (VMI koealat). Tästä syystä käsittelyvaihtoehtojen määrää koealoittain jouduttiin jonkin verran rajoittamaan, mikä osaltaan saattaa vaikuttaa hakkuupotentiaalin aliarviointiin.

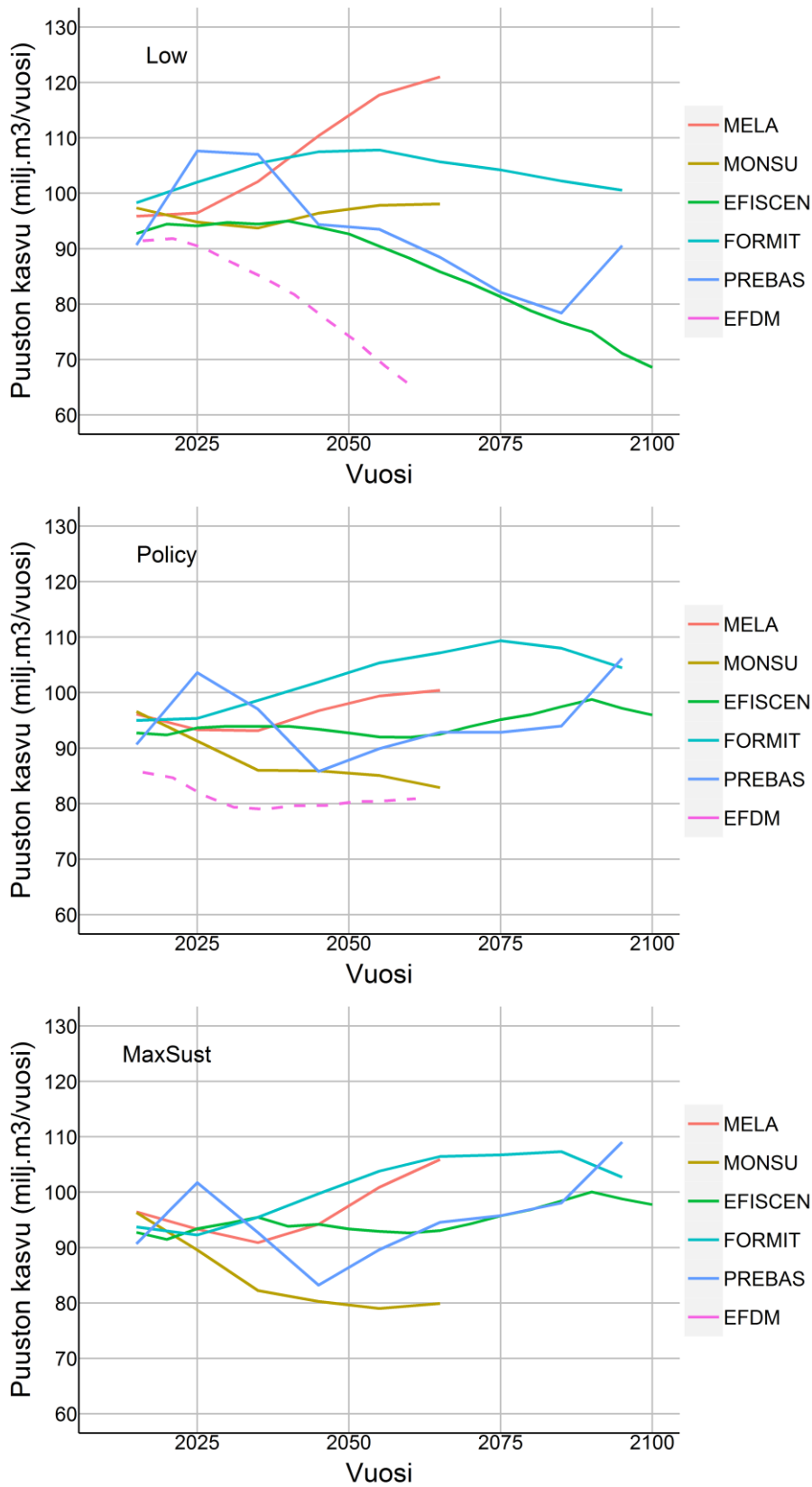
MELA-ennusteen päättyessä 2055 puuston tilavuus oli suuremmillaan, mikä viittaa hakkuumahdollisuuksien todennäköisesti olevan lähellä edellisen jakson tasoa. Aukottomasti MELA-mallin hakkuumahdollisuuksia pitemmälle kuin vuoteen 2055 ei ole tämän analyysin pohjalta mahdollista todentaa.

MELAssa on 100 % saanto ainespuukokoisen puun hakkuukertymässä. Ainespuun minimimittoja pienempi rungon osa jäi näissä tämän selvityksen skenaarioissa MELAssa hakkuutähteenä metsään. Tämä tarkoitti mm. Poliittika-skenaariossa, että 54 vuoden jaksolla hakkuutähteenä jäi metsään keskimäärin 4,9 % suhteessa hakkuukertymään. Myös MONSU-mallissa simuloinneissa jäi runkopuusta n. 5% hakkuutähteenä metsään. Toisaalta esimerkiksi PREBAS-mallissa jätettiin korjuun yhteydessä 10% runkopuusta metsään hakkuutähteinä, mikä osaltaan selittää eroa tuloksissa.

3.2 Puuston kehitys

Kokonaisuutena voidaan todeta, että mallien kasvuennusteet poikkeavat toisistaan merkittävästi (Kuva 3.2). Suurin ero mallien välillä oli nähtävissä Matala-skenaariossa, jossa MELA ennusti kasvun kiihtyvän voimakkaasti laskennan alkutasosta, kun taas EFISCEN- ja PREBAS-malleissa kasvu pieneni voimakkaasti kuluvan vuosisadan aikana matalasta hakkuutasosta johtuen. Kasvun hidastuminen EFISCEN- ja PREBAS-mallien Matala-skenaariossa voi olla osin seurausta siitä, ettei hakkuiden kohteena olevia leimikoita ole valittu kasvun ylläpitämisen näkökulmasta optimaalisesti kuten MELA-mallissa.

MELA-mallin kiihtyvä kasvu Matala-skenaariossa, johtuu pääasiassa kuusikoiden kiihtyvästä kasvusta. On mahdollista, että nykyinen kasvumalli yliarvioi varttuneiden kuusikon kasvua ja aliarvioi kuolleisuutta metsikön tiheyden kasvaessa.



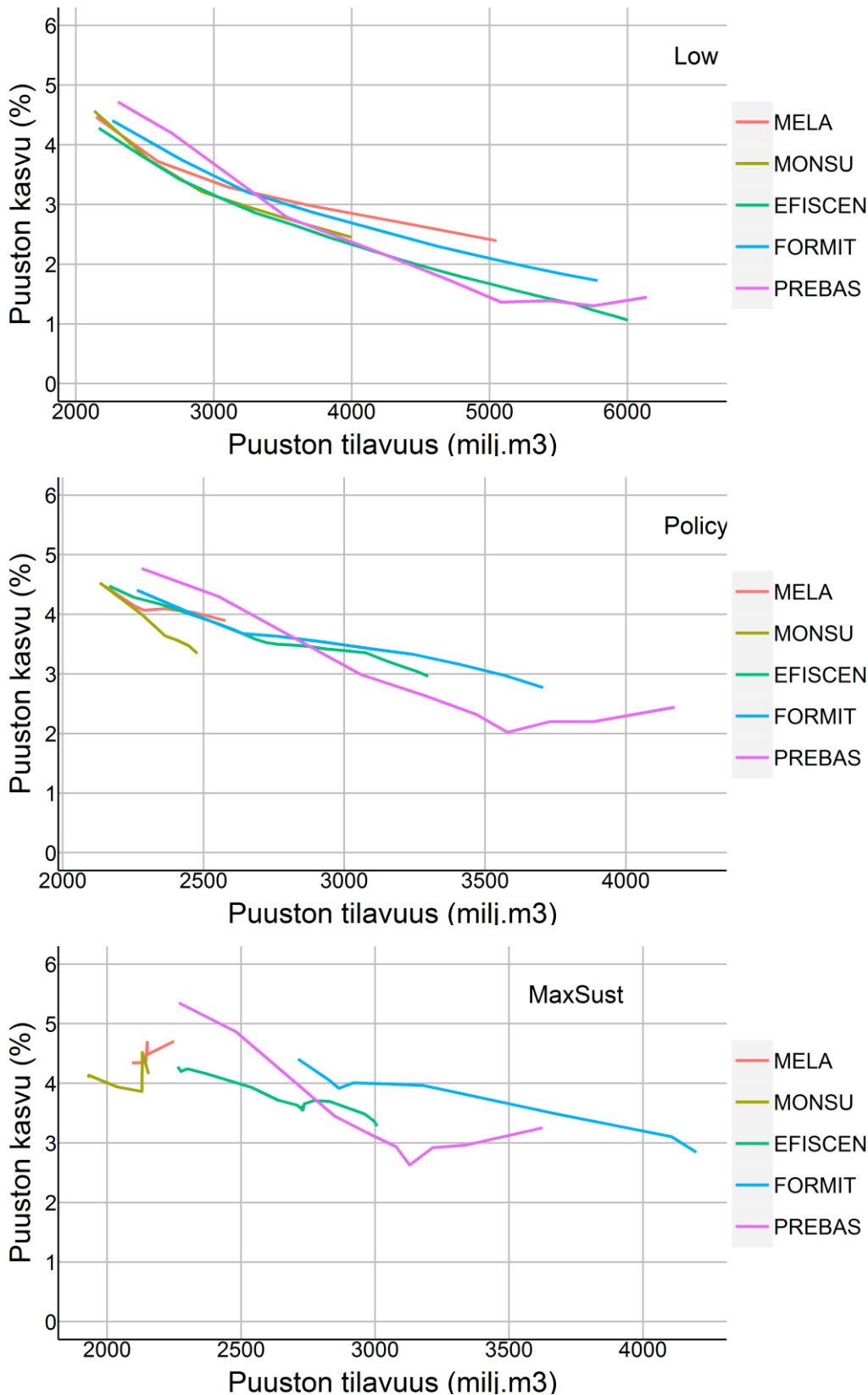
Kuva 3.2 Runkopuun kasvu (milj. m³/vuosi) puuntuotannon metsämaalla (18,4 milj.ha). Muista malleista poiketen EFDM-mallin ennuste kuvaa metsien nettokasvua (bruttokasvu – luonnonpoistuma). EFDM-mallilla ei tuotettu Suurin kestävä -skenaariota.

PREBAS-mallin kasvuennusteen dynamiikka poikkesi muista malleista. Suurin selittävä tekijä on, että vuotuinen säävaihtelu vaikuttaa kasvuennusteisiin. Simulointijakson sää oli simulointijakson alussa ja lopussa keskivaihetta suotuisampi kasvulle (Liite 5). Muissa malleissa kasvuennusteet perustuvat kasvun kalibrointiin historialliseen kasvuun, kasvuennusteen olevan esimerkiksi 5 vuoden tasoitettu kasvu, sekä vuotuisen säävaihtelun vaikutuksen puuttumiseen. Tämän lisäksi PREBAS sovelsi puuston lähtötietoina MVMI-karttoja, joissa metsää kuvaavien muuttujien jakauma on kaventunut verrattuna VMI-koealatietoihin. Tämä saattaa vaikuttaa ikäluokkarakenteen kuvautumiseen ja siten hakkuu- ja kasvuennusteisiin.

EFDM-mallin Matala-skenaarion voimakas kasvun lasku johtuu jossain määrin mallinnusteknisistä seikoista (hakkuiden vähäisyydestä parametrien laskentadataan (VMI10-11) verrattuna). Poliitiikka-skenaariossa kasvu pysyi melko lailla samalla tasolla, mitä voidaan pitää realistisempänä. Tämä ilmentää kyseisen mallin rajoitteita ja muokkaustarpeita.

EFISCEN-, FORMIT- ja MONSU-malleissa kasvuennusteet poikkesivat vain vähän Poliitiikka ja Suurin kestävä -skenaarioissa, kun taas MELA-malli ennusti Suurin kestävä -skenaariossa selvästi suurempaa kasvua jaksolle 2055-2064 kuin Poliitiikka-skenaariossa. Tämän MELA-mallin tuloksen tulkittiin kertovan metsien ikäluokkarakenteesta; Etelä-Suomen uudet puustot saavuttavat kyseisellä jaksolla nopeimman kasvuvaiheen. Tätä eroa mallien välillä selittää osaltaan mallien ero harvennusvasteessa, eli siinä kuinka paljon metsikön jäävien puiden kasvu kiihtyy harvennushakkuun jälkeen. MONSU ennusti ainoana mallina sekä Poliitiikka- että Suurin kestävä -skenaarioissa kasvun laskevan koko laskentakauden aikana (2015-2065). FORMIT-mallissa kasvu nousi laskentajakson alkutilanteesta voimakkaasti 2050 mennessä, jonka jälkeen kasvu tasaantui ja laski jaksolla 2090-2100. MONSU-mallin kasvuennusteiden osalta on syytä pitää mielessä, että siinä toteutut hakkuut olivat Poliitiikka ja Suurin kestävä -skenaarioissa n. 10 milj.m³ muita malleja alemmalla tasolla.

Kasvuprosentti laski kaikkien mallien kaikissa skenaarioissa puuston tilavuuden kasvaessa (Kuva 3.3). Tämä kuva selittää osin kasvun hiipumista Matala-skenaariossa. Suurin kestävä -skenaariossa kasvuprosentti vaihteli äkillisesti, mikä osoittaa epäjatkuvuuksia mallien ennusteissa kun hakkuutaso lähestyy kasvua. EFISCEN- mallissa metsikön harvennus kiihdyttää kasvua, mikä osittain selittää epäjatkuvuuksia. PREBAS-mallissa tilavuus-kasvu –riippuvuuteen vaikuttaa myös sää, joka oli simulointijakson lopussa suotuisa kasvulle (Kuva 2.1), jolloin myös korkeimmat tilavuudet saavutettiin.

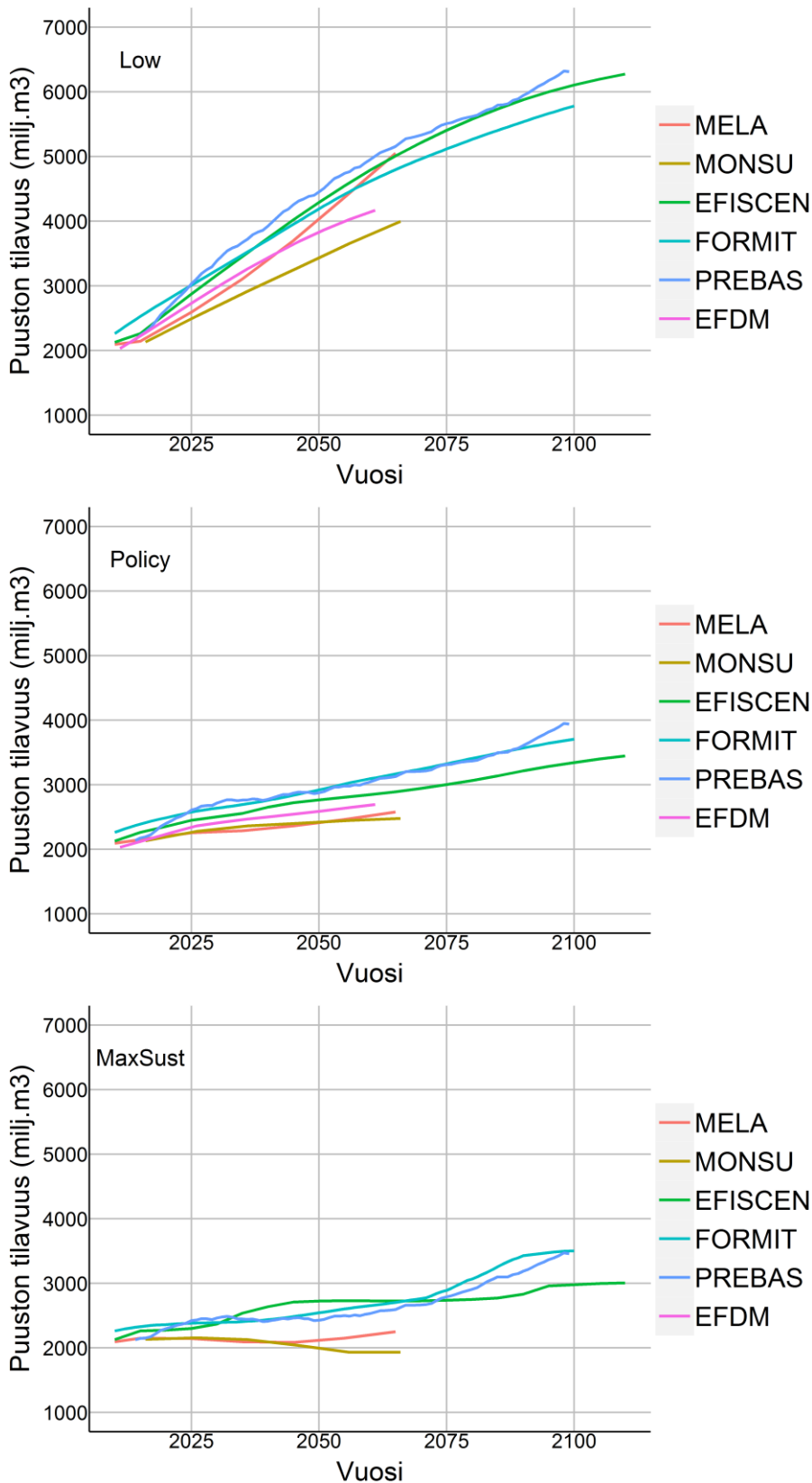


Kuva 3.3 Kasvu% puuston tilavuuden suhteen puuntuotannon metsämaalla.

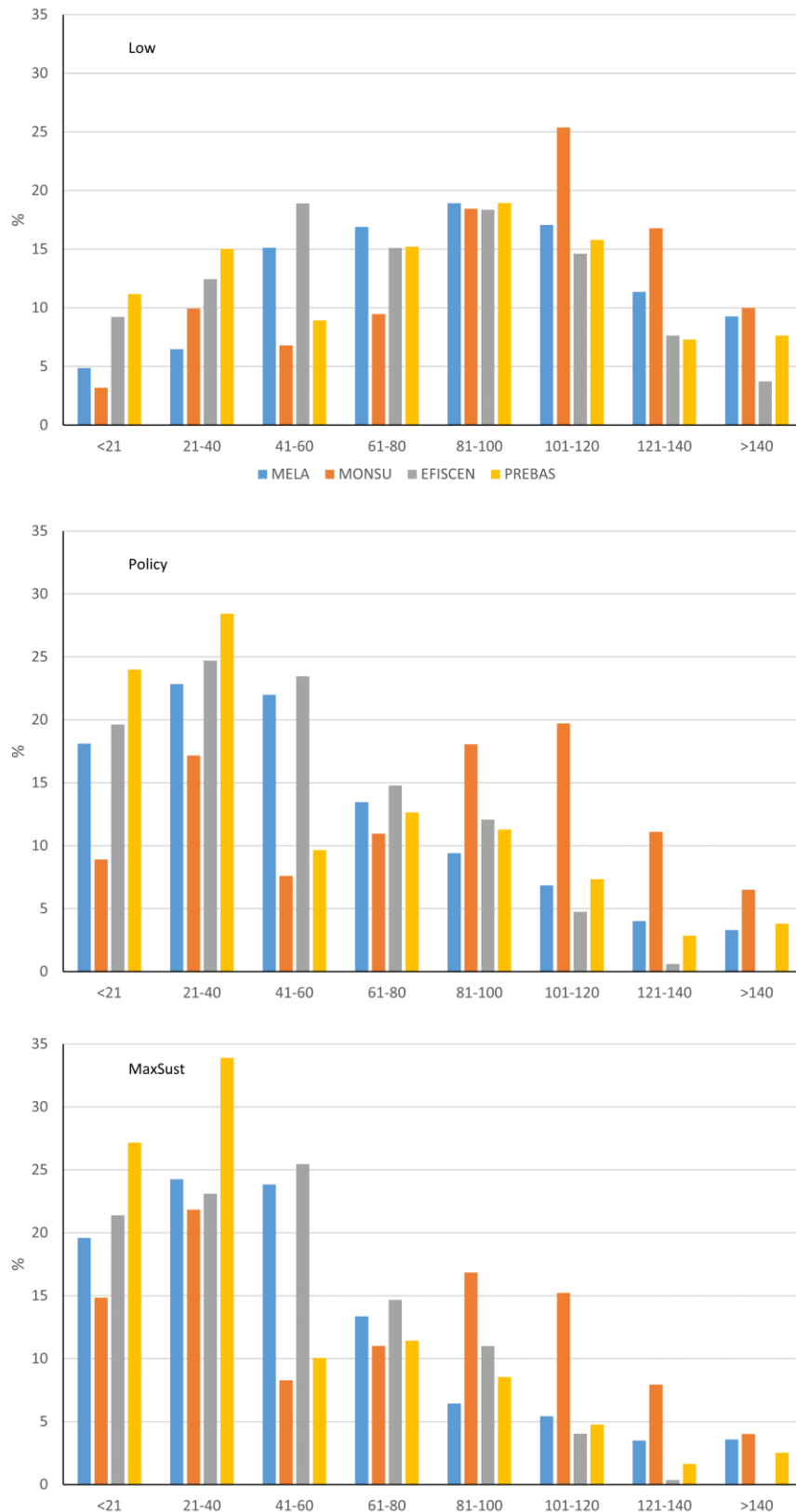
Puuston tilavuus nousi 40 milj.m³ vuosi⁻¹ hakkuilla suurimmillaan melkein 7000 milj.m³ nykyisestä n. 2300 milj.m³:stä vuoteen 2100 mennessä (Kuva 3.4). EFISCEN-, FORMIT- ja PREBAS-mallien

kehitys puuston tilavuuden suhteen oli tässä skenaariossa hyvin lähellä toisiaan. MONSUn puuston tilavuuskasvu oli selvästi muita malleja matalampaa. MELAn puuston tilavuuden kehitys oli Matala-skenaariossa kiihtyvää, mutta muita malleja lyhyemmän ennusteen vuoksi vuosisadan jälkipuoliskon kehityksen vertaaminen ei ollut mahdollista. Puuston tilavuuden kasvu hyvin suurin lukuihin Matala-skenaariossa heijastelee mallien ongelmia puiden kuolleisuuden mallintamisessa. PREBAS-mallin Matala-skenaariossa kasvun pieneminen ja kuolleisuun lisääntyminen aiheutti kuitenkin puuston tilavuuden jäämisen n. 1000 milj.m³ pienemmäksi kuin jos kasvu ja kuolleisuus olisivat olleet samaa tasoa kuin Politiikka-skenaariossa (Liite 5, kuva liite5.2). Näissä skenaarioissa ei ole mukana muutoksia tuhoissa, joiden voisi olettaa lisääntyvän puuston biomassan voimakkaasti lisääntyessä. Politiikka ja Suurin kestävä -skenaarioissa ennusteet puuston tilavuuden kehityksestä poikkesivat kunkin mallin sisällä varsin vähän, mikä osoittaa Politiikka-skenaarion olevan hakkuutasoltaan lähellä Suurinta kestävä - skenaariota. FORMIT-malli ennusti Suurin kestävä -skenaariossa puuston tilavuuden kääntyvän voimakkaaseen kasvuun 2060 jälkeen johtuen hakkuutason voimakkaasta pienenemisestä. MONSU-mallissa puuston tilavuus laski Suurin kestävä -skenaariossa simuloinnin alkuarvosta n. 200 milj.m³ vuoteen 2065 mennessä.

Kasvun kehitykseen malleissa vaikuttaa erityisesti metsien ikärakenne alkutilanteessa (VMI11 keski-ikä n. 50 vuotta). Puuntuotannon metsämaalla metsien keski-ikä kasvaa Matala-skenaariossa alkutilanteen MELA- mallissa 55 vuodesta 86 vuoteen 2065 mennessä, säilyy 55 vuodessa Politiikka-skenaariossa, ja laskee 52 vuoteen Suurin kestävä-skenaariossa. Muutokset metsien ikärakenteessa eri skenaarioissa näkyvät hyvin metsien ikäluokkajakaumassa (Kuva 3.5). MONSU-mallissa vanhemmat ikäluokkajakaumat painottuivat muita malleja enemmän kaikissa skenaarioissa. MONSU-mallissa metsien keski-ikä oli jo alkutilanteessa 73 vuotta. PREBAS-mallissa Politiikka- ja Suurin kestävä -skenaarioissa nuorimpien ikäluokkien osuus nousi muita malleja suuremmaksi (keski-ikä 52 ja 45 vuotta). Mallien oletukset siitä, mitkä metsät valikoidaan päätehakkuisiin vaikuttavat tulokseen. Esimerkiksi MONSU-mallissa päätehakkuisiin vaikutti ainoastaan läpimitta, kun taas MELA-mallissa päätehakkuit määräytyivät läpimitan lisäksi metsikön iän perusteella. PREBAS-mallin lähtötietoina käyttämä MVMI-aineistossa ikäluokkajakauma kaventuu hieman verrattuna perinteiseen VMI -koealamittauksin tuotettuun aineistoon. Ikäluokkajakaumien erot selittävät osaltaan mallien erilaisia kasvuennusteita.



Kuva 3.4 Puuston tilavuuden kehitys eri skenaarioissa puuntuotannon metsämaalla. EFDM-mallilla ei tuotettu Suurin kestävä -skenaariota.



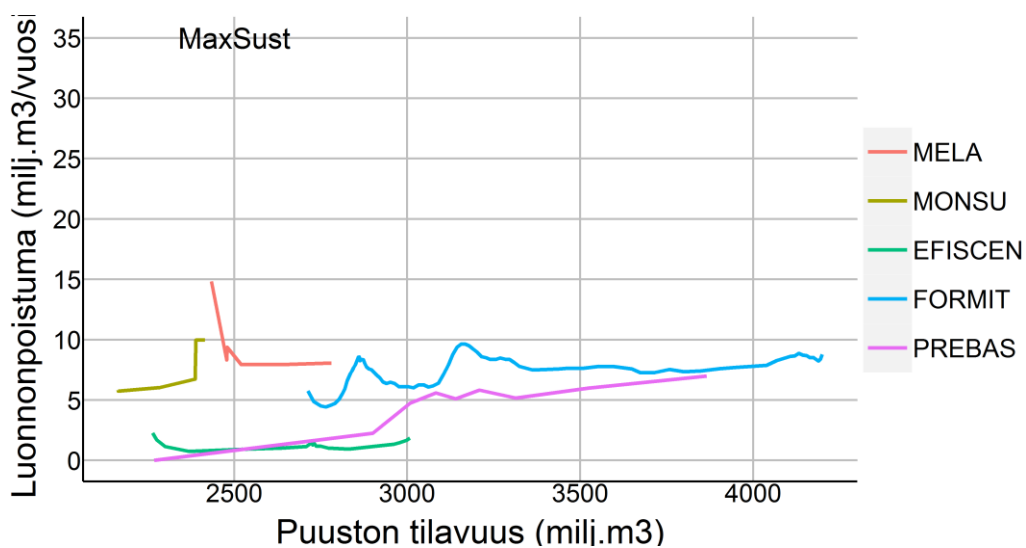
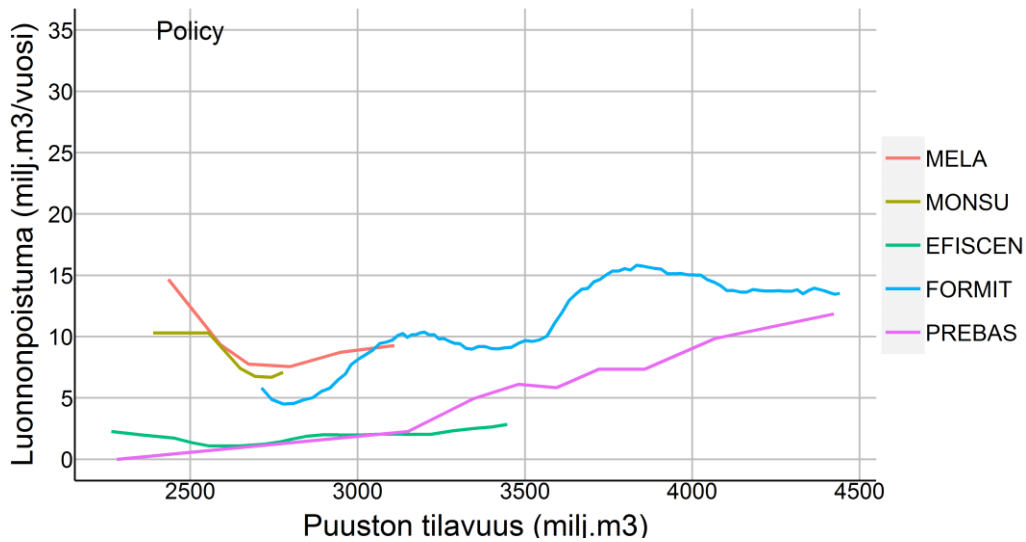
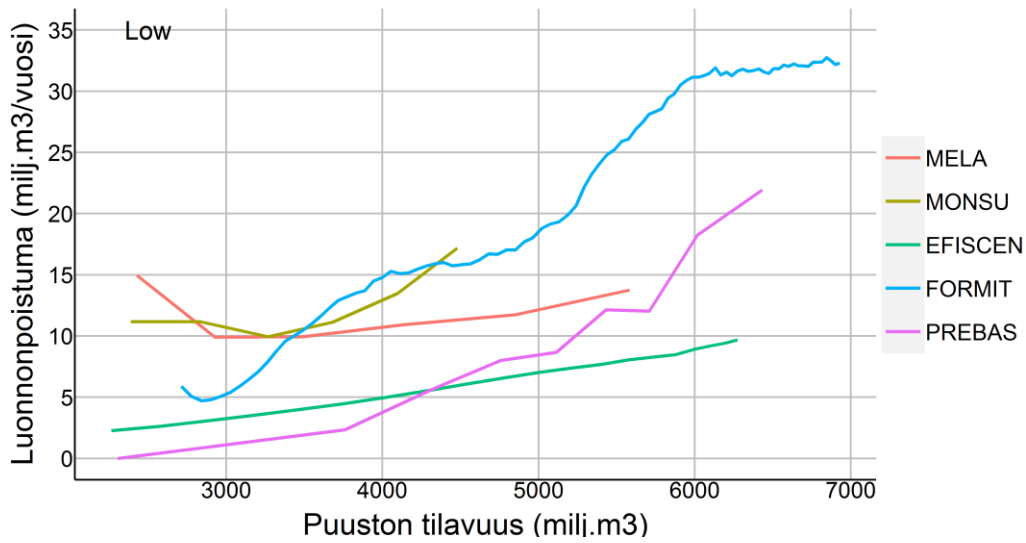
Kuva 3.5 Eri mallien metsiköiden suhteelliset ikäluokajakautat eri hakkuuskenaarioissa vuonna 2055.

Mitattu luonnonpoistuma on $6,5 \text{ milj.m}^3 \text{ vuosi}^{-1}$ (VMI11, Korhonen ym. 2017). Mallit poikkesivat ennusteissaan merkittävästi sekä luonnonpoistuman lähtötasossa että luonnonpoistuman kehityksessä eri skenaarioissa (Kuva 3.6). MELA luontaisen poistuman kehityksessä kiinnittää huomiota kaikissa skenaarioissa tapahtuva voimakas luontaisen poistuman aleneminen puuston tilavuuden alkaessa lisääntyä nykyisestä. Kyse on osin seurausta MELA-mallin rakenteesta, jossa ajojärjestyksessä luontaiset prosessit, kuten kuolleisuus, lasketaan ennen ihmistoimia (esim. hakkuut). MELA kuitenkin yliarvioi laskennan alkutilanteessa luontaisen poistuman määrän selvästi verrattaessa VMI:ssä mitattuun poistumaan. Voidaankin kysyä yliarvioiko MELA luontaisen poistuman erityisesti nuorissa metsissä, koska hakkuutason nosto ei näytä juurikaan vaikuttavan luontaisen poistuman dynamiikkaan. Erityisesti nuorissa kuusikoissa kuolleisuus on MELA-mallissa suurta. Asiaan on tulossa parannus, koska MELA on siirtymässä varhaiskehityksen simuloinnissa metsikkömalleihin. Sen sijaan kuolleisuus aliarvoidaan varttuneissa kuusikoissa, joissa on korkea metsikön pohjapinta-ala (pers.comm. Olli Salminen).

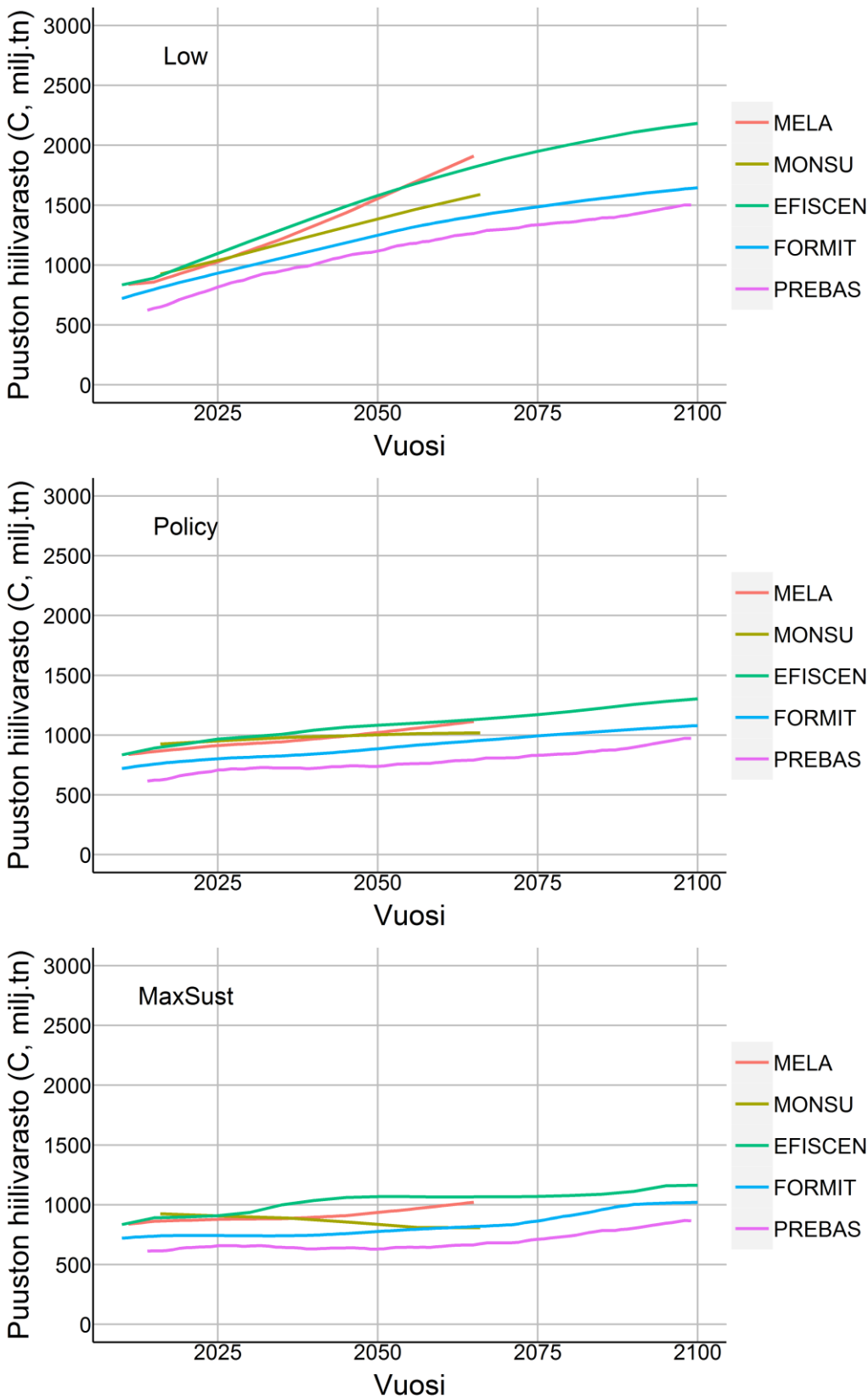
EFISCEN- ja PREBAS-mallit aliarvioivat luontaisen poistuman määrän alkutilanteessa verrattuna VMI- mittauksiin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että PREBAS-mallin lähtömateriaalissa (MVMI-kartat) tiheimmät ja vanhimmat metsät ovat aliedustettuina, ja siitä, että PREBAS ennustaa pientä kuolleisuutta pienillä tilavuuksilla. PREBAS-mallissa luontainen poistuma kasvaa voimakkaasti Matala-skenaariossa ja myös Poliitiikka ja Suurin kestävä -skenaarioissa luontainen poistuma lähestyy MELAn ennustamaa suuruusluokkaa. EFISCEN-mallissa luontainen poistuma säilyy Poliitiikka ja Suurin kestävä -skenaarioissa varsin pienenä koko laskentajakson ajan. VMI:n luonnonpoistumassa voi myös olla systemaattista aliarvioita, mm. koska tuhoissa vaurioituneita puita siirtyy hakkuukertymään.

3.3 Hiilivaraston ja hiilinielun kehitys

Metsikön hiilivarasto kehittyi kaikissa malleissa Matala-skenaariossa selvästi suurimmaksi ja hiilivaraston kasvu osoitti vain lievää tasaantumista vuosisadan loppupuoliskolla (Kuva 3.7). Muista malleista poiketen MELA ennusti Matala-skenaariossa kiihtyvää hiilivaraston kasvua vielä jaksolla 2050-2060. Poliitiikka-skenaariossa mallien ennusteet hiilivaraston kehityksestä olivat varsin yhtenäisiä, ehkä lukuunottamatta PREBAS-mallin ennustamaa varaston kasvun kiihtymistä jaksolla 2090-2100, mikä liittyyne simuloinnissa käytetyn sään suotuisaan vaikutukseen. Suurin kestävä -skenaariossa MONSU ennusti ainoana mallina hiilivaraston pienenemistä. EFISCEN- ja FORMIT-mallien äkilliset hiilivaraston kasvut tietyillä jaksoilla johtuivat hakkuutason äkillisestä laskusta hakkuumahdollisuuksien puuttuessa.



Kuva 3.6 Luontaisen poistuman ja puuston tilavuuden suhde eri hakkuuskenaarioissa metsä- ja kitumaan alaa vastaavalla pinta-alalla.



Kuva 3.7 Puuston hiilivaraston kehitys (milj.tn C) metsä- ja kitumaan alaa vastaavalla pinta-alalla.

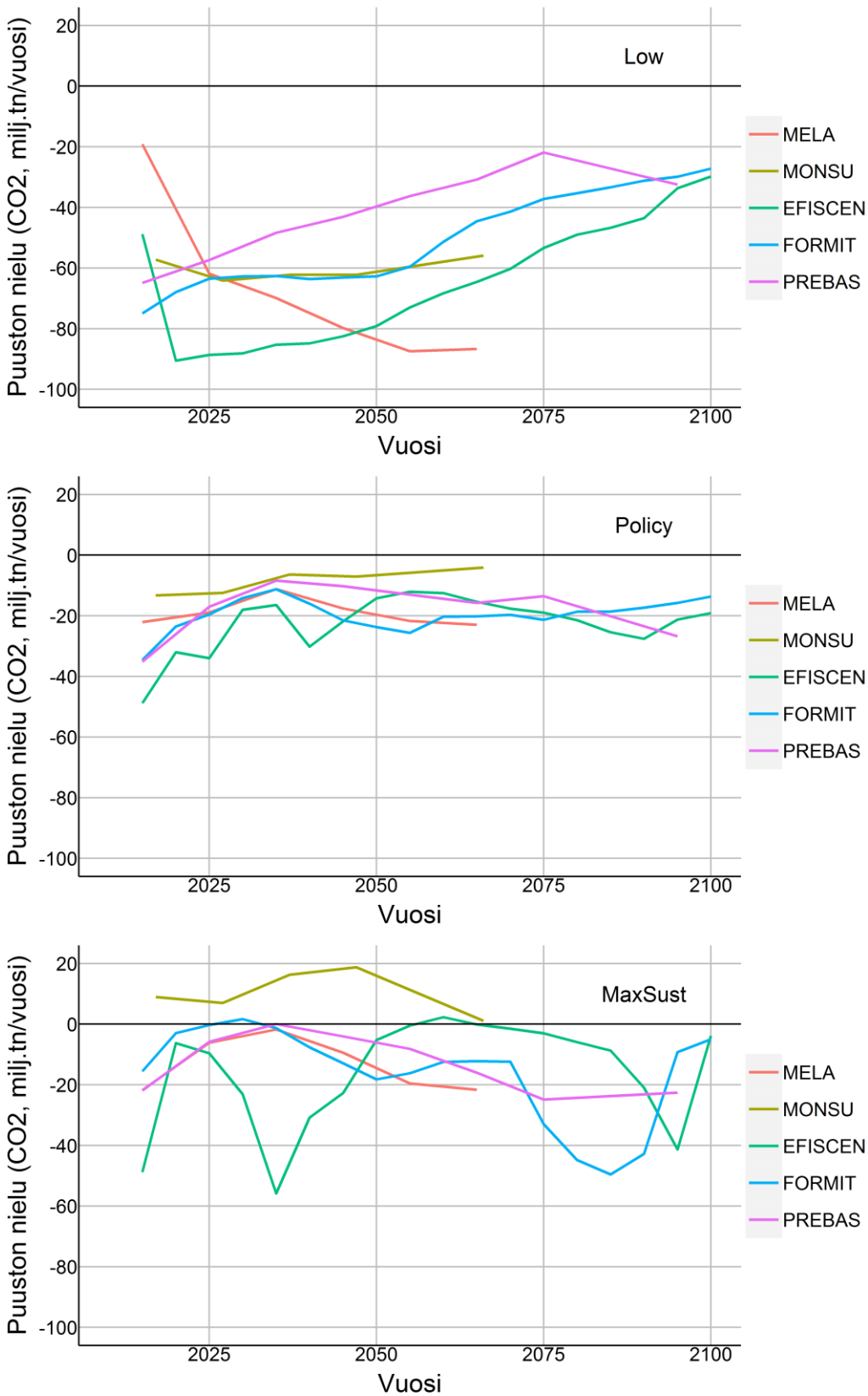
Hiilivaraston kehityksen mukaisesti metsien puuston hiilinielu oli voimakkain Matala-skenaariossa kaikissa malleissa (Kuva 3.8, Taulukko 3.1). Vaikka hiilivaraston kehityslinjat poikkesivat malleissa vain hieman, niin vuotuista hiilinielua tarkasteltaessa mallien väliset erot muodostuivat merkittäviksi. Alkutilanteen tasoerot selittyvät osin poikkeavista hakkuuskenaarioiden toteutuksesta. EFISCEN-, FORMIT- ja PREBAS-malli ennustivat samankaltaista puuston hiilinielun dynamiikkaa Matala-skenaariossa; alkutilanteen hyvin voimakas nielu alkoi pienetä voimakkaasti jaksolla 2045-2055 ja nielun pieneminen jatkui näissä malleissa lähes lineaarisesti vuosisadan jälkipuoliskolla. MELA-mallissa puuston hiilinielu kasvoi Matala-skenaariossa voimakkaasti vuoteen 2050 asti, jonka jälkeen nielu tasaantui tasolle 86-87 milj.tn CO₂ vuosi⁻¹. MELA ennuste päättyi vuoteen 2065, joten vuosisadan jälkipuoliskon kehityksen arvioiminen ei ollut mahdollista. MONSU ennusti Matala-skenaariossa hyvin vakaata puuston hiilinielua, MONSU-ennuste ei tosin sisällä ensimmäistä kymmenvuotisjaksoa. Poliitiikka-skenaariossa mallit olivat lähimpänä toisiaan, mikä herättää kysymyksen mallien kalibroinnista; ohjaako data liian voimakkaasti näiden mallien ennusteita? Suurin kestävä -skenaariossa MONSU ennusti puuston muuttuvan hiilen lähteeksi, kun taas EFISCEN- ja FORMIT-malleissa puuston nielun suuri vaihtelu selittyy hakkutason vaihtelulla. FORMIT- ja MELA-mallien puuston nielun kehitys olivat lähellä toisiaan Suurin kestävä -skenaariossa. Erot mallien harvennusvasteessa vaikuttavat myös siihen, kuinka nopeasti hiilinielu palautuu hakkuun jälkeen takaisin alkuperäiselle tasolle. Osa mallien välisistä eroista johtuu biomassan arviointimenetelmien eroista.

Taulukko 3.1 Mallin ennustama keskimääräinen nielu tai lähde (milj.tn CO₂ vuosi⁻¹) eri skenaarioissa kaudella 2015-2065.

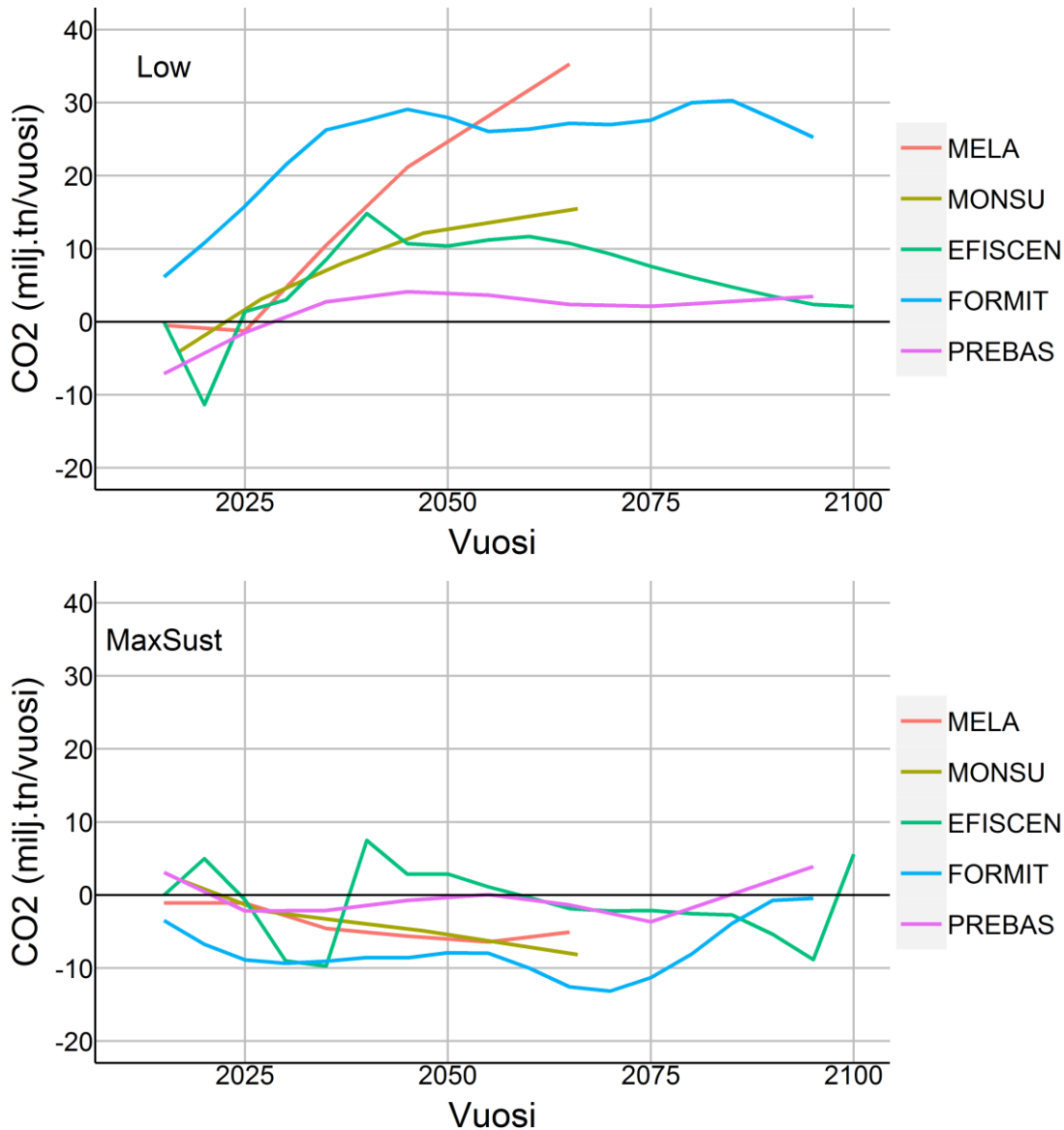
| Malli | Matala | | Poliitiikka | | Suurin kestävä | |
|----------------|--------|---------|-------------|---------|----------------|---------|
| | Puusto | Maaperä | Puusto | Maaperä | Puusto | Maaperä |
| EFISCEN | -65,6 | -13,2 | -19,6 | -6,7 | -15,4 | -6,5 |
| FORMIT | -59,7 | -45,3 | -20,3 | -23,0 | -8,7 | -14,5 |
| MELA | -67,5 | -19,2 | -19,0 | -3,6 | -13,4 | 0,3 |
| MONSU | -48,8 | -9,7 | -7,0 | -2,8 | 8,4 | 0,6 |
| PREBAS | -41,7 | -0,6 | -14,8 | 0,1 | -8,3 | 0,7 |

Kaikissa malleissa maaperän hiilen kehitystä mallinnetaan joko Yasso07- tai Yasso15-mallilla. Näin ollen erot maaperän nielussa mallien välillä johtuvat eroista karikesyötöissä, sekä Yasson parametrisoinnin eroista eri malleissa. Maaperän hiilivaraston ennustamisessa epävarmuus on erittäin suuri ja mallinusanalyysi on erittäin herkkä maaperän alkutilanteen alustamiselle ja sen

yksityiskohtaiselle toteutukselle. Tämän vuoksi tulokset (kuva 3.9) esitetään kussakin mallissa suhteessa kunkin mallin Poliitikka-skenaarion ennusteeseen.



Kuva 3.8 Puuston nielu (milj.tn CO₂ vuosi⁻¹) metsä- ja kitumaan alaa vastaavalla pinta-alalla.

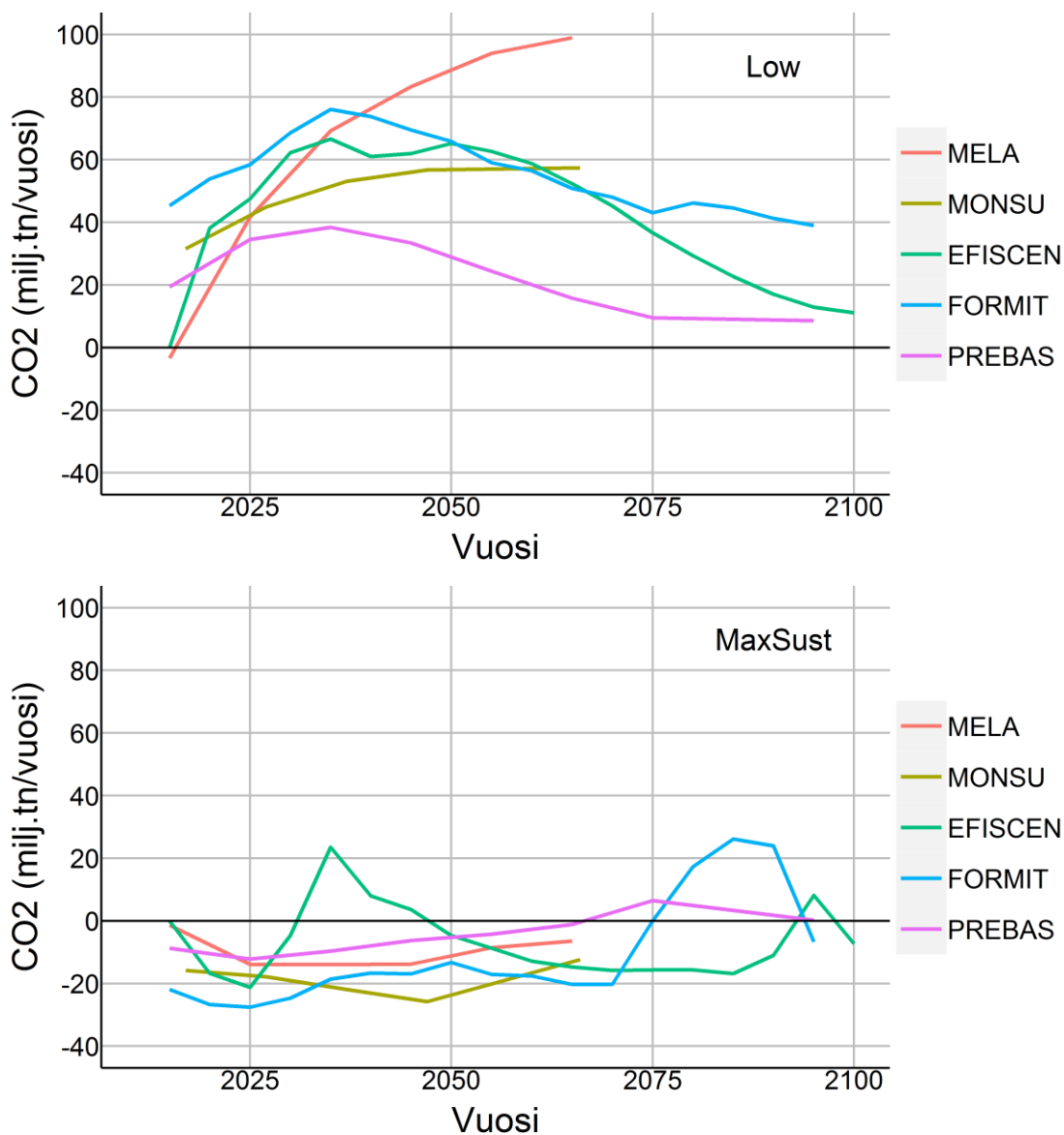


Kuva 3.9. Maaperän nielu (milj.tn CO₂/vuosi) Matala ja Suurin kestävä-skenaarioissa suhteessa Politiikka-skenaarioon metsä- ja kitumaan alaa vastaavalla pinta-alalla. Luvut on saatu vähentämällä Politiikka-skenaarioiden maaperän nielusta muiden skenaarioiden nielut, ja siten positiiviset arvot kuvaavat lisänielua, joka kyseisellä skenaariolla saataisiin verrattuna Politiikka-skenaarioon.

Kaikki mallit ennustivat maaperän hiilinielun olevan suurempi Matala- kuin Politiikka-skenaariossa. FORMIT-mallin alun suuremp ennuste johtuu hakkuiden alkamisesta matalammalla tasolla jo ennen kuvan tarkastelujaksoa. MELA ennusti hyvin voimakasta maaperän nielun kasvua Matala-skenaariossa suhteessa Politiikka-skenaarioon koko simulointikauden aikana vuoteen 2065 saakka. Muissa malleissa sen sijaan oli nähtävissä

selvä nielujen välisten erojen tasoittuminen jo paljon aiemmin. Suurin kestävä -skenaariossa EFISCEN-mallin ennuste vaihteli voimakkaasti hakkuiden tason vaihtelun seurauksena, kun taas PREBAS-mallin ennusteissa ei ollut juurikaan eroa Poliitikka- ja Suurin kestävä -skenaarioiden välillä. FORMIT, MELA ja MONSU ennustivat maaperän nielun olevan pienempi Suurin kestävä-skenaariossa kuin Poliitikka-skenaariossa.

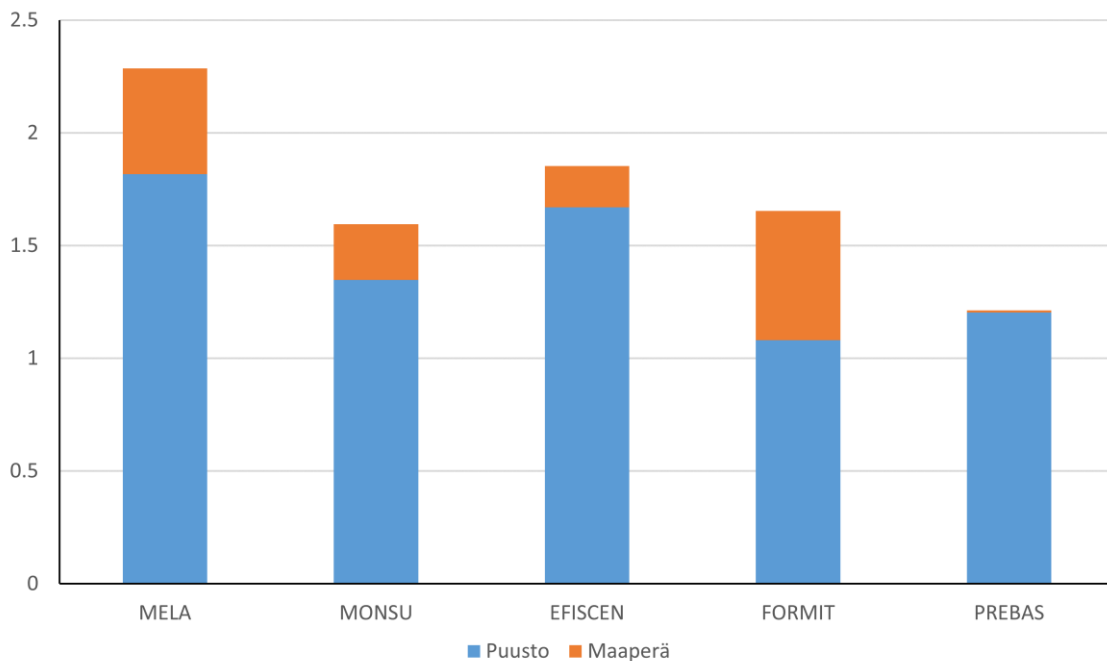
Mallien väliseen eroon puuston hiilinielussa vaikuttaa erilaiset lähtöoletukset. Tämän poistamiseksi tulokset esitetään myös kussakin mallissa suhteessa kunkin mallin Poliitikka-skenaarion ennusteeseen (kuva 3.10).



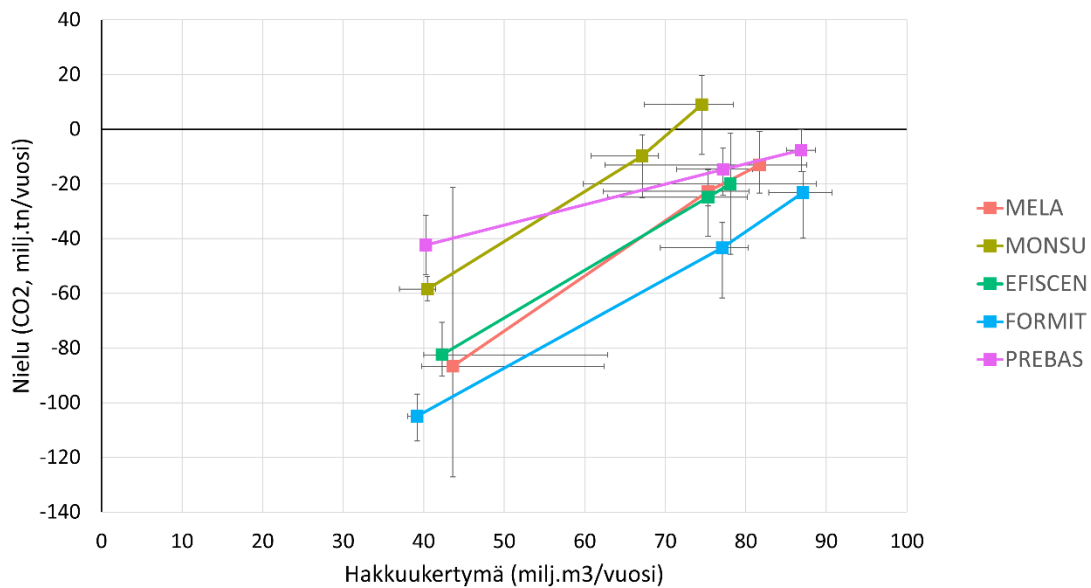
Kuva 3.10 Metsän kokonaisnielu (puusto + maaperä, milj.tn CO₂/vuosi) Matala ja Suurin kestävä-skenaarioissa suhteessa Poliitikka-skenaarioon. Luvut on saatu vähentämällä

Politiikka-skenaarion nielusta muiden skenaarioiden nielut, ja siten positiiviset arvot kuvaavat lisänielua, joka kyseisellä skenaariolla saataisiin verrattuna Politiikka-skenaarioon.

Hakkuiden ja nielun suhdeluku mahdollistaa korjuiden ilmastovaikutuksen arvioimisen sekä mallien vertaamisen tehokkaassa muodossa. Analyysissa verrattiin Politiikka- ja Matala-skenaarioiden välistä eroa ennustetussa puuston ja maaperän hiilivarastossa vuoteen 2055 mennessä suhteutettuna skenaarioiden väliseen eroon laskentakauden aikaisessa hiileksi muunnetussa kumulatiivisessa hakkuukertymässä. Mallien välillä keskiarvoiset luvut vaihtelivat välillä 1,21 – 2,29 tn CO₂/ tn CO₂ (Kuva 3.11). PREBAS ennusti hakkuille pienintä nieluvaikutusta, MELA suurinta. Hakkuukertymän vaikutusta nieluun tarkasteltiin myös laskemalla keskimääräiset puuston ja maaperän nielut, sekä hakkuukertymät kaikissa skenaarioissa vuoteen 2055 mennessä (Kuva 3.12). Vaste muuttuu ajan yli riippuen mm. siitä, millaista kasvuresponssia mallit kuvaavat kun hakkuutasoa muutetaan.



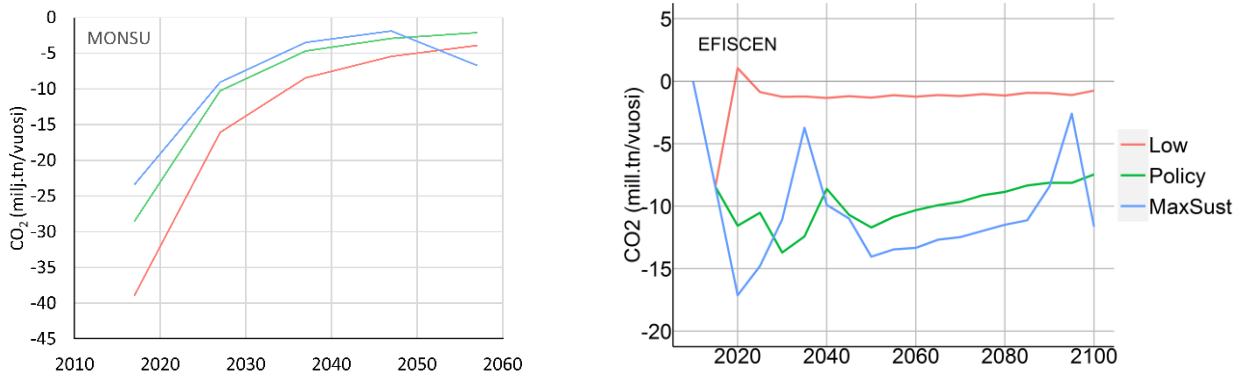
Kuva 3.11 Nielun ja hakkuiden suhde eri malleissa Matala- ja Politiikka-skenaarioiden välisenä erotuksena vuoteen 2055 ulottuvalla aikajänteellä. Y-akseli kuvaa kuinka paljon nielu laskee yhtä hakkuuyksikköä kohti jaksolla 2010-2055. Jos y-akselin arvo on esimerkiksi 2, niin hakkuilla, jotka vastaavat 1 tnCO₂ runkopuun hakkuukertymää, menetetään jaksolla 2010-2055 metsänielua 2 tnCO₂.



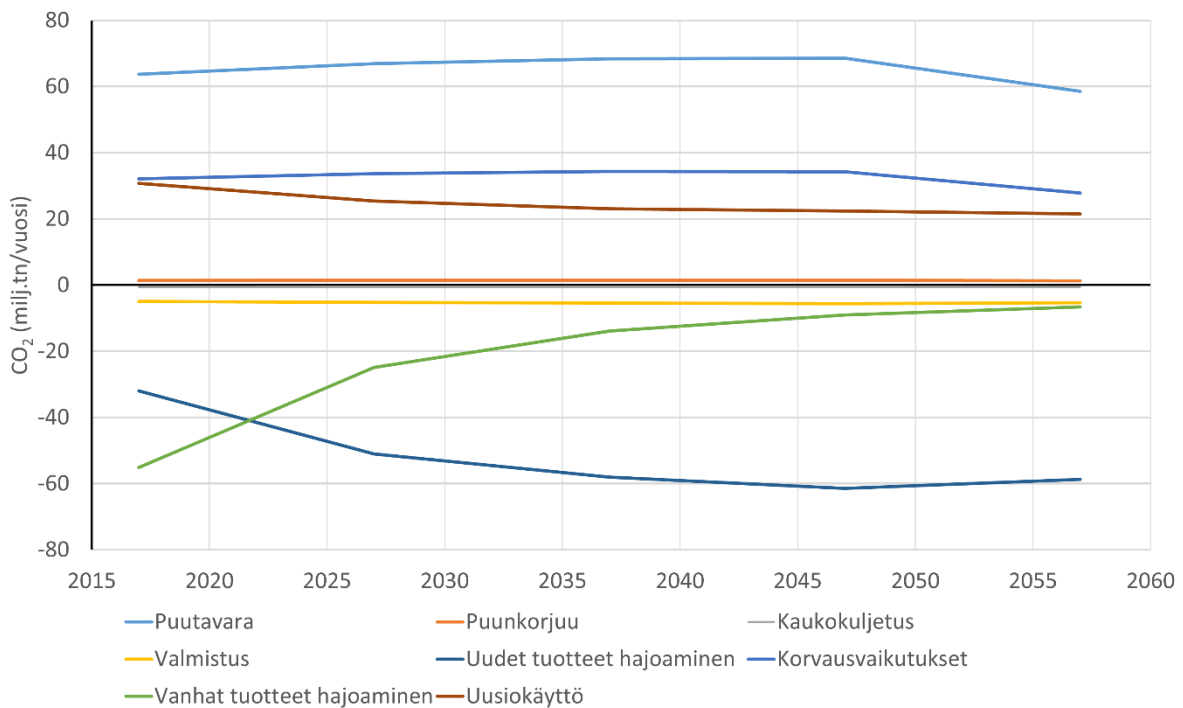
Kuva 3.12 Hakkuukertymän (milj.m³/vuosi) ja nielun (puusto + maaperä) välinen suhde eri malleissa vuoteen 2055 mennessä. Kuvan hajontapylväät eivät kerro mallin epävarmuudesta, vaan yksittäisen skenaarion sisällä nielun ja hakkuutason vaihtelusta. Mallit poikkesivat hakkuuskenaarioiden toteuttamisessa (kts. Kuva 3.1), mikä näkyy sekä kunkin mallin keskiarvoissa että hajontakuvion erilaisuudessa mallien välillä.

3.4 Puutuotteiden nielu ja korvausvaikutukset

Vain MONSU- ja EFISCEN-malleilla tuotettiin harjoituksessa puutuotteiden nielu eli hiilivaraston kasvu (Kuva 3.13). Myöskään näiden mallien suora vertailu ei ollut mahdollista. MONSU-mallissa puutuotteiden alkuvarasto ennustetaan malleilla. Lisäksi MONSU-mallilla ennustettiin puutuotteiden analyysissä puunkorjuusta, tuotteiden valmistuksesta, tuotteiden kierrätyksestä ja korvaushyödyistä syntyvät nettopäästöt (Kuva 3.14). EFISCEN sisältää ainoastaan korjatun puutavaran sisältämän hiilen jakautumisen puutavaralajiositteisiin, sekä näistä valmistettujen tuotteiden hajoamisesta vapautuvan hiilen. Tämän simuloinnin perusteella MONSU -malli yliarvioi puutuotteiden alkuvaraston, koska kaikissa skenaarioissa alkuvaraston sisältämien puutuotteiden hajoaminen aiheutti suuret päästöt. EFISCEN-mallin Matala-skenaariossa puutuotteiden nielu oli lähes nolla, kun taas Poliitiikka- ja Suurin kestävä -skenaarioissa puutuotteiden nielu oli yli -10 Mt CO₂ vuosi⁻¹.



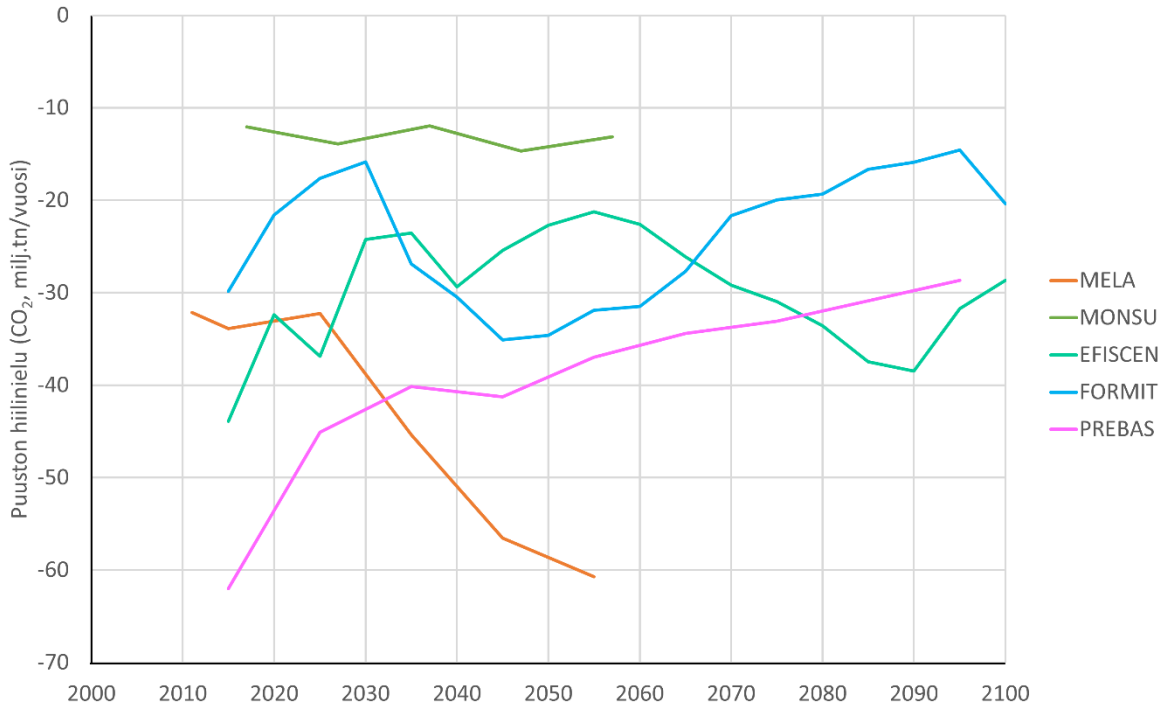
Kuva 3.13 Puutuotteiden hiilinielu eri skenaarioissa MONSU- ja EFISCEN-malleissa. Kuvissa huomioitu myös MONSU-mallissa vain korjatun puutavaran aikaansaama tuotteiden nielu (=hiilivaraston muutos kasvaa).



Kuva 3.14 Puutuotteiden hiilitaseen jakautuminen eri komponentteihin MONSU-mallin Matala-skenaariossa.

3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus

Ilmastonmuutoksen huomioiminen lisäsi kaikissa malleissa metsien kasvua, minkä seurauksena puuston hiilinielu kasvoi (Kuva 3.15). Mallit poikkesivat kuitenkin huomattavasti toisistaan ilmastonmuutoksen tuoman kasvun lisäyksen ja sen aiheuttaman puuston hiilinielun voimistumisessa.



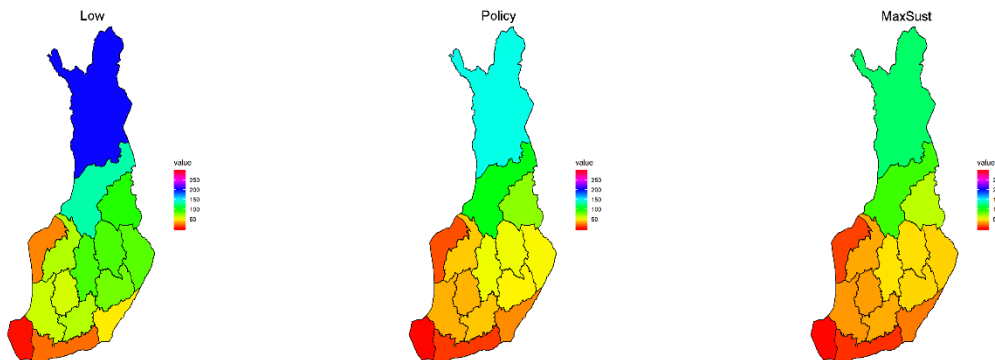
Kuva 3.15 Puuston hiilinielun kehitys puuntuotannon metsämaalla eri malleissa Poliitikka-skenaariossa kun ilmasto vaikutus on huomioitu kunkin mallin rakenteen mahdollistamalla tavalla. Muissa malleissa emissioskenaario oli RCP2.6, EFISCEN-mallissa SRESB1 (Schelhaas ym. 2015). PREBAS-mallissa nieluvaikutus on laskettu viiden eri ilmastomallin (Global Circulation Model, GCM) ennusteiden keskiarvona.

3.6 Rajoitteita/Kehityskohtia

Tämä selvityksen perusteella malleissa on useita kehityskohteita, joiden mukaan saaminen, tai tulosten tarkentaminen näiltä osin lisäisivät mallien käytettävyyttä, ja myös vertailtavuutta. Kasvihuonekaasupäästöinventaariorissa puutuotteiden nielu on jo mukana, mutta skenaariomallinnuksessa osalta nyt mukana olleista malleista vain MONSU-mallista löytyi vakiintuneet laskentarutiinit puutuotteiden dynamiikan varastomuutoksen ja saatujen korvaushyötyjen arvioinnissa. Myös EFISCEN-malli pystyi tuottamaan modulaarisen rakenteensa avulla puutuotteiden dynamiikan varastomuutoksen arvioinnissa hyödyntämällä CO2Fix-mallia

laskennassa (Liite 4, Kuva liite4.1). Sen sijaan FORMIT-, MELA- ja PREBAS-malleilla puutuotteiden hiilivaraston muutoksen laskenta ei tämän selvityksen osalta ollut mahdollista.

Turvemaiden mallinnus poikkeaa yksittäisenä asiana kaikkein eniten mallien välillä. Osassa malleissa (EFISCEN, FORMIT, PREBAS) ei ole turvemaiden mallinnusta lainkaan, vaan koko metsäpinta-alaa mallinnetaan samoilla mekanismeilla. Toisissa malleissa (MELA, MONSU) on erikseen puutason kasvumallit kangas- ja turvemaille. Tulevaisuuteen suuntaavien skenaarioiden mallinnuksessa turvemaille on iso merkitys, koska tällä hetkellä kasvihuonekaasinventaarissa metsämaan turvemailta syntyy päästöjä noin 7 milj.tn CO₂-ekv./vuosi. Hakkuupotentiaalin realisoiminen turvemaille voi olla haastavaa, mikä oikein huomioituna voi vaikuttaa mallin tulokseen merkittävästi. Metsien nielukehitykseen keskittyvissä tarkasteluissa turvemaiden hakkuu- ja nielupotentiaalin liittyviin epävarmuuksiin tulisi keskittyä jatkossa aiempaa enemmän.



Kuva 3.16 Alueelliset erot puuston biomassassa eri skenaarioissa vuonna 2050 PREBAS-mallin ennustamana.

Alueelliset kehityserot malleissa ovat osin taustalla kun tarkastellaan valtakunnan tason eroja (Kuva 3.16). Tässä selvityksessä ei pystytty pureutumaan alueellisiin kehityseroihin, eikä niiden taustalla oleviin syihin, vaan niihin tarvitaan jatkossa lisäselvityksiä. Selvää kuitenkin on, että muun muassa hakkuiden jakautumisessa maan eri osiin on mallien välillä eroja, jotka edelleen poikkeuttavat metsien kehitystä eri suuntiin.

Mallit poikkeavat ilmastonmuutoksen kasvun vasteiden toteutuksessa erittäin paljon. Harjoituksen päätavoitteena oli mallien välisten erojen esiin nostaminen ja niiden tulkinta. Mukana olleiden mallien ilmastonmuutoksen vaikutusten huomiointia voidaan pitää kehittymättömänä, lukuunottamatta PREBAS-mallia, jossa pystytään huomioimaan kaikki keskeiset säätelijät ja niiden yhteisvaikutukset. PREBAS- mallistakin puuttuu toistaiseksi maaperän ravinteiden takaisinkytkentä ilmastoskenaarioissa. Tulevaisuuteen suuntaavien skenaarioennusteiden luonteen vuoksi ilmastovasteiden mukaanotto tulisi olla keskeinen kehityskohde malleissa.

4. PÄÄVIESTIT/Johtopäätökset

Mallien vertaaminen on erittäin vaikeaa. Kunkin mallin rakenne kuvastaa niitä käyttötarkoituksia, joihin malli on alun perin suunniteltu. Rakenteiden erilaisuudesta johtuen myös lähtötietojen ja käsittelyskenaarioiden toteutuksen harmonisoinnissa ei päästä täydelliseen yhteneväisyyteen. Mallit poikkesivat esimerkiksi jo pinta-alassa, johon simuloinnit oli kohdistettu. Osassa malleja huomioitiin vain puuntuotannon metsämaa ja senkin kokonaisuhehtaarit vaihtelivat mallien välillä. Osassa mukana oli myös puuntuotannon ulkopuolella olevatsuojelualueet, joutomaat sekä kitumaat. Tulosten yhteismitallistamisessa on käytetty yksinkertaistavia skaalauksia, jotka poikkeuttavat kaikkien mallien tuloksia jossain kohdin niiden alkuperäisistä ennusteista. Tämä tuo lisää epävarmuutta tuloksiin.

Mallit poikkesivat keskeisissä tuloksissa niin paljon toisistaan, että yksittäisiä syitä poikkeaville tuloksille oli mahdotonta saada selville ja tämän vuoksi tulosten tulkinnessa jäätin mallien välisten erojen esittelyn tasolle. Laadullisesti selvityksen keskeiset tulokset olivat malleissa pääasiassa samansuuntaisia. Esimerkiksi hakkuutason nostaminen heikensi hiilinielua kaikissa malleissa. Suurin metsien hiilivarasto ja metsien hiilinielu saavutettiin yhteneväisesti laskemalla hakkuut Matala-skenaariossa 40 milj.m³ vuosi⁻¹. Kuitenkin mallien kuvaama puuston kasvun kehitys ei edes laadullisesti ollut samanlaista; hakkuutasoa laskettaessa MELA-malli ennusti voimakkaasti kiihtyvää kasvua, kun taas EFISCEN-, PREBAS- ja EFDM-malleissa puuston kasvu hidastui voimakkaasti jo muutaman vuosikymmenen jälkeen.

Yksittäisenä asiana selvityksessä nousi esiin kaikkien nyt tarkastelussa olleiden mallien käyttävän maaperän hiilen mallinnuksessa jotakin versiota YASSO-maamallista. Maaperän hiilikierron prosesseihin liittyy yhä epävarmuuksia. Tämän epävarmuuden analysoimiseksi olisi ensiarvoisen tärkeää arvioida erilaisia tapoja kuvata maaperäprosesseja ja tarkastella niiden vaikutuksia skenaarioihin. Maaperän tulevaan kehitykseen ilmastonmuutoksen edetessä liittyy erittäin suuria epävarmuuksia. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia olisi tutkittava lisää ja niiden kuvaamista malleissa olisi parannettava.

Malleja ei tämän selvityksen perusteella voi asettaa paremmuusjärjestykseen, ne ovat vain erilaisia. Selvityksen suurin hyöty on ehkä sen epävarmuuden esiin nostaminen, joka kaikkiin skenaariomallinnuksiin sisältyy. Kaikki mallit sisältävät olettamuksia ja epävarmuuksia. Poliittiseen päätöksentekoon suunnatut skenaariot tulisivat olla kattavia lähestymistavoiltaan; esimerkiksi sisältää useammasta mallista päätöksentekijöille johdettuja indikaattoreita.

Lisäksi tämän selvityksen aikaansaama prosessi avaa useita tutkimuksellisia polkuja, mikä hyödyttää mallien kehitystyötä jatkossa.

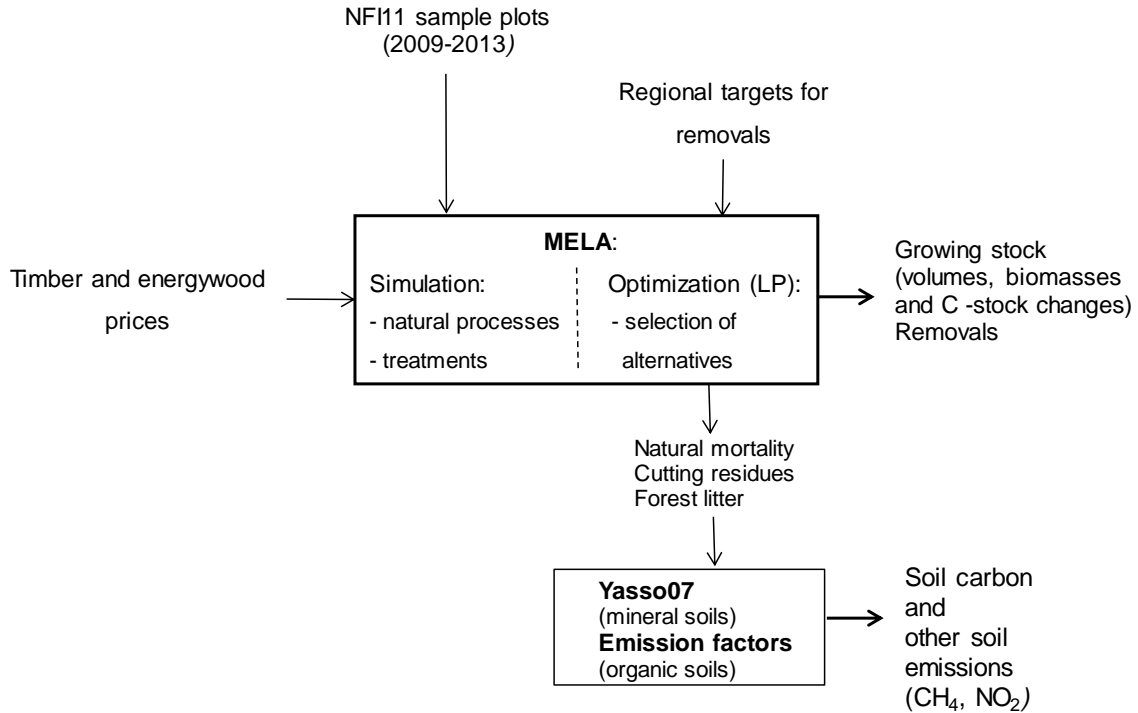
5. MALLIEN KUVAUKSET

5.1 MELA

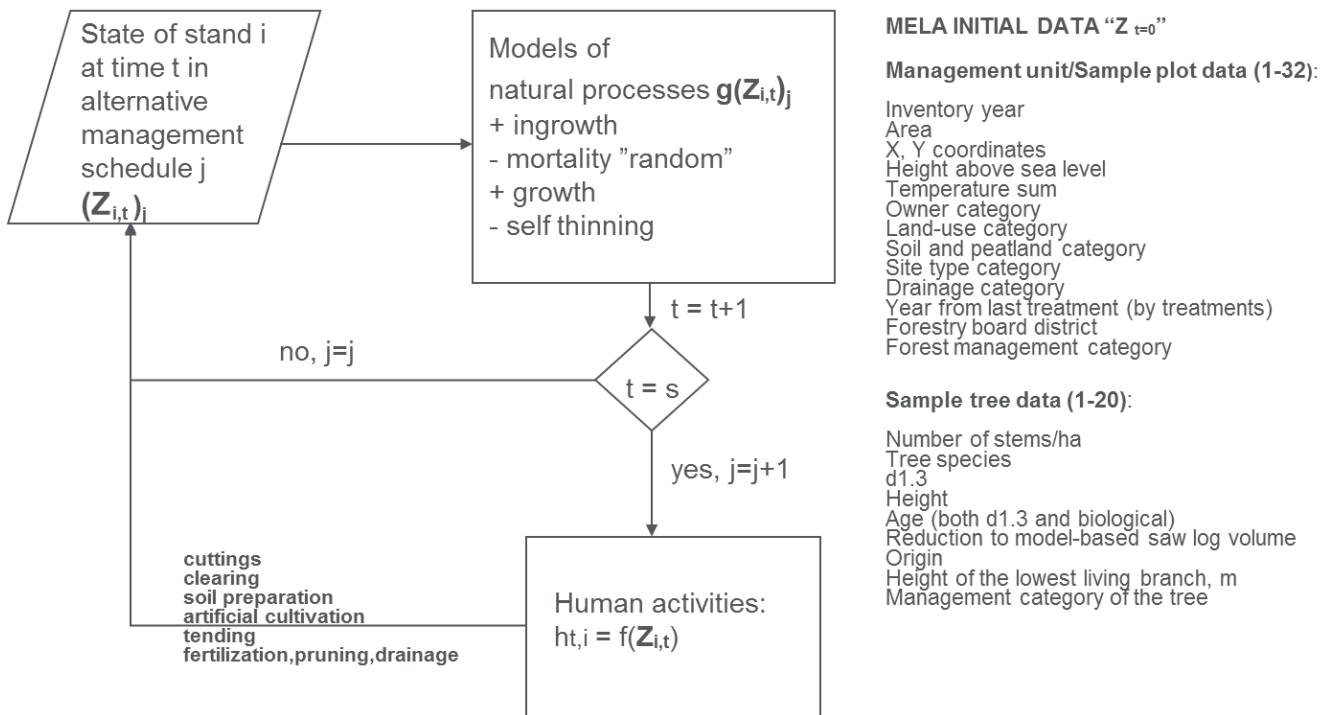
5.1.1 Keskeiset piirteet

MELA (MEtsäLAskelma) on Suomen olosuhteisiin kehitetty (Siitonen ym. 1996) metsämalli, joka koostuu metsiköiden käsittely- ja kehitysvaihtoehtoja tuottavasta simulointiosiesta ja näitä vaihtoehtoja vertailevasta lineaarisen optimoinnin JLP -ohjelmistosta (Lappi 1992). MELA-mallissa metsien käsittely on endogeeninen, laskennan tulos ja malli tuottaa arvion käsittelyiden mukaisesta metsien tulevasta kehityksestä. MELA ei sisällä hinnan ja määrän suhteen muuttuvia puun kysynnän ja tarjonnan funktioita eikä ole näin ns. taloudellinen tasapainomalli, joka tuottaisi tasapainoratkaisun mukaisen hakkuukertymän. Tässä suhteessa MELA on puhtaasti puuvaroista lähtevä tarjontamalli. Puun kysyntä voidaan kuitenkin asettaa optimoinnin rajoitefunktioiksi ja laskea tavoitefunktion suhteen kysynnän toteuttavien hakkuiden optimaalinen allokointi metsiköille ja erilaisille hakkuutavoille. MELA-mallia on sovellettu Suomessa yleisesti metsien käyttömahdollisuuksien - lähinnä hakkuumahdollisuuksien - ja niiden vaikutusten arviointiin sekä tarkasteltaessa miten metsiä tulisi käsitellä päätöksentekijän tavoitteet optimaalisesti toteuttavalla tavalla: mm. Kansallinen metsäohjelma 2010 (1999), 2015 (2007), Suomen biodiversiteettiohjelman arviointi (2004), Kansallinen energia- ja ilmastostrategia (2008, 2016), Energia- ja ilmastotiekartta 2050 (2014), Kansallinen metsästrategia 2025 (2015). Kuvassa 5.1 on esitetty MELA laskennan kulkukaavio, joka soveltuu myös tähän Ilmastopaneelin mallivertailuun.

MELA ohjelmiston tapahtumamäärittelyihin pohjautuva vaihtoehtojen simulointi (kuva 5.2) tuottaa automaattisesti kullekin metsikölle joukon (1-9999) erilaisia käsittely- ja kehitysketjuja, ns. vaihtoehtojen haarapuun (kuva 5.3). Tapahtumat koostuivat luonnonprosesseista (puiden synty, kasvu ja kuoleminen) sekä hakkuista ja metsänhoidosta. Luonnonprosessit ja tapahtumat toteutuvat puittain (kukin mitattu tai simuloinnin aikana syntynyt kuvauspuu edustaa joukkoa lukupuita), mutta tapahtumat päätellään puista koostettujen metsikkötietojen sekä kasvupaikan tietojen perusteella. Vaihtoehtojen varsinaisen simulointikauden, joka tässä selvityksessä oli 55 vuotta (2011-2065), jälkeen jokaisen laskentayksikön jokaista vaihtoehtoista käsittelyketjua jatketaan noudattaen metsänhoitosuosituksia joko päätehakkuuseen tai 150 vuoteen asti riippuen kumpi on lyhyempi.



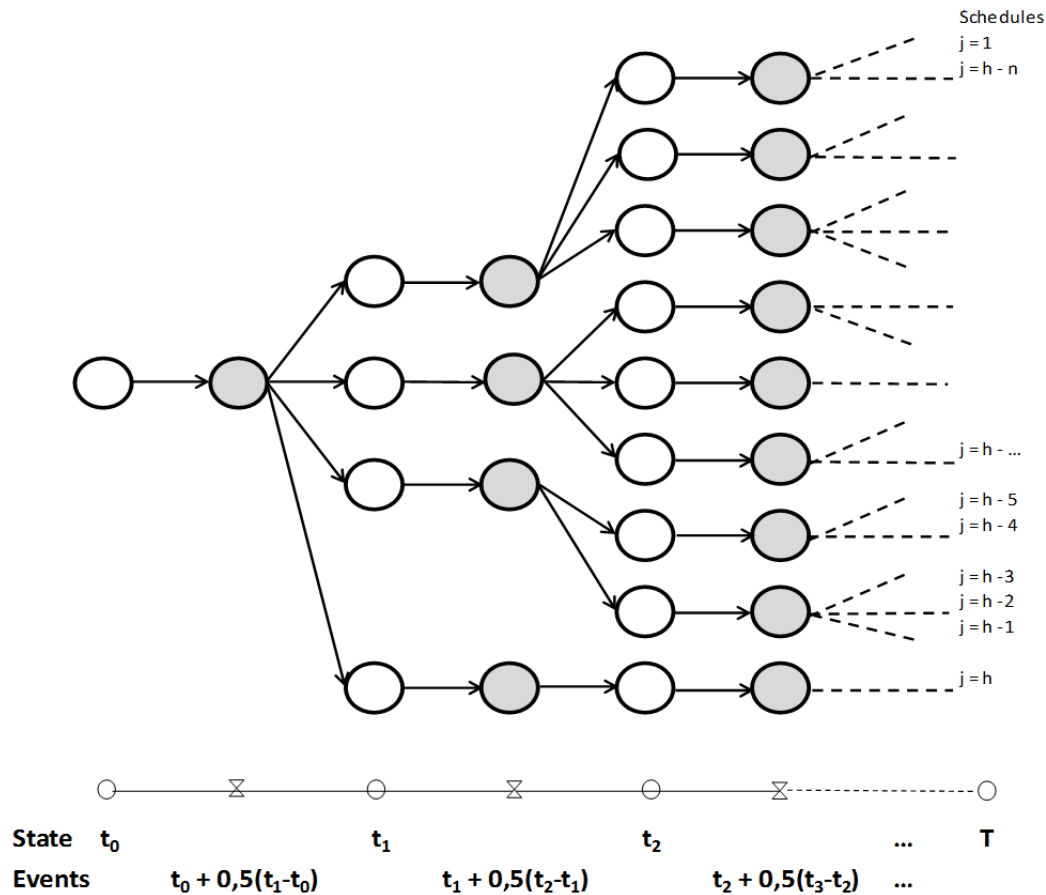
Kuva 5.1 MELA laskennan kulku



Kuva 5.2 Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi

Puuston kehityksen arviointi perustuu yksittäisten puiden empiiristen mallien (Hynynen ym. 2002, Ojansuu ym. 1991, Ojansuu 1996), Hynynen 1996, Hökkä 1996, 1997, Hökkä ym. 1997, Hökkä ym.

2000, Nuutinen ym. 2000, Jutras ym. 2003, Nuutinen ym. 2004) pohjalta ohjelmoituun MELA-metsikkösimulaattoriin. Em. mallit on laadittu pääosin käyttäen aineistoina 1970-luvulla perustettuja entisen Metsäntutkimuslaitoksen (nyk. Luke) INKA, TINKA ja SINKA koealoja. Keskeisimmät selittävät puumuuttujat näissä malleissa ovat puulaji, d1.3, h, latvussuhde ja metsikkömuuttujat valtapituus, ikä, pohjapinta-ala, ppa:lla painotettu keskiläpimitta, metsikön suhteellinen tiheys, kasvupaikka, lämpösusma, leveyspiiri ja korkeus merenpinnasta. Tilavuuskasvuvarion pohjana oleva pohjapinta-alan kasvumalli on kalibroitu VMI11 (2009–2013) aineiston osalta vastaamaan vuosien 1984–2013 läpimitan kasvun indeksikorjattua keskitasoa (Liite 1, taulukko liite1.3). Ilman kalibrointia tilavuuskasvun arvio on selvästi pienempi, vaikka kalibrointi on kasvun kehitysennusteen suhteen varsin konservatiivinen, sillä VMI11:ssä mitattu kasvu on ollut 2–10 % pitkän aikavälin indeksikorjattuja kasvuja korkeampi.



Kuva 5.3 Vaihtoehtojen simuloinnin tuottama yhden metsikön käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen haarapuu

Luonnonpoistuman arvio pohjautuu metsikön sisäisestä kilpailusta ja puun asemasta metsikössä (Haapala 1983) sekä puun vanhenemisesta johtuvaan puun eloonjäämistodennäköisyysmalliin. Puittaista eloonjäämistodennäköisyysmallia täydentää puuston ylitheydestä huolehtiva itseharvenemismalli (Hynynen 1983). Itseharvenemismalli tuottaa maksimirunkoluvun tietyille

keskilämpötilalle, mikä varmistaa, että metsikön puusto säilyy simuloinnin edetessä realistisissa rajoissa. Haapalan malli tuottaa luonnonpoistumaa erityisesti kasvatusmetsien kilpailussa hävinneille valopuille; erityisesti pienet lehtipuut, mutta myös mänty. Myös itseharvemismalli runkoluvun suhteen suhteellisena tappaa kasvatusmetsien pieniä lehtipuita. Tässä Ilmastopaneelin työssä eloonjäämistodennäköisyysmallien osuus luonnonpoistumasta oli simuloinnin alkuvaiheessa (ensimmäiset 30 vuotta) 55-65 % puuntuotannon metsämaalla ja hieman alle 50 % suojellulla metsämaalla, ja molemmissa simuloinnin loppupuolella n. 40 %.

MELA-mallilla voidaan tarkastella myös keskilämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden nousun (ilmastonmuutos) vaikutuksia puiden kasvuun. Tämä on toteutettu Matalan ym. (2005) laatimien siirtomuuttujafunktiolla, joiden avulla mallien ennustamaa tilavuuskasvua modifioidaan FinnFormallilla (Kellomäki ja Väisänen 1997) tehtyihin kasvunlisäysarvioihin perustuen. Tässä selvityksessä laskelmat tehtiin nykyilmaston lisäksi noudattaen IPCC:n RCP2.6 ilmastoskenaariota, joka implementoitiin lämpötilan ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvuiksi soveltaen viiden eri ilmastomallin (CanESM2, CNRM, GFDL, HadGEM2 ja MIROC) perusteella laskettua keskimääräistä kehitystä vuoteen 2100 asti.

Puun tilavuus lasketaan MELA:ssa Laasasenahon (1983) yhtälöillä ja tilavuuden jako puutavaralajeihin Snellmanin (1984) yhtälöillä, jotka on laadittu Laasasenahon ja Snellmanin tilavuustaulukoiden (1983) perusteella. Simuloidun puuston tukkitilavuutta korjataan Mehtätalon (2002) VMI8-9 aineistoista laatimalla tukkivähennysmallilla, koska apteeraus tapahtuu vain puun dimensioiden (d,h) perusteella. Tukkivähennys siirtyy kuiduksi.

Puuston biomassojen laskenta perustuu Repolan (2008,2009) männyn, kuusen ja koivun (d,h) – malleihin. Energiapuunkorjuussa sovelletaan lisäksi järeiden juurten biomassan laskentaan Marklundin (1988) mallia (tässä selvityksessä ei korjattu energiapuuta).

5.1.2 Laskenta-aineisto

Laskelmat perustuivat valtakunnan metsien 11. inventoinnin (VMI11) vuosina 2009–2013 mitattuihin metsä- ja kitumaan koealoihin (59317). Laskelmissa on mukana myös puuntuotannon ulkopuolella olevat koealat sisältäen mm. luonnon- ja kansallispuistot, luonnonsuojelulain nojalla rauhoitetut ja Metsähallituksen omilla päätöksillä suojellut alueet sekä monimuotoisuuden kannalta erityisen tärkeän elinympäristön vaatimukset täyttävät koealat. Puuntuotannon käytönrajoitusten osalta metsä- ja kitumaan koealat on jaettu kolmeen käsittelyluokkaan: ensisijaisesti puuntuotannossa, rajoitetussa puuntuotannossa ja puuntuotannon ulkopuolella oleviin (Liite 1, taulukot liite1.1,1.2). Koko metsä- ja kitumaan pinta-ala oli yhteensä 22,8 Mha (metsämaa 20,3 Mha ja kitumaa 2,5 Mha), jota vastaava puuston tilavuus oli 2 332 Mm³. Puuntuotantoon käytettävissä olevaan metsä- ja

kitumaahan kuului ensisijaisen ja rajoitetun puuntuotannon alueet. Ensisijaisesti ja rajoitetusti puuntuotantoon käytettävissä oleva metsämaan (FLAWS = forest land available for wood supply) pinta-ala oli 18,4 Mha ja vastaava puuston tilavuus 2 093 Mm³.

VMI11 koeala-aineistosta koostettiin kolme laskenta-aluetta:

1) Eteläinen Suomi: Ahvenanmaan, Uudenmaan, Varsinais-Suomen, Satakunnan, Kanta-Hämeen, Pirkanmaan, Etelä-Savon, Kymenlaakson ja Etelä-Karjalan maakunnat, joiden käsittämä alue kattaa myös entiset (v. 2012 lopetettujen) Ahvenanmaan (0), Rannikon Eteläosan (1E), Lounais-Suomen (2), Häme-Uusimaan (3), Kaakkois-Suomen (4), Pirkanmaan (5) ja Etelä-Savon (6) metsäkeskusten alueet.

Puuntuotannon metsämaan ala 5,07 Mha.

2) Keskinen Suomi: Pohjanmaan, Etelä- ja Keski-Pohjanmaan, Keski-Suomen, Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan maakunnat, joiden muodostama alue käsitti entiset Rannikon Pohjanmaan (1P), Etelä-Pohjanmaan (7), Keski-Suomen (8), Pohjois-Savon (9) ja Pohjois-Karjalan (10) metsäkeskusten alueet.

Puuntuotannon metsämaan ala 5,75 Mha.

3) Pohjois-Suomi: Pohjois-Pohjanmaan, Kainuun ja Lapin maakunnat, jotka muodostivat myös entisten metsäkeskusten 11, 12 ja 13 alueet.

Puuntuotannon metsämaan ala 7,61 Mha.

5.1.3 Käsittelyvaihtoehtojen simulointi

Metsien käsittely perustui vuoden 2013 metsänkäsittelysuositukseen (Äijälä ym. 2014). Ensisijaisen puuntuotannon metsämaalla mahdollisia toimenpiteitä olivat runkolukuun ja pohjapinta-alaan perustuvat harvennukset, avohakkuu, siemenpuuhakkuu, suojuspuuhakkuu sekä ylispuiden poisto, säästöpuiden jättäminen, raivaus, maanpinnan käsittely, viljely, taimikonhoito ja kunnostusohjelma hakkuiden yhteydessä. Rajoitetun puuntuotannon metsämaalla sallittuja hakkuutapoja olivat kasvatushakkuut (harvennukset ja ylispuiden poisto) sekä luontainen uudistaminen. Kitumaille tai puuntuotannon ulkopuolella olevilla alueilla ei tehty mitään toimenpiteitä. Kulotus, lannoitus, uudisojitus, pystypuiden karsinta, yläharvennus ja eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatusta eivät olleet mukana tarkastelussa. Simulointikausi oli 54 vuotta (4+10+10+10+10+10 v) 2011–2065 ja simuloinnit tehtiin laskenta-alueittain. Lisäksi varsinaisen vaihtoehtojen simulointikauden jälkeisen ajan huomioon ottamiseksi kutakin simuloitua käsittelyketjua jatkettiin metsänhoito-ohjeita noudattaen 150 vuoteen tai päätehakkuuseen asti.

Päätehakkuvaihtoehto simuloitiin noudattaen metsänhoitosuosituksen 2-4 % tuottovaatimukseen perustuvia läpimitta- ja uudistamisikärajoja, jos jompikumpi em. raja täyttyi. Tavoitefunktio on nettotuottojen nykyarvon (NPV) maksimointi ja annetuilla hakkuukertymärajoitteilla valittava vaihtoehto on lähes korkokannasta riippumaton, eli pyrkii tuomaan tuottoja mahdollisimman lähelle nykyarvohetkeä. NPV tavoitefunktioilla 1. kauden uudistushakkuut yleensä korostuvat. Jos laskelmassa ei ole kiinteää hakkuurajoitetta niin silloin korkokannalla on huomattava vaikutus, kuten esim. Suurin kestävä-laskelmassa.

Puiden poisto-ohjetta käänteisesti soveltaen päätehakkuisissa jätettiin säästöpuina järeää lehtipuuta suosien 5 m³/ha. Säästöpuut (oma puuluokka) säilyivät koko elinkaarensa ajan puuntuotannon ulkopuolella ja niille olivat samat luonnonprosessit kuin ns. talouspuilla.

Harvennushakkuissa ja taimikonhoidossa noudatettiin suositusten mukaisia runkoluku- ja pohjapinta-alarajoja. Puiden poisto tapahtui tapahtumamäärittelyparametriin sisältyvällä puiden poisto-ohjeella. Tässä selvityksessä käytettiin yleisimmin MELA simuloinneissa sovellettua pääpuulajia suosivaa alaharvennusta, jolloin harvennuksissa ja myös taimikonhoidossa poistettiin ensin muuta puustoa ja sen jälkeen pääpuulajia kunnes puuston tiheyden ja ohjeiden mukaisesti laskettu poistettavan puuston määrä saavutettiin.

Ainespuunkorjuun ja metsänhoitotöiden tuottavuusmallit, joita MELA soveltaa kustannusten laskentaan, perustuvat myös pääosin puutason malleihin (Kuitto ym. 1994, Rummukainen ym. 1995, Väkevä ym. 2001, Metsäpalkkarakenteen ... 2008). Energiapuun korjuussa, jota tässä tutkimuksessa ei otettu mukaan tarkasteluun, keskeisimmät tuottavuusmallit ovat Laitila ym. (2004, 2007), Kärhä ym. (2004, 2006), Heikkilä ym. (2005). Tuottavuusmallien avulla laskettiin työn vaatima ajanmenekki ja työlajin kustannus laskettiin tarvittu työajan ja sen yksikköhinnan tulona. Puiden poistossa tuottavuuteen vaikuttivat erityisesti poistettavien puiden järeys, hehtaarikohtainen poistuma (tiheys) ja jätettävän puuston määrä ja maaperä.

Tähän ilmastopaneelin mallivertailuselvitykseen valittiin kolme hakkuukertymätasoa. Kaikissa vuodet 2011–2014 edettiin toteutuneen hakkuukertymän tasolla (62,6 Mm³/v) ja vuodesta 2015 eteenpäin laskelmat erosivat alla olevan mukaisesti:

1) Laskelma 40 Mm³/v. Vuodesta 2015 eteenpäin koko Suomea koskeva hakkuukertymätavoite oli 40 Mm³/v. Tavoite skaalattiin alueittain sekä puu- ja puutavaralajeittain 80 Mm³/v laskelman tavoitteista.

2) Laskelma 80 Mm³/v. Vuosina 2015–2024 kertymä oli koko Suomen tasolla n. 71 Mm³/v ja vuodesta 2025 eteenpäin 80 Mm³/v. Alueittain sekä puu- ja puutavaralajeittain noudatettiin Energia- ja ilmastostrategian mukaista laskelmaa (Koljonen ym. 2017) paitsi energiapuun osalta, jota ei tässä

selvityksessä otettu mukaan. EIS 2016 energiarunkopuu oletettiin kuitenkin kokonaisuudessaan täyttävän kuitupuun mitat ja se lisättiin kuidun hakkuutavoitteisiin.

3) MaxSust laskelmassa vuoden 2015 jälkeen noudatettiin Lukessa sovellettua suurimman puuntuotannollisesti ja taloudellisesti kestävä hakkuukertymän määritelmää. Energiapuuta ei kuitenkaan korjattu.

Laskelmatulokset esitetään sekä nykyilmastossa että noudattaen RCP2.6 ilmastonmuutosskenaariota.

Skenaariot operationalisoitiin lineaarisen optimoinnin tavoite- ja rajoitefunktioiden avulla.

Tavoitefunktio oli nettotuottojen nykyarvon maksimointi: Matala- (40 Mm³/v) ja Poliitiikka-laskelmissa (80 Mm³/v tavoitefunktio laskettiin soveltaen 1 % ja Suurin kestävä-laskelmassa 4 %;n laskentakorkoa. Suurin kestävä- laskelmassa korkea korko oli keino, jolla saatiin tulokseksi korkein ylläpidettävä hakkuutaso. Korkokannan valinta heijastaa päätöksentekijän tuottovaateita ja aikapreferenssiä, tai vaihtoehtoisten sijoitusten tuottoa. Suurin kestävä-laskelmassa korko on valittu nostamaan kestävä hakkutaso mahdollisimman nopeasti suurimmalle ylläpidettävälle tasolle.

Nettotulot saatiin vähentämällä tienvarsihintaisista hakkuutuloista puun korjuun ja metsänhoidon kustannukset. Kustannukset laskettiin ajanmenekkien ja töiden yksikköhintojen tulona. Näin otettiin huomioon mm. poistettavien runkojen koon ja hehtaarikohtaisen hakkuukertymän aiheuttamat erot nettotuloihin. LP tehtävien määrittelyt on esitetty yksityiskohtaisesti liitetaulukoissa.

5.1.4 Hiilen varastomuutosten ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen laskenta

Puuston (runkopuu, oksat, lehdet ja neulaset sekä kanto ja juuret) hiilivaraston muutos laskettiin peräkkäisten kausien erotuksena puutason biomassamalleihin (Repola 2008,2009) perustuen. Kuivamassan oletettiin sisältävän hiiltä yleisesti sovelletun vakion mukaisesti 50 % (IPCC 2003). Maaperän kasvihuonekaasut arvioitiin erikseen kivennäismaille ja ojitetuille turvemaille.

Kivennäismailla hiilivaraston muutokset perustuivat Yasso07 malliin (Tuomi ym. 2011). Maaperän hiilivarastoa kasvatti kuolleen orgaanisen aineen kertyminen, jonka syötteenä olivat MELA simuloinnin mukaiset hakkuutähteet, luonnonpoistuma ja arviot elävän puuston tuottamasta karikkeesta. Yasso07 mallilla laskettiin kuolleen orgaanisen aineen hajoaminen eli hiilivaraston väheneminen: varastomuutos oli lisäyksen ja vähenemisen erotus. Ojitettujen turvemaiden maaperän CO₂hiili-, CH₄ metaani ja N₂O typpioksiduulipäästöt laskettiin VMI aineiston mukaisten pinta-alojen mukaisesti soveltaen Ojasen ym. (2010) orgaanisten maiden päästökertoimia (NIR 2018). Ojitettujen turvemaiden maaperän hiilivaraston muutos saatiin päästökertoimilla lasketun päästön ja kuolleen orgaanisen aineen syötteen (laskettiin samoin kuin kivennäismailla) erotuksena.

Kasvihuonekaasujen laskenta noudatti pääpiirteissään näin. Suomen KHK-inventaarissa (esim. NIR 2018) sovellettua menetelmää, lukuun ottamatta puutuotteita, joita ei otettu huomioon. Hiilivarastomuutosten osalta menetelmää on esitelty muun muassa julkaisussa Sievänen ym. (2014).

5.2 EFISCEN

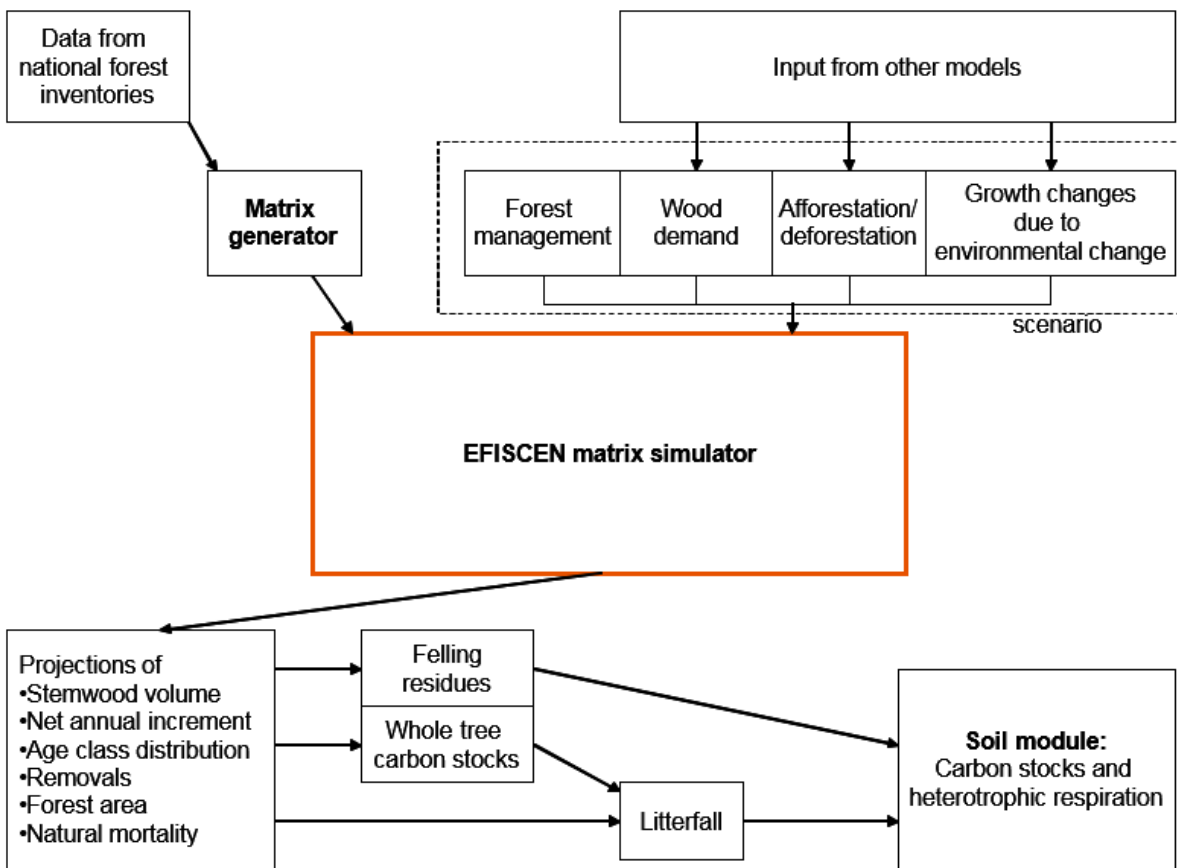
5.2.1 Keskeiset piirteet

”The European Forest Information SCENario model”, EFISCEN on aluetason metsämalli (Kuva 5.4, Schelhaas 2007,). Mallilla voidaan tuottaa ennusteita metsävarojen kehityksestä tietyllä alueella tai aina koko Euroopan laajuisesti. EFISCEN:ssä alueen metsien pinta-ala on jaettu matriisiin, jonka ruudut perustuvat ikä- ja tilavuusjakaumiin. Perussyöttötiedot koostuvat alueen pinta-alasta (ha), puuston tilavuudesta (m³/ha) ja kunkin ikäluokan vuotuisesta runkokuun tilavuuskasvusta (m³/ha/vuosi). Matriisin kunkin ruudun metsäalaa päivitetään iän ja tilavuuden osalta simuloinnin aikana. Pinta-alaosuuksien muuttuminen matriisin ruutujen välillä simuloinnin aikana kuvaa erilaisia luontaisia prosesseja, kuten kasvua, kuolleisuutta ja metsien vanhenemista. Lisäksi metsien käyttö ja hoito vaikuttavat pinta-alaosuuksien muutokseen matriisin ruutujen välillä. Metsien käyttö- ja hoitokokonaisuus muodostuu harvennukset ja minimipäätehakkuuian määrittävästä osasta sekä puun kysyntäskenaarioista. Mallin aika-askel on viisi vuotta. Kunkin aika-askeleen jälkeen matriisi siirtyy yhden ikäluokan ylöspäin, jos siihen ei kohdistu päätehakkuuta. Samalla tavoin osa matriiseista siirtyy suurempaan tilavuusluokkaan, mikä kuvastaa tilavuuskasvua. Metsän vuotuinen kasvu on suhteutettu mallissa puuston tilavuuteen. Kasvufunktion kertoimet sekä ikä- ja tilavuusjakaumat perustuvat joko kansallisiin inventointitietoihin tai tuotostaulukoihin. Muutokset metsien kasvunopeudessa voidaan implementoida olettamalla suhteellisia muutoksia kasvufunktioiden tuottamassa kasvussa. Myös ilmastonmuutoksen aiheuttama kasvunvaste implementoidaan suhteellisen kasvunmuutoksen kautta. Luontainen poistuma kuvataan mallissa siirtämällä määritelty osuus matriisin pinta-alasta tilavuusluokka alaspäin. Luontainen poistuma esitetään mallissa tyypillisesti suhteessa puuston tilavuuteen. Äskettäin harvennettu alue ei voi mallissa sisältää luontaista poistumaa.

Metsien käsittely toteutetaan mallissa kahdessa vaiheessa. Perus käsittelyn kuvauksessa määritellään harvennushakkuiden ajoittuminen, sekä päätehakkuun minimi-ikä. Seuraavassa vaiheessa määritellään puun kysyntään perustuvat hakkuumäärät harvennus- ja päätehakkuille erikseen. Puun kysyntäskenaariost määritetään EFISCEN-mallin ulkopuolella esim. EFI-GTM (viite) markkinatasapainomallin kaltaisilla työkaluilla. Harvennuksessa matriisin tilavuusluokka siirtyy yhden luokan alaspäin. Päätehakkuut implementoidaan mallissa ottamalla määritelty osuus pinta-

alaa pois matriisista. Hakkuissa muodostuvat hakkuutähteet voidaan mallissa joko jättää metsään, tai kerätä energiapuuna.

Mallissa käytössä olevien biomassakertoimien (Biomass Expansion Factors, BEF) avulla tilavuusmuuttujat voidaan muuntaa ensin biomassaksi ja edelleen hiileksi, mikä mahdollistaa mallin käytön hiilitasetarkasteluissa. EFISCEN on kytketty YASSO maamalliin, mikä mahdollistaa maaperän hiilen tarkastelun skenaariomallinnuksissa. Mallissa oletetaan maaperän hiilen olevan alkutilanteessa tasapainossa alkutilan karikesyötteen kanssa.

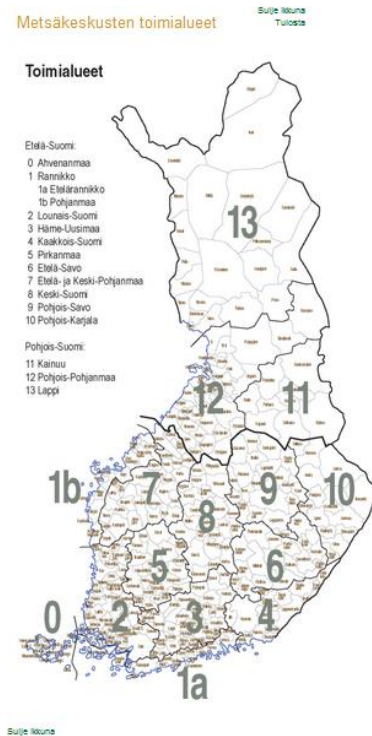


Kuva 5.4 EFISCEN-mallin rakenne (Shcelhaas ym. 2007).

5.2.2 Laskenta-aineisto

Syöttötietojen muokkaus EFISCEN-mallin matriiseihin perustuu metsäkeskusalueittain järjestettyyn aineistoon (Kuva 5.5). Aineistossa erotetaan yksityiset ja julkiset metsäomistajat (valtio, järjestöt) toisistaan.

Aineistossa erotellaan kangasmaat ja turvemaat toisistaan. Lisäksi erotellaan kolme puulajiluokkaa (mänty, kuusi, lehtipuut). Alueet, joiden puustotiedot puuttuivat, jaettiin näihin kolmeen puulajiluokkaan niiden suhteellisten osuuksien mukaan. Matriisien generoinnin yhteydessä tämä pinta-ala jaettiin avohakkuualan ja ensimmäisen tilavuusluokan kesken.



Kuva 5.5 Metsäkeskusalueet Suomessa

(<http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/laatu/metsakeskukset.htm>)

Aineisto valmisteltiin kaikille ikäluokille eri metsätyypeissä painottamalla kunkin luokan tilavuus ja kasvu sen osuudella kokonaismäärästä. Tapauksille, joille aineistoa ei ollut käytettävissä, keskitilavuus ja kasvu asetettiin 1, jotta välttyttiin ongelmilta matriisien generoinnissa. Tällä ei ole vaikutusta tuloksiin.

Kasvufunktiot sovitettiin alueittain VMI11 dataan. Hiilen osuus biomassasta 50%. Puuaineen kuiva-tuoretiheys männynllä 420 kg/m³, kuusella 400 kg/m³ ja lehtipuilla 510 kg/m³.

Laskennoissa metsien pinta-ala 19,3 milj.ha. Keskimääräinen EFISCEN-mallin ennustama puuston tilavuus laskennan alussa 110,4 m³/ha. Mallin ennustama keskikasvu 5,08 m³/ha laskennan alussa kun mitattu keskikasvu on 5,17 m³/ha.

5.2.3 Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi

Hakkuuskenaarioissa seurattiin MELA E&I toteutusta (Lehtonen ym. 2016). Matala-skenaarion hakkuut suhteutettiin MELA-mallin baseline skenaarion avulla (40/baseline). Mallissa määritetään ensin maatason hakkuumahdollisuudet kullekin puulajille erikseen. Näitä verrataan maatason vuotuisen hakkuutavoitteen. Tämä jälkeen kunkin metsäkeskusalueen hakkuumäärä seuraa tätä maatasolla määritettyä hakkuumahdollisuuksien ja –tavoitteen välistä suhdetta. Hakkuiden ja hakkuukertymän suhde oli simuloinneissa 0.94 männylle ja kuuselle, 0.81 lehtipuulle. Hakkutähteitä ei tässä laskelmassa kerätty. Nykyilmaston simuloinneissa ei myöskään oletettu metsien kasvun muutosta, eikä metsäkatoa tai metsitystä. Päätehakkuun jälkeen uudistaminen tehtiin edellisen kiertoajan pääpuulajilla.

Maaperän ilmaston tuottamisessa käytettiin WorldClim (<http://worldclim.org/version2>) 10 min aineistoa. Aineistosta tuotettiin kuukauden keskiarvot lämpötilalle ja sadannalle 14 eri alueelle Suomessa. Tämän jälkeen tuotettiin haihduntapotentialiaali (potential evapotranspiration, PET) CO2fix mallin maaperämoduulilla. Lämpösumma nousi 1619 DD:stä n. 2000:n DD:en.

5.2.4 Puutuotteet

Puutuotteiden hiilivaraston ja hiilinielun tuottamisessa käytettiin CO2fix mallin moduulia. CO2fix mallissa on kaksi esimerkkisimulaatiota Suomelle (Schelhaas ym. 2004). Puutuotteiden hajoamisfunktion perusteena käytettiin männyn esimerkkiä. Pääasiallinen ero päätehakkuiden ja harvennushakkuiden välillä on, kuinka paljon hakkuussa saadaan tukki- ja kuitupuuta. Päätehakkuun tukkipuuosuus on tyypillisesti EFISCEN-mallissa 60% ja kuitupuun osuus 30%, sekä energiapuun osuus 10%. Tässä laskennassa päätehakkuussa tukkipuun osuus oli 67% ja kuitupuun kertymä 33%. Harvennushakkuissa tukkipuuosuus kasvaa metsikön iän funktiona. Keskimäärin harvennushakkuissa tukkipuuosuus on 13% ja kuitupuun osuus 87%.

Yllä kuvattuja tukki- ja kuitupuun osuuksia käyttäen laskettiin vuotuisen puutuotevaraston koko kolmella suuralueella (E-S, K-S, P-S). Puutuotevaraston alustamisessa käytettiin baseline skenaarion mukaista hakkuukertymää ajanjaksolla 1900-2015. Tämä ajanjakso ei ollut riittävän pitkä puutuotevaraston ajautumiseksi tasapainoon, mutta aikaisempien vuosisatojen erilaisen puunkäytön tason ja tuoteportfolion vuoksi ei pidetty uskottavana soveltaa tätä lähestymistapaa pidemmälle ajanjaksolle.

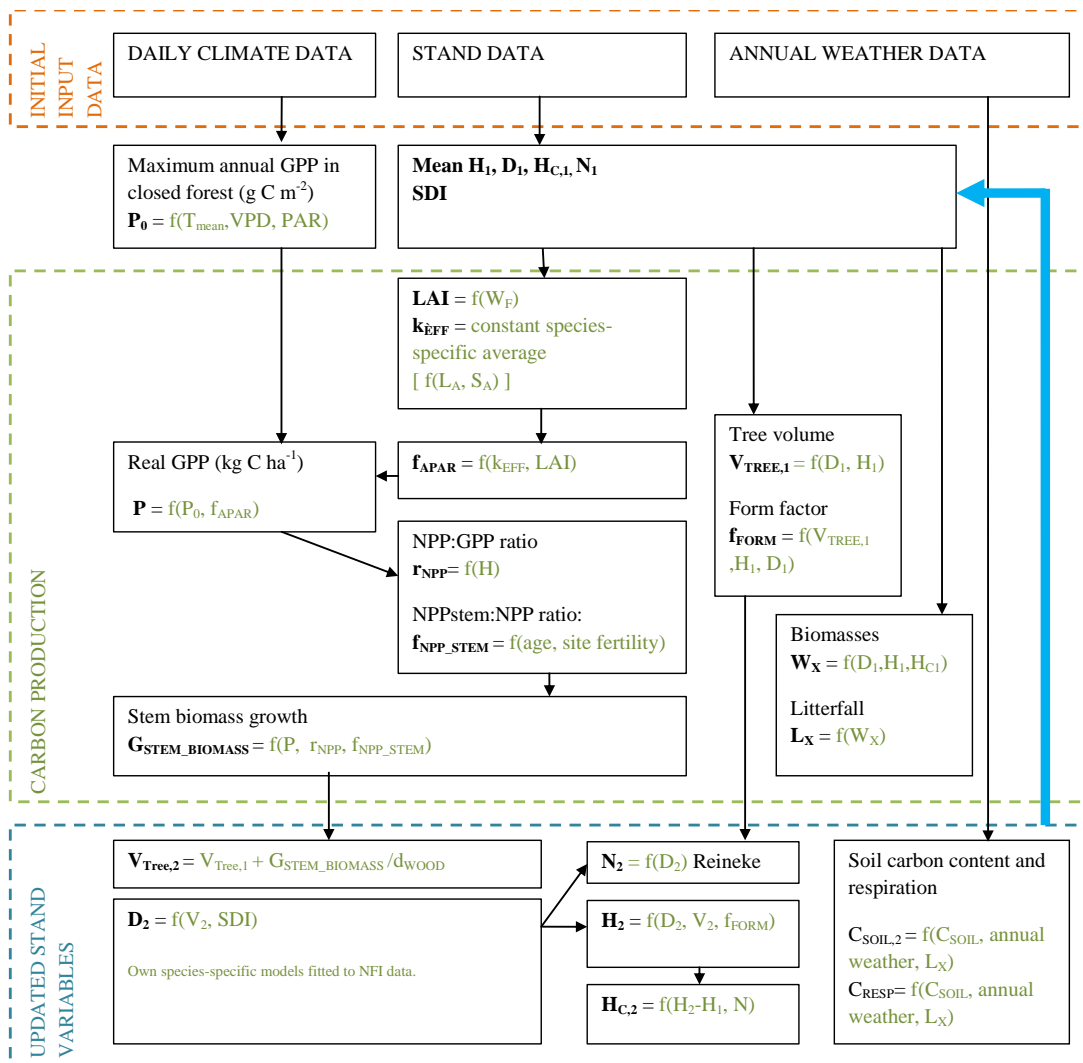
5.3 FORMIT

5.3.1 Keskeiset piirteet

FORMIT, “FORest management strategies to enhance the MITigation potential of European forests”, on metsänkasvua kuvaava malli (Härkönen ym. 2010, Härkönen ym. 2019), jossa on alueelliset metsänkasvumallit (<http://dx.doi.org/10.17632/344n6ts3tq.1>). Mallilla pystytään huomioimaan sekä

metsien käsittelyn että ilmastonmuutoksen vaikutus metsien kasvuun. Malli yhdistää prosessipohjaisen hiilitaselähestymistavan ja empiiriset havainnot (Kuva 5.6). Mallissa lähtötietoina käytetään VMI-aineistoa, VMI10 tässä laskennassa. Lisäksi mallissa on VMI-datasta johdettuja metsikkötunnusten välisiä suhteita, mutta ei kuitenkaan suoraan puiden kasvua. Tässä ilmastopaneelin harjoituksessa kasvumallin NPP:GPP-suhteeseen liittyviä parametreja on kalibroitu VMI-datalla. Mallin ennusteet riippuvat ylipäätän osamallien kalibroinnin pohjana olevasta datasta.

Lisäksi mallissa käytetään syötteinä meteorologisia muuttujia kuten päivittäinen säteily, lämpötila ja sadanta. Malli ei kuitenkaan sisällä ilmakehän CO₂ pitoisuutta. Malli tuottaa tavanomaisten metsikkötunnusten (tilavuus, pituus ja läpimitta) lisäksi estimaatit metsien biomassan kehityksestä, hiilivarastosta ja hiilen virroista, sekä runkopuun tuotannosta puutavaralajeittain. Mallissa on mahdollista simuloida metsien käsittelyä noudattaen erilaisia metsänhoitomenetelmiä (mm. tasaikäinen kiertoaikoihin perustuva, eri-ikäisrakenteinen peitteinen metsätalous, vesakkometsätalous). Lisäksi mallissa on mahdollista implementoida eri ilmastonmuutoskenaarioita. Mallia on FORMIT-tutkimushankkeessa sovellettu Euroopan laajuiseen analyysiin (FORest management strategies to enhance the MITigation potential of European forests, 2016, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/104508/reporting/en>) huomoiden RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5 ilmastonmuutoskenaarioiden mukaiset ilmastoprojektit. Hakkuuskenaariot tuotetaan mallin ulkopuolella markkinatasapainomallien avulla. Malli ei sisällä optimointimahdollisuutta, vaan sovellettavat hakkuuskenaariot jaetaan satunnaisesti mallin pohjana olevien VMI koaloen jakaumaan pohjautuen.



Kuva 5.6 FORMIT-mallin rakenne (Härkönen ym. 2019).

FORMIT-mallin kasvumalli sisältää tilamuuttujat keskipituus (H), keskiläpimitta (D), keskimääräinen latvusrajan korkeus (Hc) ja metsikön tiheys (N). Empiiristen funktioiden avulla tilamuuttujista saadaan tuotettua muuttujia kuten keskirunkotilavuus, eri ositteiden biomassat, lehtialaindeksi, sekä kariesadanta. Kasvumallin tilamuuttujien dynamiikkaa ohjaa PRELES osamallilla (Mäkelä ym. 2008, Peltoniemi ym. 2015) tuotettu bruttoprimaari tuotos (GPP, yhteytystuotos), joka muunnetaan nettoprimaari tuotokseksi (NPP) VMI:iin perustuvalla empiirisellä mallilla (Härkönen ym. 2010) ja edelleen rungon ja muiden ositteiden kasvuksi hiilitaseallokaatioon pohjautuen. Tämä muunnetaan metsikön keskipuun kasvuksi jakamalla tuotos metsikön runkoluvulla ja laskemalla pituden, läpimitan ja latvuksen kehitys allometristen yhtälöiden avulla. Metsikön kuolleisuuden kuvaamisessa käytetään metsikön tiheysindeksiä (Reineke 1933).

PRELES mallin päivittäisen meteorologisen syötteen avulla FORMIT-mallissa voidaan implementoida kattavasti erilaisten ilmastoprojektoiden vaikutukset metsien kasvuille. Uusimmassa PRELES mallin versiossa myös ilmakehän CO₂ pitoisuuden muutokset pystytään huomioimaan

(Kalliokoski ym. 2018). Tässä harjoituksessa simuloinnit toteutettiin nykyilmaston (1980-2010) mukaisella ilmastosyötteellä sekä RCP2.6 ilmastoskenaarion mukaisella ilmastoprojektilla. Ilmastoprojektio oli tuotettu käyttämällä M-MPI-ESM-LR globaalin ilmastomallin ennusteita alueellisissa ilmastomallissa CCLM4-8-17 (Dosio ym. 2017).

Kasvupaikan rehevyyden vaikutus huomioidaan FORMIT-mallissa sekä pituusboniteetin (valtapituus määrittää kasvupaikan) että metsikön potentiaalisen yhteytystuotoksen avulla

FORMIT-mallissa alueelliset funktiot ja parametrit riippuvat maantieteellisestä sijainnista. Suomi kuuluu boreaaliseen vyöhykkeeseen. Alla on lyhyet kuvaukset boreaalisen vyöhykkeen funktioista:

Pohjois-Eurooppa: Suomi, Norja, Viro

- **Bruttoprimaari tuotos** (Gross Primary Production, GPP) mallissa käytetään Hyytiälän, SMEARII aseman, mittauksiin perustuvaa parametrisaatiota (Mäkelä ym. 2008)
- **Kasvupaikkojen luokittelu** perustuu Suomessa käytössä olevaan kasvupaikkaluokitukseen (Cajander 1949), joka on pelkistetty kolmeen luokkaan.
- **Biomassa** eri ositteissa lasketaan suomalaisilla biomassamalleilla (Repola 2008, 2009) männylle, kuuselle ja koivulle keskipuun pituuden, läpimitan ja latvusrajan korkeuden perusteella.
- **Runkotilavuus** lasketaan männyn, kuusen ja koivun tilavuusyhtälöillä (Laasasenaho 1982)
- **Keskipuun läpimitta** ennustetaan keskitilavuuden ja metsikön runkolukuindeksin funktiona mallilla, joka on sovitettu suomalaiseen VMI aineistoon.
- **Parametrit** valonsammumiskerroin, k_{eff} , ja spesifi lehtialaindeksi tarvitaan yhteyttävän lehtialan ennustamiseen. Nämä parametrit perustuvat Härkönen ym. (2010) tutkimukseen.
- **NPP:GPP**, nettoprimaari tuotoksen (NPP) suhde bruttoprimaari tuotokseen ennustetaan keskipuun pituuden funktiona (Härkönen ym. 2010). Samaa funktiota käytetään koko Pohjois-Euroopalle.
- **Runkoon allukoitavan tuotoksen osuus** ennustetaan metsikön iän ja kasvupaikan rehevyyden funktiona (Härkönen ym. 2010).
- **Kuolleisuus** lasketaan Reineken (1933) indeksin avulla, jossa parametria a' säädetään aineistoon pohjautuen.
- **Yasso07** mallissa käytetään Pohjoismaista parametrisaatiota maaperän hiilen kehityksen ennustamiseksi.

5.3.2 Laskenta-aineisto

Laskelmat perustuivat VMI10 vuosina 2004-2008 mitattuihin metsä- ja kitumaan koeloihin (3734koelaa). VMI koeloihin perustuva otos yleistetään koko maalle puulajeittain, kasvupaikka- ja ikäluokka jakaumien mukaisesti. Laskelmissa kokonaispinta-ala (22,1 milj.ha) jakautui puuntuotannon metsämaahan 18,4 milj.ha ja ei käsiteltyyn osioon, 3,7 milj.ha, joka edustaa suojelualueita.

5.3.3 Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi

FORMIT mahdollistaa useiden erilaisten metsänhoidon menetelmien implementoinnin simuloinneissa. Metsänhoito kuvataan käsittelyketjuna, joka kontrolloi osamallien muuttujia metsänkäsittely-yksikössä (Forest Management Unit, FMU). Kussakin metsänkäsittely-yksikössä evaluoidaan muuttujia; istutustiheys, harvennusten lukumäärä, kiertoajan pituus, sekä puutavaralajien (tukki- ja kuitupuu, energiapuu, hukkarunkopuu, sekä hakkuutähde) osuudet kussakin hakkuussa. Tässä harjoituksessa metsänhoito noudatti TAPIOn metsänhoitosuosituksia (Äijälä ym. 2014). Hakkuutaso määritetään erillisellä kysyntäsyötteellä, joka tässä harjoituksessa noudatti luvun 2.1 mukaisia kolmea eri hakkuuskenaariota.

FORMIT sisältää luontaista poistumaa metsikön maksimitiheyden mukaan määrittävän Reineke indeksin lisäksi myös mahdollisuuden metsätuhojen mallintamiseen. Tämä on toteutettu varsin yksinkertaisesti vaikutuksena metsien bruttoprimaariutuokseen. Mallissa on määritetty pinta-ala, johon nykyisin kohdistuu metsätuhoja ja tämän pinta-alan mukaisella osuudella VMI koealoja esiintyy tuhoja. Tuhojen jakautuminen VMI koealojen välillä on satunnaistettu. Tuhon esiintyminen koealalla ei muuta seuraavan vuoden tuhon todennäköisyyttä. Tuhon esiintymisvuonna bruttoprimaariutuotos koealalla laskee 50% ja tuhon vaikutus vähenee lineaarisesti, kunnes 20 vuoden jälkeen bruttoprimaariutuotos saavuttaa metsikön todellisen tuotostason. Tässä harjoituksessa tuhoja ei mallinnettu.

5.3.4 Hiilen varastomuutosten ja muiden kasvihuonekaasujen päästöjen laskenta

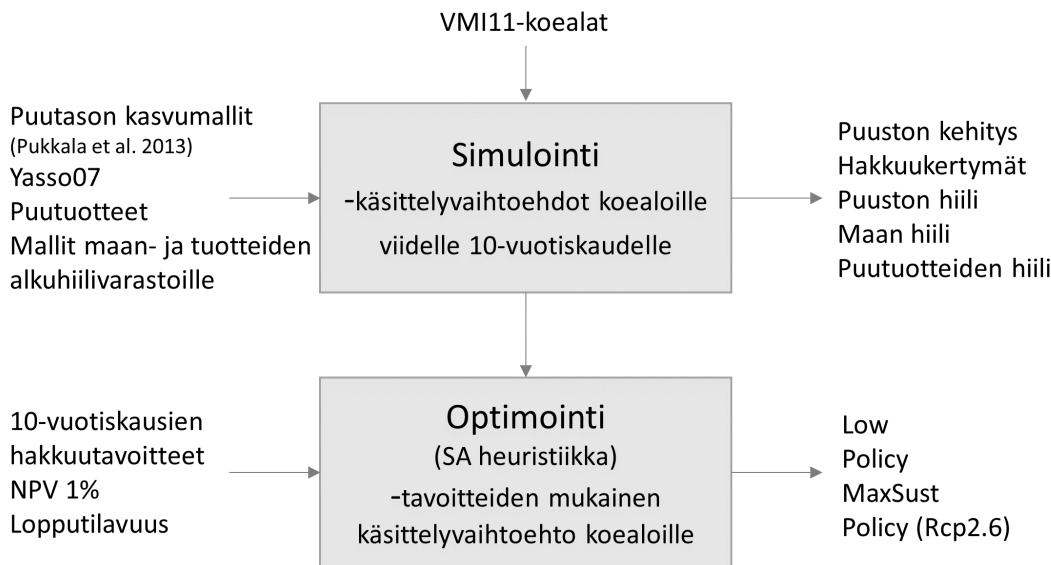
Puuston biomassojen laskenta perustuu Repolan (2008,2009) männyn, kuusen ja koivun (d,h) – malleihin. Puuston (runkopuu, oksat, lehdet ja neulaset sekä kanto ja juuret) hiilivaraston muutos laskettiin peräkkäisten kausien erotuksena puutason biomassamalleihin perustuen. Kuivamassan oletettiin sisältävän hiiltä yleisesti sovelletun vakion mukaisesti 50 % (IPCC 2003). Maaperän osalta mallinnettiin vain CO₂ dynamiikka kivennäismailla. FORMIT-mallissa oletetaan maaperän hiilen olevan alkutilanteessa tasapainossa alkutilan karikesyötteen kanssa.

5.4 MONSU

5.4.1 Keskeiset piirteet

Laskennat tehtiin Monsu-ohjelmistolla (Kuva 5.7, Pukkala 2011). Monsu koostuu kahdesta päämoduulista, joista toinen on tarkoitettu puuston kehityksen mallinnukseen ja erilaisten käsittelyvaihtoehtojen, kuten hakkuiden ja hoitotoimenpiteiden simulointiin ja toinen optimointiin, jossa valitaan paras vaihtoehto kuvioille perustuen annettuihin tavoitteisiin. Lämpimän kasvu-, kuolemis- ja kynnyskasvu-mallit perustuivat Pukkala ym. (2013) malleihin ja pituuskasvu Pukkala ym. (2009). Samoja malleja käytettiin kivennäis- ja turvemilla.

Monsu suunnittelumalli



Kuva 5.7 MONSU-mallin rakenne.

Ojitustilannetta käytettiin alentamaan kasvuennusteita jos ojitustilanne oli huonontunut. Laasasenahon (1982) malleja käytettiin puutavaralajien laskentaan apterauksessa ja laatu vähennykset tehtiin Mehtätalon (2002) ja Malisen ym. (2007) malleilla.

5.4.2 Laskenta-aineisto

Käytetty puustodata perustui VMI11 inventointiin, joka tehtiin vuosina 2009 - 2013 (Korhonen 2016). Analyseissä käytettiin pelkästään metsätalousmaan puuntuotannossa tai rajoitetussa puuntuotannossa olevaa maata, yhteensä 18.37 miljoonaa hehtaaria. Koealoista 16518 sijaitsi Etelä-Suomessa, 14996 Keski-Suomessa ja 14814 Pohjois-Suomessa, yhteensä koealoja oli 46328 (Taulukko 5.1). Etelä-Suomi sisälsi aikaisemmat Metsäkeskus alueet 1-6 pois lukien Pohjanmaan alueen metsäkeskus alueesta, joka kuului Keski-Suomeen. Keski-Suomeen kuuluivat myös keskukset 7-10 ja Pohjois-Suomeen 11-13 (Metsätalastollinen vuosikirja 2014). Laskennat tehtiin erikseen näille kolmelle alueelle.

5.4.3 Käsitteyvaihtoehtojen simulointi

Puustodata tuotiin Monsuun puulistoina. Puuttuvat pituudet ennustettiin malleilla (Heinonen ym. 2017). Suunnittelukauden pituudeksi asetettiin 50 vuotta, jaettuna viiteen 10-vuotiskauteen. Puuston kehitystä mallinnettiin simulaattorilla ja simulointisetukset olivat samat kaikille, paitsi ilmastonmuutoksen sisältävälle skenaariolle. Käsittelyvaihtoehtojen simulointi perustui hyvän metsänhoidon suosituksiin (Äijälä ym. 2014). Kuvioille simuloitiin myös vaihtoehtoja, joissa hakkuita oli myöhäistetty tai jätetty kokonaan pois. Kaikki harvennukset simuloitiin alaharvennuksina ja uudistustoimet uudistushakkuun jälkeen simuloitiin välittömästi.

60 % uudistusalaista tuoreilla kasvupaikoilla (MT) istutettiin kuusella, 30 % mänyllä ja loput koivulla. Rehevillä kasvupaikoilla (OMT) 80 % istutetuista taimista oli koivua ja loput kuusta. Kuivahkoilla kasvupaikoilla (VT) kylvettiin mäntyä ja karummilla kasvupaikoilla (C T) ja turvemilla käytettiin luontaista uudistamista. Istutetuille taimille ja kylvetyille siemenille oletettiin 10 % jalostushyöty kertomalla kasvuennusteet 1.1:llä (Haapanen ja Mikola 2008; Haapanen ym. 2016). Taimien luontaista syntymistä ennustettiin myös malleilla ja näihin ei sovellettu jalostushyötyä. Taimikonhoidot simuloitiin hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti (Äijälä ym. 2014).

Ilmastonmuutos otettiin huomioon käyttäen RCP2.6 -skenaariota. Ilmastonmuutoksen vaikutus puiden kasvuun ennustettiin ns. metamallilla, joka yhdistää ekosysteemimalleilla (Kellomäki ym. 2018) ja alkuperäkokeisiin perustuvilla malleilla ennustettuja kasvun lisiä (Berlin 2016, Pukkala 2017). Näissä malleissa otetaan huomioon se, että puut eivät ole geneettisesti sopeutuneet lämpiävään ilmastoon, minkä vuoksi kasvureaktio on pienempi kuin esimerkiksi silloin, kun ennustettu vaikutus perustuu lämpösumman ja kasvun suhteeseen nykymetsissä.

Hiilitaseen laskenta on esitelty liitteessä ”Hiilitaseen laskenta Monsussa” (Liite 2).

Monsulla tehtiin yhteensä 4 hakkuuskenaarioita. Skenaarioiden nimeksi annettiin Poliitiikka, MaxKestävä, Matala ja PoliitiikkaRcp2.6. Poliitiikka ja PoliitiikkaRcp2.6 skenaarioiden kymmenvuotiskausittaiset hakkuumäärät perustuivat Lehtonen ym. (2016) julkaisun Poliitiikka-skenaarioon, ollen n. 70 Mm³/v vuodessa (Taulukko 5.2). MaxKestävä -skenaarion hakkuumäärät (n. 80 Mm³/v) perustuivat saman tutkimuksen Suurin kestävä -skenaarioon. Matala-skenaarion hakkuumäärätavoitteet (n. 40 Mm³/v) saatiin kertomalla Poliitiikka-skenaarion hakkuumäärät 0.6:lla. Hakkuutavoitteet asetettiin erikseen mänty-, kuusi- ja lehtipuutukille sekä mänty-, kuusi- ja lehtipuukuidulle. Energiapuulle ei asetettu hakkuumäärätavoitteita. Suunnitteluongelman muotoilu ja optimointimenetelmä liitteessä 3.

Taulukko 5.1. Laskenta-alueina käytettyjen osa-alueiden tietoja. Alue koostuu puuntuotantoon käytetystä metsämaasta ja koskee vuotta 2016

| | Etelä-Suomi | Keski-Suomi | Pohjois-Suomi | Koko Suomi |
|--|-------------|-------------|---------------|------------|
|--|-------------|-------------|---------------|------------|

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Pinta-ala, milj. ha | 5.01 | 5.75 | 7.61 | 18.37 |
| Koealat, kpl | 16084 | 17257 | 13898 | 47239 |
| Tilavuus, milj. m ³ | 789 | 739 | 603 | 2131 |
| Tukkipuutilavuus, milj. m ³ | 324 | 257 | 125 | 706 |
| Kuitupuutilavuus, milj. m ³ | 465 | 485 | 478 | 1428 |
| Männyn tilavuus, milj. m ³ | 313 | 363 | 383 | 1059 |
| Kuusen tilavuus, milj. m ³ | 321 | 238 | 114 | 673 |
| Lehtipuun tilavuus, milj. m ³ | 155 | 139 | 106 | 400 |

Taulukko 5.2. Hakkuumäärätavoitteet puutavaralajeittain Poliitikka, MaxKestävä, Matala ja PoliitikkaRcp2.6 -skenaarioissa (miljoonaa m³/v)

| Skenaario | Poliitikka ja PoliitikkaRcp2.6 Etelä-Suomi | | | | | MaxKestävä Etelä-Suomi | | | | | Matala Etelä-Suomi | | | | |
|----------------|--|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 10-vuotiskausi | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mäntytukki | 4.6 | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 6.6 | 5.4 | 5.4 | 5.0 | 2.2 | 2.8 | 2.9 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Mäntykuitu | 5.0 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.6 | 5.5 | 5.3 | 5.2 | 4.9 | 3.5 | 3.0 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.3 |
| Kuusitukki | 7.6 | 7.3 | 7.0 | 7.0 | 7.0 | 7.4 | 8.6 | 8.6 | 9.0 | 12.4 | 4.6 | 4.4 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| Kuusikuitu | 4.9 | 5.6 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 4.4 | 5.7 | 6.2 | 6.7 | 10.2 | 3.0 | 3.3 | 3.4 | 3.4 | 3.4 |
| Lehtitukki | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.8 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Lehtikuitu | 2.8 | 2.8 | 2.6 | 2.6 | 2.5 | 4.3 | 4.2 | 4.1 | 4.2 | 3.6 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.5 |
| Yhteensä | 25.7 | 26.8 | 26.6 | 26.6 | 26.6 | 30.1 | 30.8 | 31.0 | 31.4 | 33.3 | 15.4 | 16.1 | 16.0 | 16.0 | 15.9 |
| | Keski-Suomi | | | | | Keski-Suomi | | | | | Keski-Suomi | | | | |
| 10-vuotiskausi | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mäntytukki | 4.2 | 5.2 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 6.4 | 6.6 | 7.1 | 7.1 | 4.6 | 2.5 | 3.1 | 3.4 | 3.4 | 3.4 |
| Mäntykuitu | 6.0 | 7.1 | 7.3 | 7.3 | 7.3 | 6.3 | 6.8 | 7.3 | 7.1 | 5.9 | 3.6 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Kuusitukki | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 6.5 | 6.0 | 5.3 | 5.4 | 8.4 | 2.8 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.9 |
| Kuusikuitu | 3.5 | 4.1 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 3.9 | 4.4 | 4.4 | 4.6 | 6.5 | 2.1 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Lehtitukki | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Lehtikuitu | 3.0 | 3.1 | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.6 | 3.7 | 3.4 | 3.3 | 2.5 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| Yhteensä | 21.9 | 24.8 | 25.5 | 25.5 | 25.5 | 27.6 | 28.6 | 28.6 | 28.6 | 28.7 | 13.1 | 14.9 | 15.3 | 15.3 | 15.3 |
| | Pohjois-Suomi | | | | | Pohjois-Suomi | | | | | Pohjois-Suomi | | | | |
| 10-vuotiskausi | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mäntytukki | 3.2 | 3.8 | 4.1 | 4.1 | 4.1 | 4.3 | 4.9 | 5.2 | 5.0 | 4.8 | 1.9 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.5 |
| Mäntykuitu | 6.4 | 7.8 | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 8.4 | 8.6 | 9.1 | 9.4 | 9.8 | 3.8 | 4.7 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Kuusitukki | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.9 | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| Kuusikuitu | 1.6 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.8 | 2.4 | 2.1 | 2.2 | 2.6 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |
| Lehtitukki | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Lehtikuitu | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.0 | 1.3 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |
| Yhteensä | 14.1 | 16.4 | 17.1 | 17.1 | 17.0 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 19.8 | 8.5 | 9.8 | 10.2 | 10.2 | 10.2 |
| Yht. Suomi | 61.7 | 68.0 | 69.2 | 69.2 | 69.1 | 77.5 | 79.3 | 79.4 | 79.9 | 81.8 | 37.0 | 40.8 | 41.5 | 41.5 | 41.5 |

5.5 PREBAS

5.5.1 Keskeiset piirteet

PREBAS-malli (Kuva 5.8, Valentine ja Mäkelä, 2005. Peltoniemi ym. 2015, Minunno ym. 2016, Minunno ym. 2018) on metsien hiilitaseita ja kasvua ennustava malli (<https://github.com/checcomi/Rprebas>). Muista malleista poiketen PREBAS laskee metsien kasvun ja hiilitaseen lähtien yhteytystuotoksesta ja käyttäen säätietoja, jotka vaikuttavat yhteytysolosuhteisiin ja metsikön vesitaseeseen. Lähestymistapa on yleinen kasvillisuuden prosessimalleissa, joilla kuvataan mm. kasvillisuuden ja ilmaston vuorovaikutusta ilmastomalleissa.

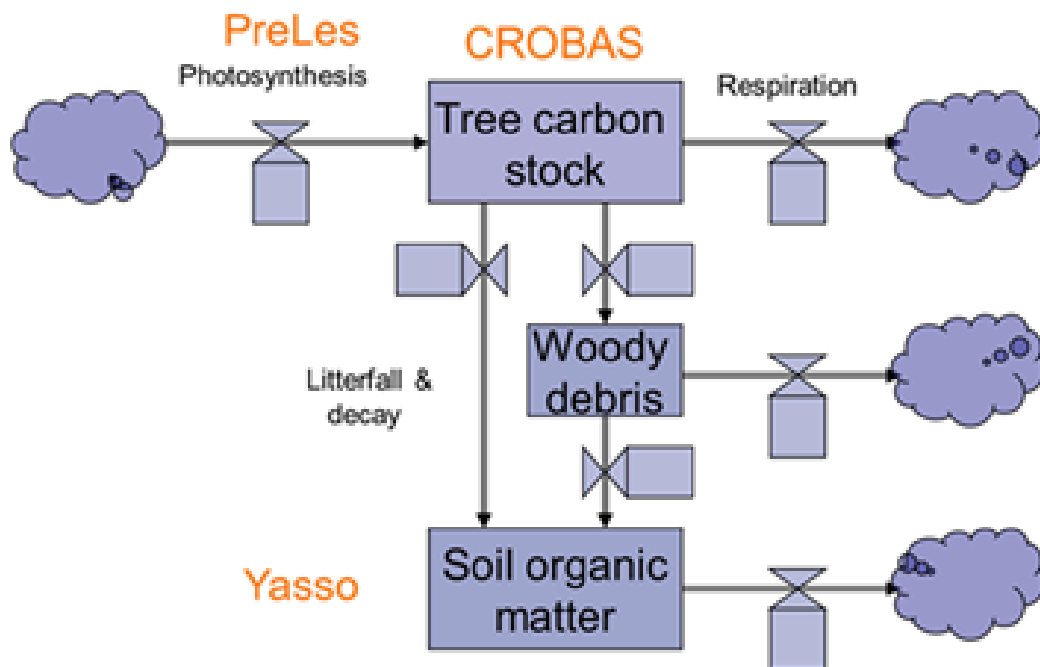
PREBAS käyttää metsien yhteytystuotoksen (GPP) ja kokonaishaidunnan (ET) laskemiseen tietoa metsikön yhteyttävästä biomassasta, puulajista, sekä sääolosuhteista (Peltoniemi ym. 2015a). Metsikön yhteytys ja vesitase ovat kytkeytyneitä toisiinsa. Lehtibiomassatiedon avulla lasketaan auringonsäteilyn sidonta latvuksessa, joka vaikuttaa suoraan latvuksen bruttoprimäärituotokseen. Lähestymistapa perustuu valonkäytön tehokkuuteen, johon vaikuttaa itse säteilyn voimakkuus, lämpötila, ilmakehän vesihöyryn paineen vajuus (VPD), maaperän vesitilanne sekä ilmakehän CO₂-pitoisuus. Yhteytystä kuvaava malli on kalibroitu metsikköjen mitattuun kaasunvaihtoon käyttäen mittaustietoja 10 koealalta Suomesta ja Ruotsista (Minunno ym. 2016). CO₂-vaikutus on kuvattu artikkelissa Minunno ym. 2016. Ennusteita yhteytykselle koko Suomen tasolla on aiemmin vertailtu toiseen prosessimalliin julkaisussa Peltoniemi ym. 2015b ja yhteytystuotoksen epävarmuuksia on tutkittu artikkelissa Kalliokoski ym. 2018.

Kasvun laskenta vaatii lähtötietoinaan tietoa metsien ravinteisuudesta, keskipituudesta ja – läpimitasta sekä metsikön pohjapinta-alasta. Varsinainen metsikön kasvu ennustetaan edellisten muuttujien sekä vuotuisen yhteytystuotoksen avulla. Kasvumallin on kalibroitu käyttäen mittaustietoa kuusen ja männyn kasvusta Luken koemetsiköistä, sekä mittaustietoa koivun kasvusta VML:n pysyviltä koealoilta (Minunno ym. käsikirjoitus).

PREBAS-mallin kasvun ja puuston sisäisen hiilidynamiikan laskenta käyttää syötteenään ennustettua vuotuista yhteytystä (ks. edellä). Osa yhteytetystä hiilestä kuluu välittömästi puun ositteiden ylläpitoon ja kasvuun liittyvissä soluprosesseissa ja osa hiilestä kasvattaa puiden biomassaa. Jälkimmäinen osuus sijoittuu eri ositteiden kasvuun (neulaset, runko, juuret, jne) puiden rakennetta kuvaavien sääntöjen mukaan. Puiden rakenne ja siten ositteiden suhteellinen kasvu on kuvattu teoreettisen mallin avulla (Valentine and Mäkelä 2005, Mäkelä ym. 2016). Neulasten ja hienojuurten uusiutumisenopeus riippuu ympäristöstä (Tupek ym. 2015). Seuraavan vuoden yhteytys ja kasvu lasketaan vuoden lopussa päivitetyn metsikkötiedon perusteella. PREBAS ennustaa puuston luonnollista (kilpaillusta johtuvaa)

kuolemista puuston itseharvenemismallin avulla (Reineke ym. 1933; Pretzsch H. ym. 2014). PREBAS ei ennusta tällä hetkellä puuston luontaista uusiutumista, vaan metsät aina istutetaan.

Tässä työssä mallin ennusteita metsien puuston hiilitaseista ja kasvusta täydennettiin Yasso15-mallilla (<https://github.com/JariLiski/Yasso15>), joka perustuu Yasso07-malliin (Liski ym. 1995, Tuomi ym. 2009). Yasso-malli laskee maaperän hiilitasetta sille annettujen karikesyöte- ja ilmastotietojen perusteella. Yasso-malli on rajoittunut kivennäismaille ja kuvaa karikkeen hajoamista aerobisissa olosuhteissa. Tässä työssä Yassoa sovellettiin myös turvemaille sillä oletuksella, että työssä käsitellään myös turvemaille puuston karikkeesta seurannutta hiilivarastoa maaperässä ja sen hajoamista maan pintakerroksissa. Koko metsikön hiilitase laskettiin yhdistämällä tiedot puuston ja maaperän hiilitaseesta.



Kuva 5.8 PREBAS-mallin rakenne (Minunno ym. 2018). Malli koostuu kaasunvaihtoa ennustavasta PRELES-mallista, ja puuston kasvua ennustavasta CROBAS-mallista. Malliin on yhdistetty Yasso-maamalli.

5.5.2 Laskenta-aineisto

PREBAS käytti puustoa kuvaavina lähtötietoinaan monilähde-VMI –aineistoa (MVMI) vuodelta 2013, joka kattoi koko Suomen metsäpinta-alan (metsämaa, kitumaa, joutomaa). MVMI-aineisto perustuu metsien 11. inventointiin (VMI11) vuosina 2009–2013 mitattuihin koeloihin. Metsikkömuuttujien jakauma MVMI-aineistossa on kapeampi kuin niiden pohjalla olevassa VMI-koelamateriaalissa, jolla voi olla vaikutusta tuloksiin. MVMI:n tulosten empiirisiä virheestimaatteja pienalueille on käsitellyt Katila 2006.

Lisäksi MVMI-estimaattien tarkkuutta kehitysluokkajakauman pinta-alojen ja kokonaistilavuuden arvionnissa on käsitelty julkaisuissa Tomppo ym. 2008.

MVMI-aineisto sisältää arviot puustomuuttujista ja maaperämuuttujista 16 x 16 m² soluissa. Simulointi toteutettiin metsäkeskuksittain valitsemalla laskentaan kustakin metsäkeskuksesta 10 000 solua. Näiden 10 000 solun oletettiin kuvaavan metsiköiden vallitsevaa jakaumaa metsäkeskuksessa.

Laskennassa käytettiin solujen tietoja solun metsikön puuston pituudesta, runkoläpimitasta, puulajien pohjapinta-alaosuudesta (mänty, kuusi, muu), maaluokasta, sekä kasvupaikkatyypistä. PREBAS-laskennassa ei huomioitu aluskasvillisuuden vaikutusta hiilitaseisiin.

5.5.3 Käsitteyvaihtoehtojen simulointi

Skenaarioiden mukaiset hakkuut kohdistettiin koaloille metsähoidon suosituksia (<http://www.metsanhoitosuosituksset.fi>) noudattaen ja ainoastaan puuntuotannon maapinta-alalle. Tätä varten MVMI-karttamateriaalista tunnistettiin erikseen yksityisillä ja valtion mailla olevat suojelualueet osa-aineistosta¹ sekä kitu- ja joutomaan pikselit, joilla ei suoritettu metsähoitotoimenpiteitä.

Metsänhoitosuosituksien perusteella valittiin puuntuotannon maan metsiköistä osajoukko, johon kohdistettiin metsänkäsittelytoimenpiteitä. Päätehakkuiden osalta metsiköt valittiin tähän osajoukkoon suosituksen mukaisen päätehakuun keskiläpimittojen perusteella. Harvennuksien osalta valinta tehtiin noudattaen valtapituuteen ja pohjapinta-alaan perustuvia kyseisen alueen harvennuskäyriä. Metsänhoitotoimenpiteet ja siten poistuma kohdistettiin tähän osajoukkoon satunnaistaen kohteiden valinta metsäkeskuksen sisällä. Metsäkeskuksien kokonaispoistumalle asetettiin lisäksi skenaarioiden (ks. alla) mukaiset ylärajat. Metsänhoitosuosituksen noudattamisen takia kokonaispoistumaa ei välttämättä aina saavutettu, eikä myöskään poistuman vajausta siirretty muille metsäkeskusalueille. Tästä syystä koko maan, tai kolmen suuralueen, poistuma voi jäädä pienemmäksi kuin ennalta skenaariossa määritettiin. Käytännössä näin havaittiin käyvän MaxSust-skenaariossa. Useimmissa tapauksissa vuotuinen poistuman yläraja kuitenkin saavutettiin. Ylärajan saavuttamisen jälkeen metsänhoitotoimenpiteitä ei enää tehty, vaan nämä metsiköt jäivät käsittelemättä, ja tulivat käsittelyyn mahdollisesti vasta seuraavana vuonna.

¹ http://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Paikkatietoaineistot#L

Kokonaispoistuma metsistä (Runkopuu + energiapuu) metsäkeskuksille määritettiin MELA-mallin skenaarioiden pohjalta Base, Policy ja MaxSust-skenaarioille. MELA:n määrittämä poistuma Pohjois-, Keski- ja Etelä-Suomelle jaettiin PREBAS-mallin käyttämille metsäkeskuksille niiden puustojen kokonaistilavuuksien suhteissa laskennan alussa.

Low-skenaario (poistuma 40 mill. m³) puuttui MELA-simulaatioista, joten sen hakkuut jaettiin suuraluiden sisältämille metsäkeskuksille samoissa suhteissa kuin Base-skenaariossakin. Kunkin metsäkeskuksen sisällä poistuma jaettiin satunnaisesti niille metsiköille, jotka täyttivät päätehakkuu- ja harvennuskriteerit. Hakkuiden ja harvennusten suorittaminen lopetettiin siinä vaiheessa kun metsäkeskukselle määritetty kokonaispoistuma saavutettiin.

Metsäkeskuksille ennustetut tulokset koostettiin lopuksi suuraluetasolle, jotta tulokset olisivat yhteneväisiä ilmastopaneelityön määrittelyjen ja muiden mallien ennusteiden kanssa.

PREBAS-mallin maaperän hiili ja metsien kokonaishiilivarastot ovat vertailtavissa ainoastaan eri skenaarioiden välillä, vertaillen maaperän hiiliarvioita toisiinsa samoina simulointivuosina. Näitä eroja voidaan verrata myös muiden mallien vastaaviin arvioihin. Tämä johtuu siitä, että maaperän hiilivarastot perustuvat aina oletuksiin aiemmasta ilmastosta ja hiilisyötteestä maaperään. Tässä työssä ei keskitytty tasapainovaraston arviointiin, joten maaperän alustaminen tehtiin yksinkertaistaen. Alustaminen suoritettiin ajamalla PREBAS-malli oletettuun dynaamiseen tasapainoon laskentajakson alussa vuoden 2013 MVMI-puustotiedoilla ja keskimääräisellä poistumalla ja ilmastolla jaksolta 1990-2013. Näin saatiin varsin korkea arvio maaperän hiilivarastolle, ja selkeä laskeva trendi varsinaisiin ennusteisiin. PREBAS:n osalta on huomioitava että mallin alustus ei koske pelkästään maaperää, vaan myös puuston alustaminen vaikuttaa ennustettuihin maaperän hiilivaraston trendeihin. Maaperän hiilivaraston trendin poistamiseksi simuloitiin edellä kuvatulla tavalla saadusta lähtötilanteesta 50 vuoden jakso vertailujakson (1980-2010) säällä ja poistumaskenaariolla, joka perustui MELA:n aikaisempiin ennusteisiin ns. Base-skenaariossa (69.2-73.1 mill m³/a). Tämän jakson päätteeksi saatiin uusi estimaatti maaperän hiilen tasapainovarastolle, josta varsinainen ennustejakson simulointi alkoi. Maaperän alustaminen tehtiin metsäkeskukselle puolajeyttain.

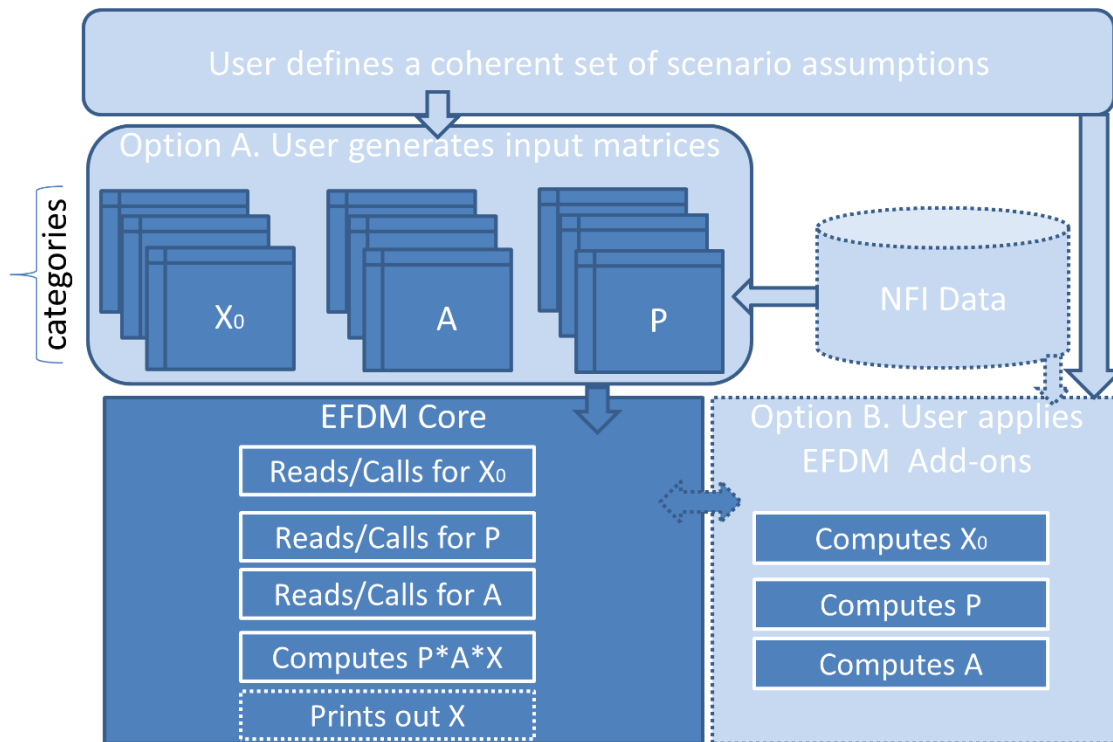
Mallilaskelmissa käytettiin ilmastoennusteita vuosille 2014-2099, jotka oli laadittu ilmastomalleilla noudattaen RCP-skenaarioiden mukaista ilmakehän CO₂-kehitystä. Laskennassa käytettiin viiden eri ilmastomallin (CanESM2, GFDL, CNRM, HadGem2, MIROC) ennusteita kolmessa eri RCP-skenaariossa (RCP 2.6, 4.5, 8.5). Vertailujakson (1981-2010) ilmastotietoina käytettiin CanESM2-mallin laskemaa ja Suomelle harhakorjattua ennustetta. Harhakorjauksessa käytettiin sääasematietoihin pohjautuvia ennusteita 10 km ennusteverkolle (Ruosteenoja ym. 2016)

5.6 EFDM

5.6.1 Keskeiset piirteet

European Forestry Dynamics Model (EFDM) on siirtymätodennäköisyyksiin perustuva aluepohjainen matriisimalli (Kuva 5.9). EFDM-laskennassa tarkasteltava metsäpinta-ala luokitellaan metsän tulevaan kehittymiseen ja metsänhoitomenetelmiin vaikuttavien tekijöiden suhteen (esim. maankäytön rajoite-, kasvupaikkatyyppi-, pääpuulaji-, ikä- ja tilavuusluokkiin) ja luokittelun tulos esitetään moniulotteisessa matriisissa, jonka solujen arvot kuvaavat em. luokkiin kuuluvaa metsäpinta-alaa. Jokaiselle matriisin solulle määritellään siirtymätodennäköisyydet metsäpinta-alan siirtymiselle matriisin solusta toiseen yhden simulointiaskeleen aikana. Siirtymätodennäköisyydet määritellään erikseen eri tavalla vaikuttaville prosesseille (esim. luonnonprosessien tai erilaiset käsittelyt) ja eri prosessien osuus kussakin solussa olevaan pinta-alaan määritellään ns. toimenpideosuuksina, jotka summautuvat yhteen. Metsäpinta-alan kehitys yhden simulointiaskeleen aikana saadaan kertomalla metsän tilaa kuvaava matriisi soluihin kohdistuvien toimenpiteiden osuuksilla ja niiden siirtymätodennäköisyysmatriiseilla. Näitä simulointiaskeleita (tässä viisi vuotta) toistetaan halutun simulointijakson ajan. Koska simulaatiot kuvaavat metsäpinta-alan kehittymistä, esim. kokonaistilavuuden kehittyminen saadaan kertomalla matriisin solujen pinta-alat solukohtaisilla muunnoskerroimilla (esim. tilavuuden keskiarvo solussa, m³/ha).

Tässä raportoitu laskenta on toteutettu EFDM:n versiolla 2.0, jonka R-kielinen toteutus on ladattavissa URL-osoitteesta <https://github.com/ec-jrc/efdm>. Ladattavissa oleva versio sisältää yllä kuvatun matriisimallin geneerisen laskentarutiinin, joka on kuvattu yksityiskohtaisemmin raportissa (Packalen ym. 2014). Mallin tarvitsemat siirtymätodennäköisyydet, toimenpiteiden osuudet ja muunnoskerroimet tulee määrittää kuhunkin laskentatilanteeseen. Ne voidaan periaatteessa laskea pysyvien koealojen toistuvilta mittauksilta ilman tilastollisia mallinsovitusmenetelmiä, mutta käytännössä pareittaisten havaintojen vähyyden takia parametrit on määritetty mittausten, simulaatioiden ja mallinsovitusmenetelmien yhdistelmänä. Mallin parametrusointi tätä laskentaa varten vastaa suurelta osin artikkelissa Vauhkonen & Packalen (2017) kuvattua työnkulkua nykyilmaston osalta ja Vauhkonen & Packalen (2018) RCP2.6-ilmaston osalta. Yksityiskohdat EFDM:n parametrusoinnista jätetään edellä mainittuihin julkaisuihin, mutta työvaiheet kuvataan alla lyhyesti erityisesti niiden vaiheiden osalta, jotka poikkeavat edellä mainituista julkaisuista.



1

Kuva 5.9 EFDM-mallin rakenne (Packalen ym. 2014). X viittaa metsäpinta-alamatriisiin (ja X_0 sen alkutilaan), A toimenpiteiden todennäköisyysmatriisiin ja P siirtymätodennäköisyysmatriiseihin.

5.6.2 Laskenta-aineisto ja sen luokittelu matriisimuotoon

Simulointiaineisto vastaa MELA-mallin käyttämää VMI11-koelata-aineistoa lukuun ottamatta alueille Ylä-Lappi ja Ahvenanmaa sijoittuvia koelataja. Näitä alueita ei ole toistaiseksi huomioitu EFDM-laskelmissa niiden vähäisen puuntuotannollisen merkityksen ja poikkeavan VMI-otanta-asetelman vuoksi. Metsän tulevaa kehitystä simuloitiin ensisijaisesti ja rajoitetusti puuntuotantoon käytettävissä olevalle metsämaalle sijoittuvilla 45 990 koelatalalla, joiden kattama pinta-ala oli 18,08 Mha ja lähtötilavuus n. 2030 Mm³. EFDM-mallin siirtymätodennäköisyyksien määrittämiseen käytettiin VMI10- ja VMI11-inventointien mittauksia yht. 10 855 pysyvältä koelatalalta.

Aineisto jaettiin matriiseihin erikseen ns. staattisten ja dynaamisten tunnusten suhteen. Simuloinneissa metsäpinta-ala liikkuu siirtymätodennäköisyyksien perusteella metsän dynamiikkaa kuvaavien tunnusten suhteen, jotka on määritetty erikseen kullekin staattiselle

tunnukselle (joiden sisällä metsäpinta-ala pysyy vakiona). Staattisia tunnuksia olivat maanosa (Etelä-Suomi, Keski-Suomi, Pohjois-Suomi), maankäytön rajoite (ensisijaisesti tai rajoitetusti puuntuotannossa), kasvupaikan puuntuotantokykyä kuvaava veroluokka (5 luokkaa VMI-aineistosta) ja valtapuulaji (mänty, kuusi tai lehtipuut yhdessä luokassa). Metsän dynamiikkaa kuvaavat tunnuksot olivat ikä ja keskitilavuus ensisijaisessa puuntuotannossa koealoilla ja runkoluku ja tilavuus rajoitetun puuntuotannon koealoilla. Jälkimmäiset tunnuksot olivat käytössä käyttörajoitteen vuoksi (näiden koealojen päätehakkuu korvattiin yläharvennuksella ja sitä seuraava kehitys simuloitiin eri-ikäisrakenteisena), mutta tällä valinnalla ei ole suurta merkitystä lopputuloksen kannalta. Edellä mainitut jatkuvat tunnuksot luokiteltiin artikkelien Vauhkonen & Packalen (2017, 2018) liitteessä kuvattujen luokkarajojen perusteella.

5.6.3 Siirtymätodennäköisyydet

Siirtymätodennäköisyydet määritettiin erikseen luonnonprosesseille (ei käsittelyjä), harvennuksille ja päätehakkuulle. Luonnonprosessien mukaiset siirtymätodennäköisyydet määritettiin erikseen ”nykyilmastolle” (pysyvät VMI-koealat) ja olettaen RCP2.6-skenaarion mukainen kasvun lisäys. Jälkimmäisessä lasketaan, paljonko enemmän tilavuuden pitäisi kasvaa vuonna 2050 nykyisiin siirtymätodennäköisyyksiin verrattuna Matalan ym. (2005) mallien mukaan ilmakehän CO₂ pitoisuuden ja ilman lämpötilan ollessa parametreina. Siirtymätodennäköisyyksiä lähdetään säätämään kohti tuota tasoa (ts. kasvussa on tällainen trendi), mutta siirtymä ei ole lineaarinen, vaan siinä huomioidaan aikaisemmassa kasvun tasossa havaittua stokastista vaihtelua, jota toistetaan useita kertoja yhdistettynä EFDM:n luokitteluun.

Siirtymätodennäköisyydet määritettiin käytännössä kahdessa vaiheessa: muodostamalla ns. paridata peräkkäisistä havainnoista ja laskemalla siirtymätodennäköisyydet näiden havaintojen perusteella. Paridata luonnonprosessien (ei käsittelyjä) mallintamista varten määritettiin VMI:n pysyvien koealojen tilavuuden ja runkoluvun erotuksena koealoilla, joilla ei havaittu käsittelyjä mittausjakson aikana, jotka pystyttiin linkittämään varmuudella aineistojen välillä ja joiden tilavuuden erotus oli positiivinen. Paridata sisältää näiden koealojen kasvun ja luonnonpoistuman, mutta ei voimakkaiden (tilavuutta alentavien) tuhojen vaikutusta. RCP2.6-ilmastovaikutuksen mallintamisessa hiilidioksidin ja lämpötilan oletettiin kehittyvän (Meinshausen ym. 2011, Ruosteenoja ym. 2016). Näiden oletettiin tuottavan tilavuuden lisäkasvulle trendi, joka mallinnettiin erilaisille koealoille Matala ym. (2015, 2016) malleilla. Toistamalla laskentaa lämpötilan kehittymistä kuvaaman todennäköisyysjakauman eri arvoilla ja kasvutrendiin lisätyn stokastisen vaihtelun kanssa (Pasanen 1998) saatiin arvio pinta-alaosuudesta, jonka tilavuuden siirtymät piti mallintaa nykyilmastoa voimakkaampina (ks.

yksityiskohdat Vauhkonen & Packalen 2018). Huomaa että tässä laskennassa RC2.6-skenaarion mukainen lisäkasvu vastaa tämän skenaarion lämpötilan kehittymisen odotusarvoa, mutta em. viitteessä esitetään mahdollinen kehitys huomioiden koko lämpötilajakauma.

Paridata harvennuksille saatiin simuloimalla harvennusta edeltävä ja harvennuksen jälkeinen puusto niille koealoille, joilla VMI-mittauksen mukaan oli toimenpidetarve seuraavan viiden vuoden aikana. Harvennuksessa poistettavien puiden pohjapinta-ala simuloitiin alaharvennuksena joko hyvän metsänhoidon ohjeiden mukaisten harvennusmallien perusteella (puustot, joissa pohjapinta-ala > 10 m²/ha ja keskipituus > 10 m) tai ensiharvennuksena siten, että harvennuksen jälkeinen puusto koostui n. 1000 rungosta. Rajoitetun puuntuotannon kohteiden yläharvennukset simuloitiin Pukkala ym. (2015) kaavan 2 ja korkokannan 3% mukaisesti. Poistettavasta pohjapinta-alasta 50% kohdennettiin järjestyksessä pienimpiin (alaharvennus) tai suurimpiin puihin (yläharvennus) ja loput tasavälein kokojakauman muihin osiin harvennuksen realistista toteutusta mukaillen.

Lopullisten siirtymätodennäköisyyksien laskennassa hyödynnettiin ns. Bayeslaista menetelmää (Sirkiä 2012). Siirtymätodennäköisyydet lasketaan aluksi paridatan perusteella dynaamisille tunnuksille yli kaikkien staattisten tunnusten. Tätä yli populaation laskettua paridataa käytetään ns. priorina, jota tarkennetaan iteratiivisesti kuhunkin staattiseen tunnukseen kuuluvia havaintoja painottaen. Bayes-laskennan tarkoituksena on tuottaa siirtymätodennäköisyydet moniulotteisen matriisin jokaiselle solulle niin tarkasti kuin mahdollista, mutta puuttuvien havaintojen vaikutusta kompensoiden. Kaikki päätehakkuukohteet siirrettiin kiertoajan alkuun tämän laskennan ulkopuolella. Harvennusten jälkeinen kasvu simuloitiin käyttämällä harventamattomille koealoille laskettuja siirtymätodennäköisyyksiä.

5.6.4 Toimenpiteiden osuudet ja kokonaishakkuumäärät

Kunkin matriisiin solun edustamalle pinta-alalle simuloidaan tuleva luonnonprosessin / harvennuksen / päätehakkuun mukainen tuleva kehitys. Kunkin siirtymämatriisin osuus määräytyy ns. toimenpideosuuksien perusteella. Nämä osuudet määritettiin jokaisella simulointiaskelalla iteroimalla hyvän metsänhoidon mukaisia toimenpideosuuksia siten, että ne toteuttavat MELA:n ratkaisujen mukaisen kokonaishakkuumäärän. Alkuarvot toimenpideosuuksille laskettiin kuhunkin ikä/tilavuus- ja runkoluku/tilavuus-luokkaan kuuluville koealoille määritettyjen ei käsittelyä / harvennus / päätehakkuu osuuksina (ks. Vauhkonen & Packalen, kuva 1). Käsittelyjen osuuksia lisättiin (tavoitetta pienempi hakkuumäärä) tai vähennettiin samansuuruisesti kaikissa matriisin soluissa kunnes MELA-skenaarioiden mukainen kokonaishakkuumäärä saavutettiin.

Tulosten tarkastelussa tulee huomata, että EFDM:n hakkuut vastaavat MELA-skenaarioita pelkkien kokonaismäärien osalta. Hakkuiden ajallista, puulajeittaista tai alueellista kohdentumista ei ole huomioitu eivätkä ratkaisut ole välttämättä näiltä osin järkeviä. EFDM:llä ei yritetty ratkaista suurinta kestävästä hakkuumäärää, jonka määrittelmä edellyttää näiden tekijöiden huomiointia. Tässä raportoitujen laskelmien hakkuujärjestyksissä painottuvat hyvän metsänhoidon suositusten suhteen kiireellisesti toimenpiteitä vaativat kohteet, mikä vaikuttaa metsän tulevaan kehitykseen. Vaikutuksen suuruutta voi arvioida useiden eri tavalla kohdennettujen hakkuiden perusteella (ks. Vauhkonen & Packalen, 2017, 2018).

6. Viitteet

Berlin ym. 2016. Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland. *Silva Fennica* 50(3), article id 1562.

Cajander, AK. 1949. Forest types and their significance. *Acta Forestalia Fennica* 56:5

Dosio, A. 2016. Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121: 5488–5511

Dowsland, KA. 1993. Simulated annealing. In: *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. John Wiley & Sons Inc 20-69

Finnish statistical yearbook of forestry (2014) Finnish Forest Research Institute. 428 p. (ed. Peltola A.) <https://cordis.europa.eu/project/rcn/104508/reporting/en>

Giorgetta ym. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 572-597.

Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. 2003. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. ISBN 4-88788-003-0. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>

Haapanen ym. 2016. Realised and projected gains in growth, quality and simulated yield of genetically improved Scots pine in southern Finland. *Eur J For Res* 135(6):997–1009

Haapanen & Mikola. 2008. Metsänjalostus 2050—Pitkän aikavälin metsänjalostusohjelma. [Forest Tree Breeding 2050—a plan for long-term tree breeding]. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 71. [In Finnish]

Heikkilä ym. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. 56 p. ISBN 951-40-1464-4 (pdf), ISSN 1795-150X (e-series). <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp010.htm>.

Heinonen ym. 2017. Scenario analyses for the effects of harvesting intensity on development of forest resources, timber supply, carbon balance and biodiversity of Finnish forestry. *For Policy Econ* 80:80–98.

http://www.metsanhoitosuosituks.fi/wp-content/uploads/2016/08/Metsanhoidon_suosituks_tuometsienhoitoon_Tapio_2015.pdf

Hynynen ym. 2002. Models for predicting the stand development – description of biological processes in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.

Härkönen ym. 2019. A climate-sensitive forest model for assessing impacts of forest management in Europe. Hyväksytty julkaistavaksi Environmental Modelling & Software julkaisusarjassa.

Härkönen ym. 2008. Estimating annual GPP, NPP and stem growth in Finland using summary models. Forest Ecology and Management 259:524-533

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. 590 s.

Jutras ym. 2003. Modeling Mortality of Individual Trees in Drained Peatland Sites in Finland. Silva Fennica 37(2):235-251.

Kalliokoski ym. 2018. Decomposing sources of uncertainty in climate change projections of boreal forest primary production. Agricultural and Forest Meteorology 262:192-205.

Korhonen ym. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 59. 86 s.

Katila M. 2006 Empirical errors of small area estimates from the multisource National Forest Inventory in Eastern Finland. Silva Fennica vol. 40 no. 4 article id 324. <https://doi.org/10.14214/sf.324>

Kellomäki ym. 2018. Temporal and spatial change in diameter growth of boreal Scots pine, Norway spruce and birch under recent-generation (CMIP5) global climate model projections for the 21st century. Forests 9(3), 118; doi:10.3390/f9030118

Koistinen ym. 2016. Metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen, työopas. Tapion julkaisuja. http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/MHS-Energiapuun-korjuun-suositukset_verkkojulkaisu2.pdf.

Koljonen ym. 2017. Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017

Korhonen, KT. 2016. National forest inventories: Assessment of wood availability and use : Finland. In: National forest inventories : Assessment of wood availability and use / Eds. Vidal C, Alberdi I, Hernandez L, Redmond JJ. Springer International Publishing Switzerland. p. 369-384

Kuitto ym. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Summary: Mechanized cutting and forest haulage. Metsätehon tiedotus 410 (Metsäteho Report 410). 38 pp. + appendices.

Kärhä ym. 2006. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. Metsätehon raportti 193. Metsäteho Oy, Helsinki. 79 + 3 liitettä p. ISSN 1459-773X, ISSN 1796-2374 (PDF). http://www.metsateho.fi/uploads/Raportti_193_KK_ym.pdf.

Kärhä ym. 2004. Hakkuutähteen paalauksen ja paalien metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 179. Metsäteho Oy, Helsinki. 88 + 6 s. ISSN 1459-773X, ISSN 1796-2374 (PDF). <http://www.metsateho.fi/uploads/4djb1xxw0otzss5.pdf>. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä ja –tilavuusyhtälöt. Comm. inst. for. Fenn. 108. 74 s.

- Laitila, J. 2010. Kantojen korjuun tuottavuus. Metlan työraportteja 150. Metsäntutkimuslaitos. 29 p. ISBN 978-951-40-2225-8 (pdf), ISSN 1795-150X (e-series). <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp150.htm>.
- Laitila ym. 2007. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. Metlan työraportteja 46. Metsäntutkimuslaitos. 26 p. ISBN 978-951-40-2033-9 (PDF), ISSN 1795-150X. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp046.htm>.
- Laitila ym. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogiikka. Metlan työraportteja 3. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. 58 p. ISBN 951-40-1932-6 (pdf), ISSN 1795-150X (e-series). <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm>.
- Lappi, J. 1992. JLP: A linear programming package for management planning. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 414. 134 pp. ISBN 951-40-1218-6, ISSN 0358-4283.
- Lehtonen ym. 2016. Skenaariolaskelmiin perustuva puuston ja metsien kasvihuonekaasutaseen kehitys vuoteen 2045. Selvitys maa- ja metsätalousministeriölle vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian valmistelua varten. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 36/2016.
- Malinen ym. (2007) Comparing model-based approaches with bucking simulation-based approach in the prediction of timber assortment recovery. *Forestry* 80 (3):309–321
- Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Survey. Report 45. 73p.
- Matala ym. 2005. Introducing effects of temperature and CO₂ elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. *Ecol. Mod.* 181, 173-190.
- Matala ym. 2006. Modelling the response of tree growth to temperature and CO₂ elevation as related to the fertility and current temperature sum of a site. *Ecol. Mod.* 199, 39-52.
- Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukkivähennysmallit männylle, kuuselle, koivulle ja haavalle. [National tree-level log defect models for pine, spruce and birch]. *Metsätieteen aikakauskirja*, 4/2002:575–591
- Meinshausen ym. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* 109:213, doi: 10.1007/s10584-011-0156-z
- MELA (2015) Calibration of the tree basal-area growth models. <http://mela2.metla.fi/mela/tupa/index-en.php> ...Assumptions. [accessed 15 May 2017]
- MELA2012 Reference Manual (2nd edition) (2013) The Finnish Forest Research Institute. 666. ISBN 978-951-40-2451-1 (PDF)
- Metsäalan palkkauksen koulutusaineisto. 2010. Metsäalan työehtosopimus 1.6.2010 - 31.8.2012 - liite. Maaseudun Työnantajaliitto, Metsähallitus, Metsäteollisuus ry, Yksityismetsätalouden Työntajat, Puu- ja erityisalojen liitto.
- Minunno ym. manuscript, Data assimilation of permanent growth experiments and national forest inventory into carbon balance model PREBAS
- Mäkelä ym. 2008. Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: analysis of eddy covariance data at five contrasting conifer sites in Europe. *Glob Change Biol* 14:92-108
- Mäkelä, A. 2016. Calibration and validation of a semi-empirical flux ecosystem model for coniferous forests in the Boreal region. *Ecological Modelling*. 341, 37-52.

Mäkelä ym. 2016. Bridging empirical and carbon-balance based forest site productivity - significance of below-ground allocation. *Forest Ecology and Management* 372:64-77.

National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Submission to the European Union 15 January 2018. Greenhouse gas emissions in Finland 1990-2016.

Ojanen ym. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411-421.

Ojansuu & Henttonen. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen ilmatieteen laitoksen mittautustiedoista. *Silva Fennica* 17: 143-160.

Ojansuu ym. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000 –versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s.

Ojansuu, R. 1996. Kangasmaiden kasvupaikan kuvaus MELA-järjestelmässä. (Description of mineral soils in the MELA System, in Finnish). In: Hynynen, J. & Ojansuu R. (eds.). 1996. Puuston Natural resources and bioeconomy studies 7/2017.kehityksen ennustaminen - MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612 (Finnish Forest Research Institute, Research Papers 612): 39-56. ISBN 951-40-1530-4, ISSN 0358- 4283.

Packalen ym. 2014. The European Forestry Dynamics Model: Concept, design and results of first case studies. JRC Science and Policy Reports; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Volume 93450, EUR 27004, 20 pp., doi: 10.2788/153990

Pasanen, K. 1998. Integrating variation in tree growth into forest planning. *Silva Fenn.* 32, 11-25.

Peltoniemi ym. 2015a. A semi-empirical model of boreal forest gross primary production, evapotranspiration, and soil water – calibration and sensitivity analysis. *Bor Env Res* 20:151-171

Peltoniemi ym. 2015b. Consistent estimates of gross primary production of Finnish Forests - comparison of estimates of two process models. *Boreal Environment Research.* 20, 196-212.

Pretzsch ym. 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications.* 5, 4967.

Pukkala, T. 2011 Optimising forest management in Finland with carbon subsidies and taxes. *For Policy Econ.* 13:425–434

Pukkala & Kangas. 1993. A heuristic optimization method for forest planning and decision making. *Scand J For Res* 8:560–570

Pukkala ym. 2013 Species interactions in the dynamics of even- and uneven-aged boreal forests. *J Sustain For* 32 (4):371–403

Pukkala, T. 2017. Transfer and response functions as a means to predict the effect of climate change on timber supply. *Forestry* 00(00):1-8. DOI: 10.1093/forestry/cpx017

Pukkala ym. 2015. Which trees should be removed in thinning treatments? *For. Ecosyst.* 2:32, doi:10.1186/s40663-015-0056-1

Päivinen, R. 1983. Metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmä. A Method for estimating the sawlog percentage in Scots pine and Norway spruce stands. *Folia Forestalia* 564. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. 16 s.

- Rajamäki ym. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus Metsätehon raportti 8. Metsäteho Oy, Helsinki. 20 s. ISSN 1796-2374 (PDF).
<http://www.metsateho.fi/uploads/ek9dcp.pdf>.
- Reineke L.H., 1933. Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*. 46, 627-638.
- Repo ym. 2016. Yasso15 graphical user-interface manual
- Repola, J. 2008. Biomass equations for Birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605-624. The Finnish Society of Forest Science. The Finnish Forest Research Institute. ISSN 0037-5330.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625-647. The Finnish Society of Forest Science. The Finnish Forest Research Institute. ISSN 0037-5330.
- Rummukainen ym. 1995. Wood procurement in the pressure of change – resource evaluation model till year 2010. *Acta For Fenn* 248:1–98.
- Ruosteenoja ym. 2016. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica* 51(1), 17-50.
- Schelhaas ym. 2004. Scenarios on forest management in Czech Republic, Hungary, Poland and Ukraine. European Forest Institute Research Report 17. Brill. Leiden, Boston, Köln. 107 p.
- Schelhaas ym. 2007. Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1). Wageningen, Alterra, Alterra report 1559, EFI Technical Report 26, Joensuu, Finland. 118 p.
- Schelhaas ym. 2015. Alternative forest management strategies to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe, *Regional Environmental Change* 15:1581–1594
- Sievänen ym. 2014. *Annals of Forest Science* (2014) 71: 255-265.
<https://doi.org/10.1007/s13595-013-0295-7>
- Siitonen ym 1996. MELA handbook 1996 edition. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja [Research papers] 622. Metsäntutkimuslaitos - The Finnish Forest Research Institute. 452 p.
- Sirkkiä, S. 2012. Methodology and system design – Some mathematics behind EFDM; Appendix 1 in Developing and testing a prototype for European forestry dynamics model (EFDM); Anon.; Specific Contract 10 Report, Framework contract for the provision of forest data and services in support to the European Forest Data Centre; Reference: 2007/S 194-235358 of 09/10/2007. Available online:
https://webgate.ec.europa.eu/CITnet/stash/projects/FISE/repos/efdm/browse/documents/EFDMinstructions/Seija_Mathematics_behind_EFDM.pdf
- Snellman, Carl-G. 1984. Runkokäyrät ja tilavuusfunktiot VAX:illa. Käyttöohjemoniste, 9s.
- Tomppo ym. 2008b. Multi-Source National Forest Inventory Methods and Applications. Springer. Series: Managing Forest Ecosystems, Vol. 18 2008, XIV. 374 p
- Tuomi ym. 2011. Wood decomposition model for boreal forests. *Ecological Modelling* 222: 709-718.
- Tuomi ym. 2011. Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental Modeling and Software* 26 (11): 1358-1362. doi:10.1016/j.envsoft.2011.05.009

Tupek ym. 2015 : Foliar turnover rates in Finland — comparing estimates from needle-cohort and litterfall-biomass methods. *Boreal Environment Research*. 20, 283-304.

Valentine & Mäkelä. 2005. Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. *Tree Physiol.* 25, 769-779.

Vanhatalo ym. (toim.). 2015. Metsänhoidon suositukset suometsien hoitoon, työopas. Tapion julkaisuja. 105 p. Available at:

Vastamäk & Örn 1995. Taksanlaskentaohjelma: hakkuu, istutus ja perkaus-harvennus. [The tariff calculator: cutting, planting and tending.] Excel spreadsheet, Metsäteho Oy.

Vauhkonen & Packalen. 2017. A Markov chain model for simulating wood supply from any-aged forest management based on National Forest Inventory (NFI) data. *Forests* 8(9), article-id 307, <https://doi.org/10.3390/f8090307>

Vauhkonen & Packalen. 2018. Uncertainties related to climate change and forest management with implications on climate regulation in Finland. *Ecosystem Services* 33(B): 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.02.011>

Verkerk ym. 2016. Manual for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 4). EFI Technical Report 99. European Forest Institute. 49 p.

Väkevä ym. 2001. Puutavaran metsäkuljetuksen ajanmenekki. Metsätehon raportti 123 (Korjattu versio 7.10.2003). Metsäteho Oy, Helsinki. 41 + 3 p. ISSN 1796-2374 (pdf). <http://www.metsateho.fi/uploads/ytmjt7cukr.pdf>.

Äijälä ym. (toim.) (2014) Hyvän metsänhoidon suositukset — METSÄNHOITO. [Best practices for sustainable forest management]. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja [In Finnish]. 180 p.

LIITE1 MELA Puun ja puunkorjuun ja metsänhoidon yksikköhinnat ja MELA taulukot

Taulukko liite1.1 Puuntuotannon rajoitukset laskenta-aineistossa

| Puuntuotannon rajoitukset ¹⁾ | Rajoitettu puuntuotanto | Puuntuotannon ulkopuolella |
|--|-------------------------|----------------------------|
| Luonnonsuojelulakiin perustuvat alueet | | |
| Kansallis- ja luonnonpuistot | | x |
| Soiden-, lehtojen- ja vanhojen metsien suojelualueet sekä muut luonnonsuojelualueet | | x |
| Luonnonsuojelulailla suojellut luontotyytit | x | x |
| Maisemansuojelualueet | x | x |
| Muut lakiin perustuvat alueet | | |
| Erämaat | x | x |
| Ulkoilureittialueet ja valtion retkeilyalueet | x | |
| Muut lakiin perustuvat suojelualueet | x | x |
| Omistajan päätökseen perustuvat suojelualueet | | |
| Metsähallituksen suojelumetsät | | x |
| Metsähallituksen alue-ekologisen suunnittelun luontokohteet ja muut alueet, joilla puuntuotannon rajoituksia | x | x |
| Suojametsäalue Metsähallituksen hallinnassa olevalla maalla | x | |
| Muut suojellut ja rajoitetun käytön alueet | x | x |
| Metsänjalostus-, tutkimus- ja havaintometsät | x | x |
| Puolustusvoimien harjoitusalueet | x | x |
| Virkistysalueet ja muut erikoisalueet | x | x |
| Suojeluun varatut alueet | | |
| Kansallis- ja luonnonpuistojen kehittämisohjelma-alueet | | x |
| Soidensuojelu-, lehtojensuojelu- ja vanhojen metsien suojeluohjelma-alueet | | x |
| Rantojen-, lintuvesien- ja harjijensuojeluohjelma-alueet | x | x |
| Muut suojeluohjelma-alueet ja valtioneuvoston periaatepäätöksellä suojeluun varatut muut kuin suojeluohjelmien alueet | | x |
| Kaava-alueet | | |
| Maakunta-, seutu-, yleis-, asema- ja ranta-asemakaava-alueet | x | x |
| Muut alueet | | |
| Muut Metsähallituksen ilmoittamat omiin päätöksiin perustuvat käytönrajoitukset | x | x |
| Muut arvot, jotka vaikuttavat metsätalouden harjoittamiseen (metsäluonnon tärkeä elinympäristö, rantametsä, asutuksen välitön läheisyys, maisema-arvot, uhanalaisen tai harvinaisen eliölajin esiintymis- tai pesimisalue sekä muu toimenpiteitä rajoittava syy) | x | |
| Kitumaa | x | |

1) Muuttujien ja luokitusten täydelliset selitykset, ks. Valtakunnan metsien ... (2013)

Taulukko liite1.2 VMI-aineistosta (mittausvuodet 2009-2013) muodostetun laskelma-aineiston mukaiset käsittelyluokkien pinta-alat ja puuston tilavuudet koko Suomessa.

| Käsittelyluokka | Pinta-ala milj. ha | | | Osuus % |
|-----------------------------|----------------------------------|---------|----------|------------|
| | Metsämaa | Kitumaa | Yhteensä | |
| Ensisijaisesti puuntuotanto | 17,1 | - * | 17,1 | 75,1 |
| Rajoitettu puuntuotanto | 1,3 | 1,1 | 2,4 | 10,7 |
| Puuntuotannon ulkopuolella | 1,8 | 1,4 | 3,2 | 14,1 |
| Yhteensä | 20,3 | 2,5 | 22,8 | 100,0 |
| | Tilavuus milj. m ³ | | | |
| Ensisijaisesti puuntuotanto | 1 928 | - * | 1 928 | 81,8 |
| Rajoitettu puuntuotanto | 165 | 29 | 194 | 8,2 |
| Puuntuotannon ulkopuolella | 200 | 35 | 235 | 10,0 |
| Yhteensä | 2 292 | 64 | 2 356 | 100,0 |

* Kitumaat ovat joko rajoitetussa puuntuotannossa tai puuntuotannon ulkopuolella.

Taulukko liite1.3 Koepuiden keskimääräiset pohjapinta-alan kasvut metsämaan kangasmaalla sekä metsämaan ojittamattomalla ja ojitetulla turvemaalla.

| | Puulaji | Koepuita kpl | Koepuiden pohjapinta-alan kasvu cm ² /5 vuotta | | |
|----------------------------|----------|-----------------|--|----------|----------------------------------|
| | | | VMI11, indeksikorjattu | MELA2016 | Ilman kalibrointia Kalibroitu |
| Kangasmaa | | | | | |
| | Mänty | 17592 | 42,1 | 41,6 | 43,9 |
| | Kuusi | 11958 | 50,7 | 57,2 | 52,4 |
| | Lehtipuu | 8049 | 35,9 | 30,1 | 34,0 |
| | Yhteensä | 37599 | 43,5 | 44,1 | 44,5 |
| Ojittamaton turvema | | | | | |
| | Mänty | 785 | 24,8 | 8,5 | 18,1 |
| | Kuusi | 557 | 28,0 | 17,2 | 23,3 |
| | Lehtipuu | 586 | 19,3 | 9,4 | 13,3 |
| | Yhteensä | 1928 | 24,1 | 11,3 | 18,1 |
| Ojitettu turvema | | | | | |
| | Mänty | 5497 | 34,3 | 25,5 | 35,3 |
| | Kuusi | 2213 | 45,9 | 38,1 | 41,7 |
| | Lehtipuu | 2933 | 26,4 | 22,1 | 23,8 |
| | Yhteensä | 10643 | 34,5 | 27,2 | 33,4 |

| Hakkuukertymätavoite 40 M3/v v. 2015- (v. 2011-2014 62,6 Mm ³ /v) | | | | | |
|--|---|---|-----------------|----------------|---------------|
| Tavoitefunktio | Maks NPV1 % | | Eteläinen Suomi | Keskinen Suomi | Pohjois-Suomi |
| Rajoitteet | * Kuusen hakkuukertymä 1000 m3/v | | | | |
| | 0.995*kuusi 1 | ≤ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | 1.005*kuusi 1 | ≥ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | 0.995*kuusi 2 | ≤ | 7404,7 | 4856,0 | 1733,9 |
| | 1.005*kuusi 2 | ≥ | 7404,7 | 4856,0 | 1733,9 |
| | 0.995*kuusi 3 | ≤ | 6868,5 | 4726,3 | 1654,9 |
| | 1.005*kuusi 3 | ≥ | 6868,5 | 4726,3 | 1654,9 |
| | 0.995*kuusi 4 | ≤ | 6705,1 | 4771,5 | 1643,5 |
| | 1.005*kuusi 4 | ≥ | 6705,1 | 4771,5 | 1643,5 |
| | 0.995*kuusi 5 | ≤ | 6654,6 | 4849,6 | 1646,4 |
| | 1.005*kuusi 5 | ≥ | 6654,6 | 4849,6 | 1646,4 |
| | 0.995*kuusi 6 | ≤ | 6917,0 | 4803,0 | 1623,1 |
| | 1.005*kuusi 6 | ≥ | 6917,0 | 4803,0 | 1623,1 |
| | * Kuusitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*kuusitukki 1 | ≤ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | 1.005*kuusitukki 1 | ≥ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | 0.995*kuusitukki 2 | ≤ | 4296,3 | 2608,0 | 597,3 |
| | 1.005*kuusitukki 2 | ≥ | 4296,3 | 2608,0 | 597,3 |
| | 0.995*kuusitukki 3 | ≤ | 3647,8 | 2423,7 | 532,8 |
| | 1.005*kuusitukki 3 | ≥ | 3647,8 | 2423,7 | 532,8 |
| | 0.995*kuusitukki 4 | ≤ | 3469,2 | 2396,3 | 518,4 |
| | 1.005*kuusitukki 4 | ≥ | 3469,2 | 2396,3 | 518,4 |
| | 0.995*kuusitukki 5 | ≤ | 3493,4 | 2413,4 | 521,2 |
| | 1.005*kuusitukki 5 | ≥ | 3493,4 | 2413,4 | 521,2 |
| | 0.995*kuusitukki 6 | ≤ | 3522,3 | 2433,4 | 525,9 |
| | 1.005*kuusitukki 6 | ≥ | 3522,3 | 2433,4 | 525,9 |
| | * Männyn hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mänty 1 | ≤ | 9166,0 | 9445,1 | 8364,3 |
| | 1.005*mänty 1 | ≥ | 9166,0 | 9445,1 | 8364,3 |
| | 0.995*mänty 2 | ≤ | 5854,8 | 6353,4 | 5971,2 |
| | 1.005*mänty 2 | ≥ | 5854,8 | 6353,4 | 5971,2 |
| | 0.995*mänty 3 | ≤ | 5570,0 | 6702,3 | 6389,3 |
| | 1.005*mänty 3 | ≥ | 5570,0 | 6702,3 | 6389,3 |
| | 0.995*mänty 4 | ≤ | 5484,0 | 6805,6 | 6628,2 |
| | 1.005*mänty 4 | ≥ | 5484,0 | 6805,6 | 6628,2 |
| | 0.995*mänty 5 | ≤ | 5504,2 | 6841,2 | 6717,9 |
| | 1.005*mänty 5 | ≥ | 5504,2 | 6841,2 | 6717,9 |
| | 0.995*mänty 6 | ≤ | 5728,5 | 6975,2 | 6824,2 |
| | 1.005*mänty 6 | ≥ | 5728,5 | 6975,2 | 6824,2 |
| | * Mäntytukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mäntytukki 1 | ≤ | 4101,7 | 3345,2 | 2584,0 |
| | 1.005*mäntytukki 1 | ≥ | 4101,7 | 3345,2 | 2584,0 |
| | 0.995*mäntytukki 2 | ≤ | 2590,9 | 2379,5 | 1807,6 |
| | 1.005*mäntytukki 2 | ≥ | 2590,9 | 2379,5 | 1807,6 |
| | 0.995*mäntytukki 3 | ≤ | 2442,3 | 2620,1 | 1895,0 |
| | 1.005*mäntytukki 3 | ≥ | 2442,3 | 2620,1 | 1895,0 |
| | 0.995*mäntytukki 4 | ≤ | 2469,3 | 2821,0 | 2021,9 |
| | 1.005*mäntytukki 4 | ≥ | 2469,3 | 2821,0 | 2021,9 |
| | 0.995*mäntytukki 5 | ≤ | 2486,8 | 2841,2 | 2038,7 |
| | 1.005*mäntytukki 5 | ≥ | 2486,8 | 2841,2 | 2038,7 |
| | 0.995*mäntytukki 6 | ≤ | 2500,3 | 2855,1 | 2055,6 |
| | 1.005*mäntytukki 6 | ≥ | 2500,3 | 2855,1 | 2055,6 |
| | * Lehtipuun hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtipuu 1 | ≤ | 6048,0 | 5316,9 | 2850,8 |
| | 1.005*lehtipuu 1 | ≥ | 6048,0 | 5316,9 | 2850,8 |
| | 0.995*lehtipuu 2 | ≤ | 3428,0 | 2870,3 | 1527,7 |
| | 1.005*lehtipuu 2 | ≥ | 3428,0 | 2870,3 | 1527,7 |
| | 0.995*lehtipuu 3 | ≤ | 3579,9 | 2973,8 | 1535,1 |
| | 1.005*lehtipuu 3 | ≥ | 3579,9 | 2973,8 | 1535,1 |
| | 0.995*lehtipuu 4 | ≤ | 3487,5 | 2955,0 | 1519,5 |
| | 1.005*lehtipuu 4 | ≥ | 3487,5 | 2955,0 | 1519,5 |
| | 0.995*lehtipuu 5 | ≤ | 3522,5 | 2795,7 | 1468,0 |
| | 1.005*lehtipuu 5 | ≥ | 3522,5 | 2795,7 | 1468,0 |
| | 0.995*lehtipuu 6 | ≤ | 3036,3 | 2642,6 | 1350,0 |
| | 1.005*lehtipuu 6 | ≥ | 3036,3 | 2642,6 | 1350,0 |
| | * Lehtitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 425,7 | 251,5 | 35,6 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 425,7 | 251,5 | 35,6 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 380,9 | 225,4 | 33,7 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 380,9 | 225,4 | 33,7 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 379,5 | 228,4 | 32,3 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 379,5 | 228,4 | 32,3 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 382,6 | 229,9 | 31,1 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 382,6 | 229,9 | 31,1 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 390,8 | 241,0 | 31,0 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 390,8 | 241,0 | 31,0 |
| | * Hakkuuala 2011-2014 (1000 ha/v) | | | | |
| | 0.975*hakkuuala 1 | ≤ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | 1.025*hakkuuala 1 | ≥ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | * Päätehakkuuala 2011-2014 (1000 ha/v) | | | | |
| | 0.975*päätehakkuuala 1 | ≤ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |
| | 1.025*päätehakkuuala 1 | ≥ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |
| | * | | 68 | | |

| Hakkuukertymätavoite 80 Mm ³ /v v.2025- (v. 2011-2014 62,6 Mm ³ /v, 2015-2024 71,2 Mm ³ /v) | | | | | |
|--|---|---|-----------------|----------------|---------------|
| Tavoitefunktio | Maks NPV1 % | | Eteläinen Suomi | Keskinen Suomi | Pohjois-Suomi |
| Rajoitteet | * Kuusen hakkuukertymä 1000 m ³ /v | | | | |
| | 0.995*kuusi 1 | ≤ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | 1.005*kuusi 1 | ≥ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | 0.995*kuusi 2 | ≤ | 13182,0 | 8644,6 | 3086,7 |
| | 1.005*kuusi 2 | ≥ | 13182,0 | 8644,6 | 3086,7 |
| | 0.995*kuusi 3 | ≤ | 13699,3 | 9426,6 | 3300,7 |
| | 1.005*kuusi 3 | ≥ | 13699,3 | 9426,6 | 3300,7 |
| | 0.995*kuusi 4 | ≤ | 13539,4 | 9634,9 | 3318,7 |
| | 1.005*kuusi 4 | ≥ | 13539,4 | 9634,9 | 3318,7 |
| | 0.995*kuusi 5 | ≤ | 13341,9 | 9723,0 | 3300,9 |
| | 1.005*kuusi 5 | ≥ | 13341,9 | 9723,0 | 3300,9 |
| | 0.995*kuusi 6 | ≤ | 13754,0 | 9749,4 | 3227,5 |
| | 1.005*kuusi 6 | ≥ | 13754,0 | 9749,4 | 3227,5 |
| | * Kuusitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*kuusitukki 1 | ≤ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | 1.005*kuusitukki 1 | ≥ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | 0.995*kuusitukki 2 | ≤ | 7648,4 | 4642,8 | 1063,4 |
| | 1.005*kuusitukki 2 | ≥ | 7648,4 | 4642,8 | 1063,4 |
| | 0.995*kuusitukki 3 | ≤ | 7275,6 | 4834,1 | 1062,6 |
| | 1.005*kuusitukki 3 | ≥ | 7275,6 | 4834,1 | 1062,6 |
| | 0.995*kuusitukki 4 | ≤ | 7005,2 | 4838,7 | 1046,8 |
| | 1.005*kuusitukki 4 | ≥ | 7005,2 | 4838,7 | 1046,8 |
| | 0.995*kuusitukki 5 | ≤ | 7003,9 | 4838,7 | 1045,0 |
| | 1.005*kuusitukki 5 | ≥ | 7003,9 | 4838,7 | 1045,0 |
| | 0.995*kuusitukki 6 | ≤ | 7003,9 | 4838,7 | 1045,8 |
| | 1.005*kuusitukki 6 | ≥ | 7003,9 | 4838,7 | 1045,8 |
| | * Männyn hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mänty 1 | ≤ | 9166,0 | 9445,1 | 8364,3 |
| | 1.005*mänty 1 | ≥ | 9166,0 | 9445,1 | 8364,3 |
| | 0.995*mänty 2 | ≤ | 10422,7 | 11310,5 | 10630,0 |
| | 1.005*mänty 2 | ≥ | 10422,7 | 11310,5 | 10630,0 |
| | 0.995*mänty 3 | ≤ | 11109,4 | 13367,8 | 12743,5 |
| | 1.005*mänty 3 | ≥ | 11109,4 | 13367,8 | 12743,5 |
| | 0.995*mänty 4 | ≤ | 11073,6 | 13742,3 | 13384,0 |
| | 1.005*mänty 4 | ≥ | 11073,6 | 13742,3 | 13384,0 |
| | 0.995*mänty 5 | ≤ | 11035,4 | 13716,1 | 13468,9 |
| | 1.005*mänty 5 | ≥ | 11035,4 | 13716,1 | 13468,9 |
| | 0.995*mänty 6 | ≤ | 11390,7 | 13869,8 | 13569,4 |
| | 1.005*mänty 6 | ≥ | 11390,7 | 13869,8 | 13569,4 |
| | * Mäntytukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mäntytukki 1 | ≤ | 4101,7 | 3345,2 | 2584,0 |
| | 1.005*mäntytukki 1 | ≥ | 4101,7 | 3345,2 | 2584,0 |
| | 0.995*mäntytukki 2 | ≤ | 4612,3 | 4236,0 | 3217,9 |
| | 1.005*mäntytukki 2 | ≥ | 4612,3 | 4236,0 | 3217,9 |
| | 0.995*mäntytukki 3 | ≤ | 4871,1 | 5225,9 | 3779,6 |
| | 1.005*mäntytukki 3 | ≥ | 4871,1 | 5225,9 | 3779,6 |
| | 0.995*mäntytukki 4 | ≤ | 4986,1 | 5696,3 | 4082,7 |
| | 1.005*mäntytukki 4 | ≥ | 4986,1 | 5696,3 | 4082,7 |
| | 0.995*mäntytukki 5 | ≤ | 4985,9 | 5696,3 | 4087,4 |
| | 1.005*mäntytukki 5 | ≥ | 4985,9 | 5696,3 | 4087,4 |
| | 0.995*mäntytukki 6 | ≤ | 4971,6 | 5678,0 | 4087,4 |
| | 1.005*mäntytukki 6 | ≥ | 4971,6 | 5678,0 | 4087,4 |
| | * Lehtipuun hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtipuu 1 | ≤ | 6048,0 | 5316,9 | 2850,8 |
| | 1.005*lehtipuu 1 | ≥ | 6048,0 | 5316,9 | 2850,8 |
| | 0.995*lehtipuu 2 | ≤ | 6102,6 | 5109,8 | 2719,7 |
| | 1.005*lehtipuu 2 | ≥ | 6102,6 | 5109,8 | 2719,7 |
| | 0.995*lehtipuu 3 | ≤ | 7140,1 | 5931,2 | 3061,8 |
| | 1.005*lehtipuu 3 | ≥ | 7140,1 | 5931,2 | 3061,8 |
| | 0.995*lehtipuu 4 | ≤ | 7042,2 | 5966,9 | 3068,3 |
| | 1.005*lehtipuu 4 | ≥ | 7042,2 | 5966,9 | 3068,3 |
| | 0.995*lehtipuu 5 | ≤ | 7062,2 | 5605,1 | 2943,2 |
| | 1.005*lehtipuu 5 | ≥ | 7062,2 | 5605,1 | 2943,2 |
| | 0.995*lehtipuu 6 | ≤ | 6037,5 | 5254,7 | 2684,6 |
| | 1.005*lehtipuu 6 | ≥ | 6037,5 | 5254,7 | 2684,6 |
| | * Lehtitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 757,9 | 447,8 | 63,3 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 757,9 | 447,8 | 63,3 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 759,7 | 449,6 | 67,3 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 759,7 | 449,6 | 67,3 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 766,4 | 461,2 | 65,4 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 766,4 | 461,2 | 65,4 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 765,1 | 461,0 | 62,4 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 765,1 | 461,0 | 62,4 |
| | 0.995*lehtitukki 1 | ≤ | 777,1 | 479,3 | 61,7 |
| | 1.005*lehtitukki 1 | ≥ | 777,1 | 479,3 | 61,7 |
| | * Hakkuuuala 2011-2014 (1000ha/v) | | | | |
| | 0.975*hakkuuuala 1 | ≤ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | 1.025*hakkuuuala 1 | ≥ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | * Päätehakkuuuala 2011-2014 (1000 ha /v) | | | | |
| | 0.975*päätehakkuuuala 1 | ≤ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |
| | 1.025*päätehakkuuuala 1 | ≥ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |

| Suurin puuntuotannollisesti ja taloudellisesti kestävä hakkuukertymä 2015- (v. 2011-2014 62,6 Mm ³ /v) | | | | | |
|---|--|---|-----------------|----------------|---------------|
| Tavoitefunktio | Maks NPV4 % | | Eteläinen Suomi | Keskinen Suomi | Pohjois-Suomi |
| Totutunut kertymä 2011-2014 | * Kuusen hakkuukertymä 1000 m³/v | | | | |
| | 0.995*kuusikertymä 1 | ≤ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | 1.005*kuusikertymä 1 | ≥ | 11610,3 | 7582,5 | 2258,9 |
| | * Kuusitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*kuusitukikertymä 1 | ≤ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | 1.005*kuusitukikertymä 1 | ≥ | 7005,9 | 3188,1 | 787,4 |
| | * Männyn hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mäntykertymä 1 | ≤ | 9166 | 9445,1 | 8364,3 |
| | 1.005*mäntykertymä 1 | ≥ | 9166 | 9445,1 | 8364,3 |
| | * Mäntytukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*mäntytukki 1 | ≤ | 4101,7 | 3345,2 | 2584 |
| | 1.005*mäntytukki1 | ≥ | 4101,7 | 3345,2 | 2584 |
| | * Lehtipuun hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtipuukertymä 1 | ≤ | 6048 | 5316,9 | 2850,8 |
| | 1.005*lehtipuukertymä 1 | ≥ | 6048 | 5316,9 | 2850,8 |
| | * Lehtitukin hakkuukertymä | | | | |
| | 0.995*lehtitukikertymä | ≤ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | 1.005*lehtitukikertymä | ≥ | 701,9 | 410,8 | 41,3 |
| | * Hakkuuala 2011-2014 (1000 ha/v) | | | | |
| | 0.975*OC..1 | ≤ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | 1.025*OC..1 | ≥ | 223,2 | 218,9 | 224,1 |
| | * Päätehakkuuala 2011-2014 (1000 ha/v) | | | | |
| | 0.975*uha1 | ≤ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |
| | 1.025*uha1 | ≥ | 52,2 | 45,8 | 52,3 |
| | * | | | | |
| Max Sust rajoitteet | * Tasainen tai nouseva kokonaishakkuukertymä | | | | |
| | Hakkuukertymä 2-Hakkuukertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Hakkuukertymä 3-Hakkuukertymä 2 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Hakkuukertymä 4-Hakkuukertymä 3 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Hakkuukertymä 5-Hakkuukertymä 4 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Hakkuukertymä 6-Hakkuukertymä 5 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | * Tukkikertymä säilyy vähintään 1. kauden tasolla | | | | |
| | Tukkikertymä 2-Tukkikertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tukkikertymä 3-Tukkikertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tukkikertymä 4-Tukkikertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tukkikertymä 5-Tukkikertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Tukkikertymä 6-Tukkikertymä 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | * Tasainen tai nouseva nettotulo | | | | |
| | Nettotulo 2-Nettotulo 1 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Nettotulo 3-Nettotulo 2 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Nettotulo 4-Nettotulo 3 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Nettotulo 5-Nettotulo 4 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | Nettotulo 6-Nettotulo 5 | ≥ | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | * | | | | |

Puun ja puunkorjuun ja metsänhoidon yksikköhinnat

Laskelmat tehtiin soveltaen tienvarsihintoja, sillä tienvarsihintoihin ja simuloituihin korjuukustannuksiin perustuvassa laskennassa ei tarvita erillistä töiden aloituskustannusta (ns. "entry cost") tai korjattavan puuston minimirajoja. Tienvarsihinnat laskettiin lisäämällä vuosina

2004–2013 toteutuneisiin reaalisiin puutavaralajeittaisiin kantohintoihin vuosien 2004–2013 keskimääräiset toteutuneet reaaliset korjuukustannukset: tukille 7,75 €/m³ ja kuidulle 14,35 €/m³ (<http://www.luke.fi/MELA-metsalaskelmat> > VMI11 (mittausvuodet 2009-2013) > Laskelmaoletukset). Vuosittaiset nimellishinnat deflatoitiin vuodelle 2013. Korjuukustannukset laskettiin vastaavasti tienvarteen.

Laskelmissa sovelletut korjuun ja metsänhoidon vuoteen 2013 deflatoidut yksikköhinnat perustuivat vuosien 2004–2013 keskiarvoihin. Hinnat sisältävät palkkojen lisäksi yrittäjävoiton, henkilösivukustannukset ja työvälinekorvaukset

LIITE2 Hiilitaseen laskenta Monsussa

Timo Pukkala, Joensuu 2012

Muokannut Tero Heinonen 2018

Hiilitase on sidotun ja vapautetun hiilen erotus laskentakauden aikana. Se lasketaan kolmen osataseen summana:

- elävän biomassan sisältämän hiilen muutos
- maan hiilitase
- tuotteiden hiilitase

Maan hiilitase koostuu seuraavista komponenteista (+ tarkoittaa, että komponentti parantaa hiilitasetta, ja – tarkoittaa, että komponentti alentaa tasetta):

- laskentakauden aikana kuolleet puut (+)
- laskentakauden aikana hakattujen puiden tähteet (oksat, neulaset, kannot, juuret) (+)
- uusi, elävistä puista peräisin oleva karike (oksat, lehdet, hienoituureet) (+)
- kuolleen aineksen hajoamisessa vapautuva hiili (-)

Tuotteiden hiilitase koostuu seuraavista komponenteista:

- laskentakauden aikana valmistetut uudet tuotteet (+)
- tuotteiden hajoamisessa vapautuva hiili (-)
- puunkorjuun hiilipäästöt (-)
- puun kaukokuljetuksen hiilipäästöt (-)
- tuotteiden valmistuksen hiilipäästöt (-)
- korvausvaikutukset (+)
- uusiokäytöstä aiheutuvat korvausvaikutukset (+)

Metsässä olevaa kuollutta ainetta kutsutaan maan hiileksi. Sen hajoamista simuloidaan Yasso07-mallilla.

Laskentakauden alussa metsässä olevan kuolleen biomassan määrä (metsämaan orgaaninen aine) sekä ennen laskentakautta valmistettujen tuotteiden jäljellä oleva massa ennustetaan malleilla. Yasso-malli ja tuotteiden elinkaarimalli siis alustetaan malleilla ennustetuilla määrillä, mikä poistaa harhan hiilitaselaskelmista. Muussa tapauksessa hiilitaseet olisivat systemaattisia yliarvioita ja esim. taimikolle saataisiin liian hyvä hiilitase.

Alustuksen ansiosta Monsulla lasketut hiilitaseet kuvaavat todellista sitoutuneen ja vapautuneen hiilen erotusta. Hiilitasestandardeissa (esim. VCS-standardi) laskuria ei tarvitse alustaa, sillä hiilitase lasketaan ”referenssikäytännön” ja muutetun metsänhoitokäytännön erotuksena. Sama virhe kummassakin taseessa ei vaikuta erotukseen. Standardin mukaisessa hiilitaselaskennassa – jos sitä käytetään päästökaupan perusteena – on kuitenkin se ongelma, että metsänomistaja voi saada maksua hiilen ”sidonnasta”, vaikka hiilitase olisi negatiivinen eli hiiltä vapautuisi, kunhan tase on parempi kuin referenssimenetelmässä. Vastaavasti omistaja voi joutua maksamaan, vaikka hän sitoisi hiiltä. Näin käy, kun hiilitase on positiivinen mutta heikompi kuin referenssimenetelmässä.

Monsu-ohjelmalla voidaan laskea valitulle alueelle ja käsittelysuunnitelmalla sekä todellinen hiilitase että standardin mukainen erotus.

Maan orgaanisen aineen alustaminen

Kivennäismailla maan orgaanisen aineen alkumäärä lasketaan malleilla, jotka perustuvat Monsulla ja Yassolla tehtyihin pitkäaikaisiin simuloiteihin eri metsäalueille eri puolilla Suomea. Maan orgaanisen määrä lasketaan erikseen seuraaville komponenteille.

- happiliukoinen (A)
- vesiliukoinen (W)
- etanoliliukoinen (E)
- huonoliukoinen (N)
- humusaine (H)

Kuvasta 1 nähdään, että suurin osamaan orgaanisen aineen massasta on huonoliukoista (N). Toiseksi eniten on happoliukoista massaa (A) ja kolmanneksi eniten humusaineita (H). Viljavilla kasvupaikoilla maassa on paljon enemmän orgaanista ainesta kuin karuilla kasvupaikoilla. Harvaksi hakatun metsikön (pieni pohjapinta-ala) ja taimikon (pieni pohjapinta-ala, pieni keskiläpimitta) hiilivarasto on suurempi kuin tiheän metsikön. Tämä johtuu siitä, että vastikään hakatussa metsikössä on paljon tuoreita kantoja, kantojen juuria ja muita hakkuutähteitä.

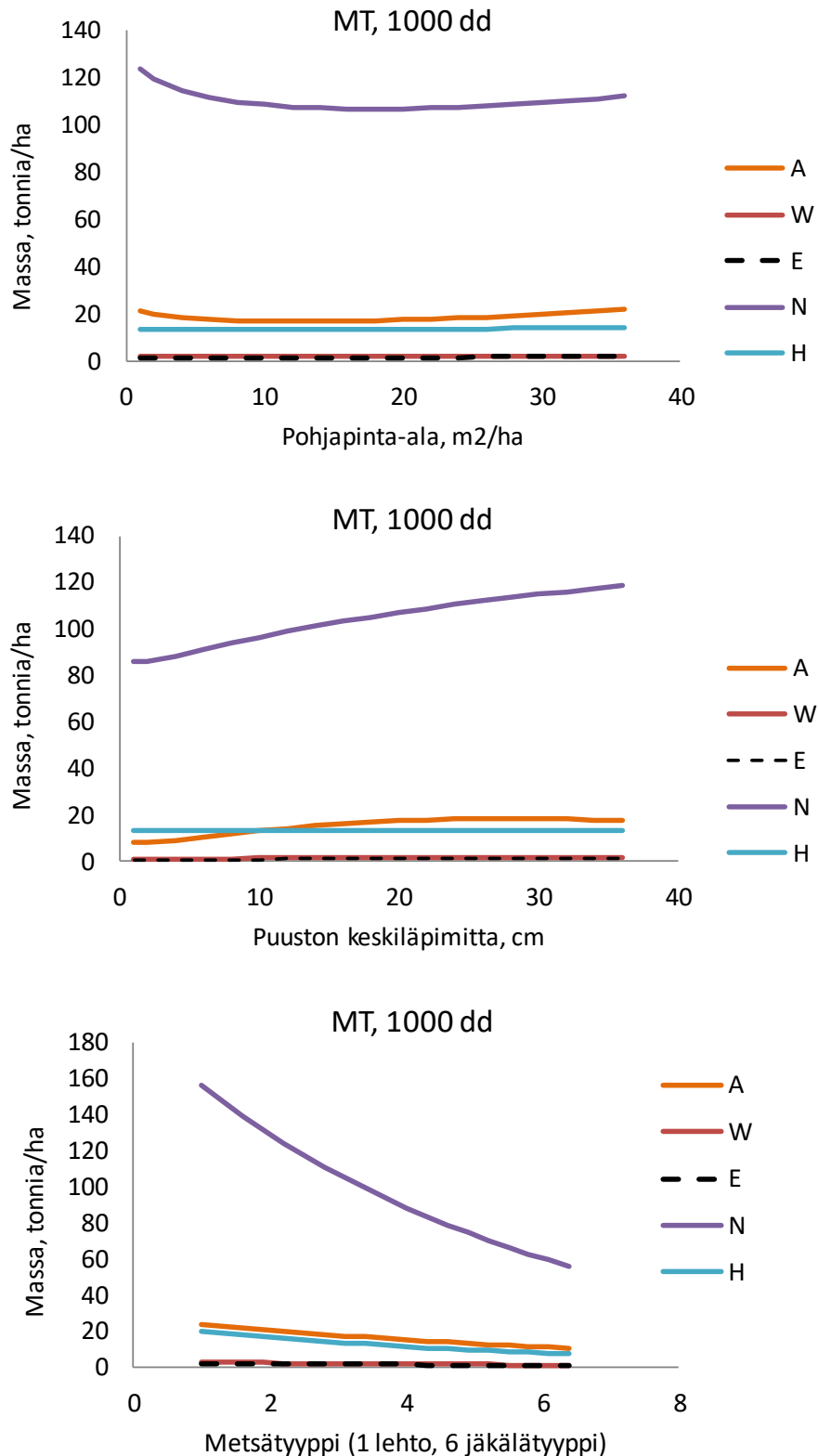
Turvemailla maan orgaanisen aineen määrä lasketaan erikseen hapelliselle (hajoavalle) ja hapettomalle kerrokselle. Hapeton kerros ei hajoa (laskelmissa), joten sen koostumuksella ei ole merkitystä. Turpeen koostumus määritellään parametritiedostossa **AWENH_Peat.par**, joka näyttää seuraavalta (ensimmäisiä lukuja eli vanhan turpeen koostumusta käytetään alustuksessa):

0.0096 0.0633 ! A-ositteen osuus (happoliukoinen) vanhassa ja uudessa turpeessa
0.0012 0.0077 ! W (vesi)
0.0003 0.0026 ! E (etanoli)
0.1262 0.8421 ! N (huonoliukoinen)
0.8627 0.0842 ! H (humus)
1.0 ! Turpeen vuotuinen kasvu ojittamattomalla suolla, mm
0.35 ! Turpeen kuivatiheys, tn/m³

Turpeen hajoamisesta on vain vähän tutkimustuloksia. Parametritiedostossa koostumus on määritelty sellaiseksi, että Yasso-mallilla laskettu turpeen hajoamisesta aiheutuva hiilipäästö vastaa turvemailta mitattuja hiilipäästöjä.

Turpeen paksuuskasvu tarkoittaa tiivistyneen turpeen vuotuista paksuuskasvua (turpeen, jonka kuivatiheys on 0.35 tonnia/m³). Tällä nopeudella turpeen oletetaan kasvan paksuutta Monsu-simuloinneissa ojittamattomalla suolla. Ojitus hidastaa turpeen kasvua ja nopeuttaa hajoamista, joten ojitusalueiden turpeen hiilitase voi olla myös negatiivinen. Sammaleet kasvavat paljon nopeammin (kuin esim. 1 mm/v), mutta ne painuvat kasaan ja tiivistyvät murto-osaan uuden sammaleen paksuudesta.

Turvemailla Monsu-ohjelmiston laskema hiilitase on selvästi epäluotettavampi kuin kivennäismailla, ennen kaikkea maan hiilitaseen osalta, koska tutkimustietoa ei ole riittävästi.



Kuva 1. Metsämaan orgaanisen aineksen ennustettu määrä metsätyyppin, puuston keskiläpimitan ja pohjapinta-alan funktiona.

Maan hiilitaseeseen vaikuttavat parametrit

Kuolleet puut ja hakkuutähteet muuttuvat kuolin- tai hakkuuhetkellä karikkeeksi. Niiden koostumus määritellään parametritiedostossa **AWENH.par**:

| Spe | Comp | A | W | E | N | |
|-----|------|------|------|------|------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 0.68 | 0.02 | 0.01 | 0.29 | ! Stems & Stumps & Coarse roots |
| 2 | 1 | 0.67 | 0.02 | 0.00 | 0.30 | |
| 3 | 1 | 0.71 | 0.01 | 0.00 | 0.28 | |
| 1 | 2 | 0.45 | 0.02 | 0.08 | 0.45 | ! Branches |
| 2 | 2 | 0.45 | 0.02 | 0.08 | 0.45 | |
| 3 | 2 | 0.45 | 0.02 | 0.08 | 0.45 | |
| 1 | 3 | 0.52 | 0.18 | 0.09 | 0.21 | ! Leaves |
| 2 | 3 | 0.48 | 0.13 | 0.07 | 0.32 | |
| 3 | 3 | 0.43 | 0.19 | 0.10 | 0.28 | |
| 1 | 4 | 0.58 | 0.13 | 0.06 | 0.23 | ! Fine roots |
| 2 | 4 | 0.55 | 0.13 | 0.07 | 0.25 | |
| 3 | 4 | 0.58 | 0.19 | 0.06 | 0.23 | |

Ensimmäisessä sarakkeessa on puulaji (1 = mänty, 2 = kuusi, 3 = lehti), toisessa sarakkeessa biomassakomponentti (1 = runko, kanto ja juuret, 2 = oksat, 3 = lehdet, 4 = hienojuuret) ja seuraavissa sarakkeissa ovat eri komponenttien AWEN-osuudet, jotka on saatu Yasso07-manuaalin liitetaulukoista. Runko-, kanto- ja juuripuu jaetaan neljään kokoluokkaan (läpimittaluokkaan), koska Yasso-mallissa hajoamisnopeus riippuu kuolleen aineksen järeydestä. Kokoluokat ovat 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm ja yli 30 cm. Loput biomassakomponentit lisätään kokoluokkaan 0 cm, johon lisätään myös vuotuinen karike (muu karike kuin kuolleet puut ja hakkuutähteet).

Vuotuisen, elävistä puista tulevan karikkeen määrä ennustetaan turn-over-suhteiden avulla (osuus, joka biomassasta varisee vuosittain karikkeena), jotka on ilmoitettu parametritiedostossa **turn.par**:

| Spe | Leaf | B&R | FineR | FR/L |
|-----|------|--------|-------|------|
| 1 | 0.2 | 0.0125 | 0.811 | 0.67 |
| 2 | 0.1 | 0.0125 | 0.868 | 0.25 |
| 3 | 0.8 | 0.0135 | 1.000 | 0.67 |

Puulajeittaiset parametrit (mänty, kuusi, lehtipuu) ovat:

- Lehtikarike; vuodessa variseva osuus lehtien biomassasta (Leaf)
- Oksa- ja juurikarike; vuodessa variseva osuus oksien ja juurten biomassasta (B&R)
- Hienojuurikarike; vuodessa "variseva" osuus hienojuurten biomassasta (FineR)
- Hienojuurten biomassa osuutena lehtien biomassasta (FR/L)

Viimeistä parametria käytetään hienojuurten biomassan ennustamiseksi, koska hienojuurille ei ole olemassa empiirisiä biomassamalleja. Muiden biomassakomponenttien massa ennustetaan Repolan yhtälöillä puun rinnankorkeusläpimitan ja pituuden funktiona. Tiedoston **turn.par** parametrien arvot perustuvat tutkimuskirjallisuuteen (esim. Helmisaari, Liski).

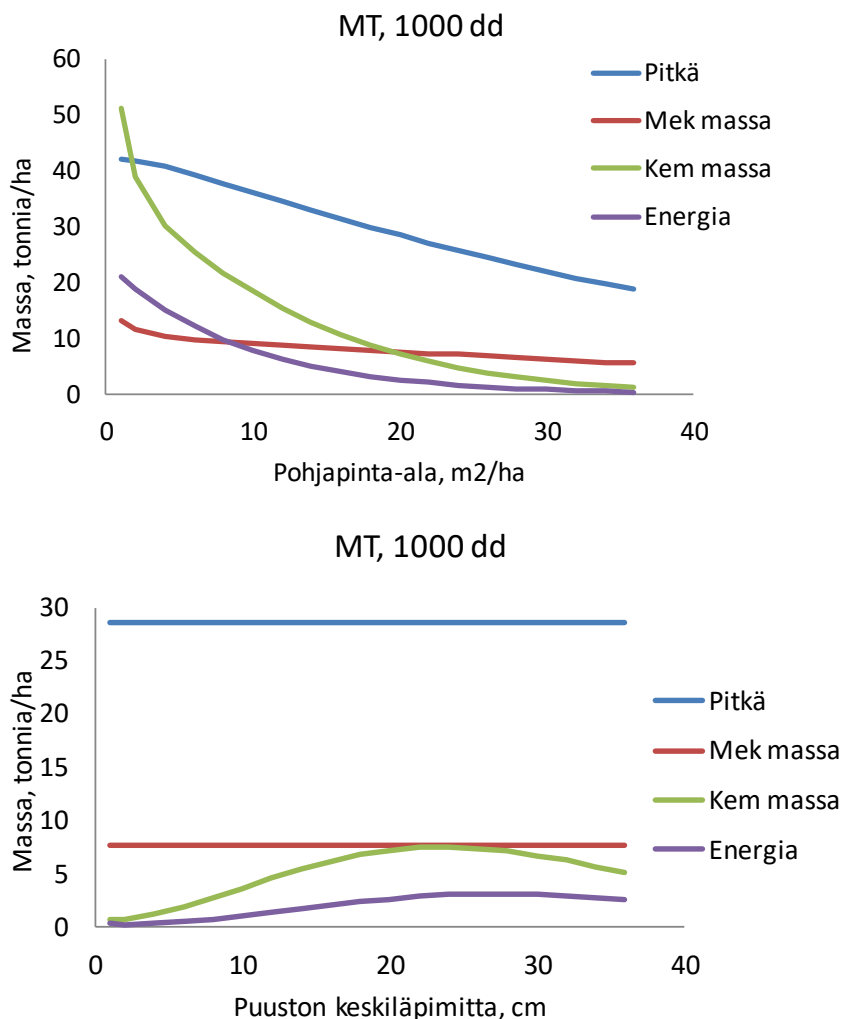
Uusi karike lisätään senhetkiseen maan orgaanisen aineen määrään (AWENH-pooliin). Kullakin kuviolla näitä pooleja, joiden hajoamista simuloidaan Yasso-mallilla, on viisi kappaletta (0 cm ja 4 eri läpimittaluokkaa).

Tuotteiden hiilitaseen laskenta

Kun puu hakataan, se muuttuu tuotteiksi, jotka alkavat heti hajota. Lopputuotteita on neljää eri tyyppiä, joiden hajoamisnopeus on erilainen:

- pitkäkestoinen tuote (sahatavara ja vaneri)
- mekaaninen massa
- kemiallinen massa
- biopolttoaine

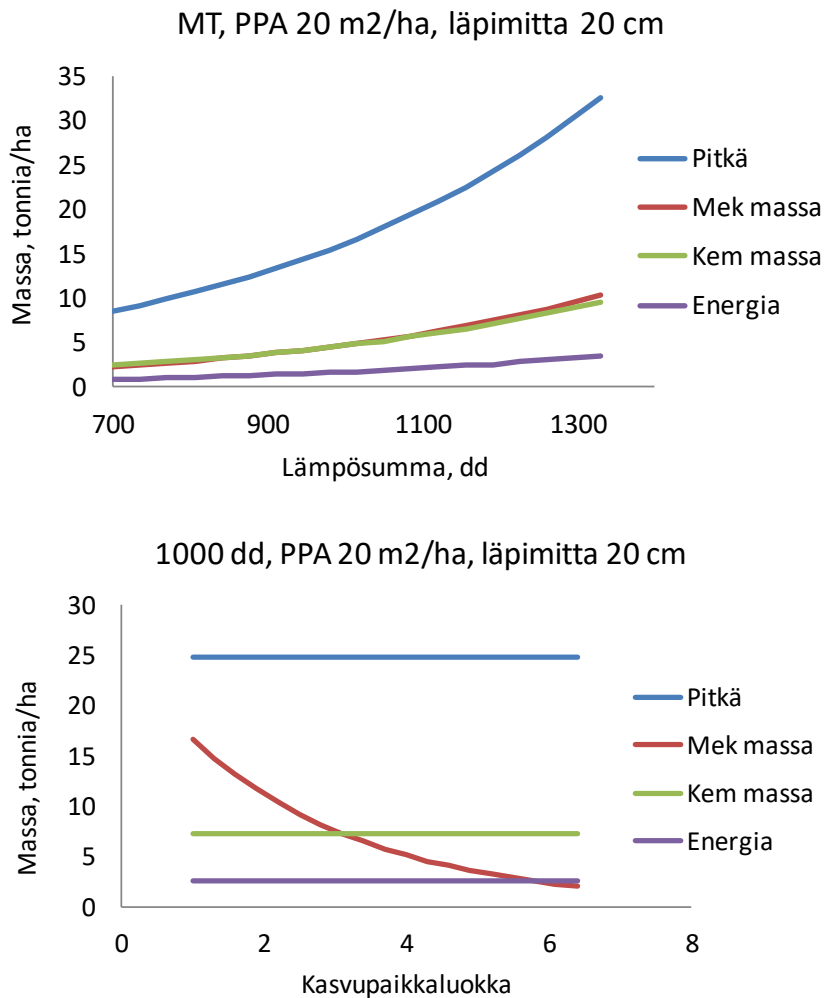
Eri tuotteiden määrä alustetaan samalla tavalla kuin maan orgaanisen aineksen määrä (kuvat 2 ja 3). Kitu- ja joutomaalla tuotemääriä ei alusteta eli oletetaan, että noilla kasvupaikoilla ei ole tehty hakkuita. Alustettu määrä kuvaa sitä, kuinka paljon metsikön ulkopuolella on ko. metsiköstä peräisin olevia tuotteita (jotka hajoavat vapauttaen hiiltä ilmakehään).



Kuva 2. Metsikön puusta aiemmin valmistettujen tuotteiden jäljellä oleva kuivamassa mänty-kuusisekametsässä pohjapinta-alan ja keskiläpimitan funktiona. Kuvasta 2 käy ilmi, että metsikköön, jonka pohjapinta-ala on pieni (nuori tai voimakkaasti harvennettu metsä) liittyy paljon hajoavia tuotteita. Tällainen metsikkö on hakattu vastikään, ja hakatuista puista tehdyt tuotteet hajoavat metsikön ulkopuolella vapauttaen hiiltä ilmakehään. Hajoavien tuotteiden alustaminen poistaa hiilitaselaskelmista yhden harhan lähteen (joka johtaa hiilitaseen systemaattiseen yliarvioon, ennen kaikkea laskentajakson alkupuolella). Ilman maan

orgaanisen aineen ja tuotteiden määrän alustusta esimerkiksi taimikoiden ja nuorten metsien hiilitaseesta syntyisi aivan liian positiivinen käsitys.

Kuvasta 3 nähdään, että hajoavia tuotteita on sitä enemmän, mitä suurempi on alueen lämpösusma ja mitä parempi on kasvupaikka.



Kuva 3. Metsikön puusta aiemmin valmistettujen tuotteiden jäljellä oleva kuivamassa mänty-kuusisekametsässä lämpösusman ja kasvupaikkaluokan (1 = lehto, 6 = jäkälätyyppi tai vastaava suo) funktiona.

Laskentakauden aikana hakattujen puiden eri puutavaralajeista saadaan erilaisia tuotteita suhteissa, jotka on määritelty **puulajit**-nimisessä parametritiedostossa. Seuraavassa on osa parametritiedoston sisällöstä:

| | LogLong, | LogMech, | LogChem, | LogFire, | LogNew, | PulpLong, | PulpMech, | PulpChem, | PulpFire, | PulpNew, |
|-------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Mänty | 0.440, | 0.000, | 0.200, | 0.360, | 0.000, | 0.000, | 0.000, | 0.460, | 0.540, | 0.000, |
| Kuusi | 0.440, | 0.200, | 0.120, | 0.240, | 0.000, | 0.000, | 0.500, | 0.300, | 0.200, | 0.000, |
| Koivu | 0.330, | 0.000, | 0.300, | 0.370, | 0.000, | 0.000, | 0.000, | 0.550, | 0.450, | 0.000, |
| ... | | | | | | | | | | |

Eri parametrien merkitys on seuraava:

- LogLong: Pitkäkestoisten lopputuotteiden osuus sahatukin biomassasta
- LogMech: Mekaanisen massan osuus sahatukin biomassasta
- LogChem: Kemiallisen massan osuus sahatukin biomassasta
- LogFire: Energiaksi käytettävä osuus sahatukin biomassasta
- PulpLong: Pitkäkestoisten lopputuotteiden osuus kuitupuun biomassasta
- PulpMech: Mekaanisen massan osuus kuitupuun biomassasta
- PulpChem: Kemiallisen massan osuus kuitupuun biomassasta
- PulpFire: Energiaksi käytettävä osuus kuitupuun biomassasta

Luvuista käy ilmi mm., että kuusikuitupuusta tehdään pääasiassa mekaanista massaa ja vain alle puolet sahatukin tilavuudesta päätyy pitkäkestoisiksi tuotteiksi. Loput (pinnat, sahanpuru) menevät massanvalmistukseen ja energiantuotantoon. Osa tiedoston parametreista perustuu tutkimuskirjallisuuteen (Karjalainen, Liski ym.) ja osa on asetettu oletuksella, että puun käyttö voi muuttua tulevaisuudessa. Samassa tiedostossa määritellään myös puun kuivatuoretiheydet ja hiilen osuudet kuivamassasta eri puulajeille:

| | Puun kuivatuoretiheys, tonnia/m ³ , | Hiilen osuus kuivamassasta |
|-------|--|-------------------------------|
| Mänty | 0.460, | 0.519 |
| Kuusi | 0.410, | 0.519 |
| Koivu | 0.580, | 0.505 |
| ... | | |

Korjattava energiaranka, -oksat ja kannot käytetään kokonaan biopolttoaineeksi.

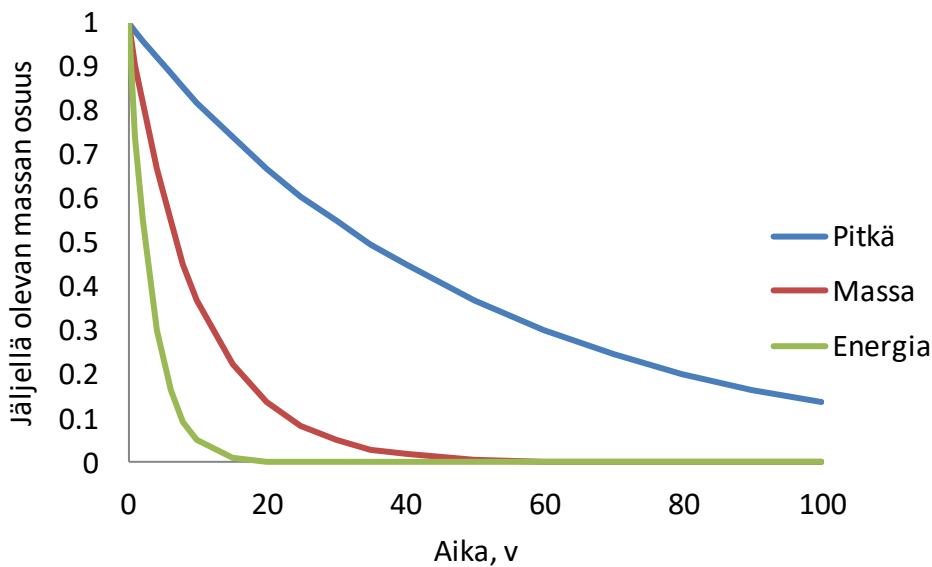
Tuotteet alkavat hajota välittömästi seuraavan kaavan mukaan

$$B_t = B_0 e^{-kt}$$

missä B_t jäljellä oleva massa t vuoden jälkeen, B_0 on alkuperäinen (valmistushetken) massa ja k hajoamisnopeus (vuodessa hajoava osuus). Hajoamisnopeus ja muutamia muita tuotteisiin liittyviä parametreja on määritelty tiedostossa **hajotavara.par**:

```
0.02 0.032 1.0 0.8 ! Long: k, prodC, SubstRate, ReuseRateForEnergy
0.10 0.40 0.0 0.5 ! Mech
0.10 0.13 0.0 0.5 ! Chem
0.30 0.05 0.8 0.0 ! Energiabiomassa
0.05 0.100 0.5 0.3 ! New products
```

Ensimmäisessä sarakeessa ovat tuoteryhmien hajoamisnopeudet, toisessa tuotteen valmistuksessa vapautuva hiili osuutena tuotteen sisältämästä hiilestä, kolmannessa sarakeessa on korvausvaikutus ja neljännessä uusiokäytön osuus. Hajoamisnopeudet ja tuotteiden valmistuksen hiilipäästöt perustuvat tutkimuskirjallisuuteen (esim. Liski ym.). Korvausvaikutus ilmaisee, kuinka paljon fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvat hiilipäästöt vähenevät puun käytön ansiosta. Energiabiomassan korvausvaikutus (0.8) on sama kuin tutkimuskirjallisuudessa yleisesti esitetty arvio (esim. Hoen ja Skog 1994, Diaz-Balteiro ja Rodriguez 2006). Pitkäkestoisten tuotteiden korvausvaikutus syntyy siitä, että puun käyttö rakenteisiin vähentää sementin ja teräksen käyttöä ja sitä kautta hiilipäästöjä, sillä sementin ja teräksen valmistus kuluttaa paljon energiaa. Laskelmassa tehdään oletus, että fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee, kun sementti- ja terästeollisuuden energiankäyttö vähenee.



Kuva 4. Tuotteiden hajoaminen Monsussa.

Uusiokäytön osuus on se osuus tuotteesta, mikä käytetään energiantuotantoon, kun tuote on tullut elinkaarensa päähän. Esim. arvo 0.6 pitkäkestoisille tuotteille tarkoittaa, että 60 % rakennusjätteiden, purettujen rakennusten yms. puusta käytetään energiantuotantoon. Laskelmia tehtäessä on ajateltava tulevaisuuden kierrätystä ja uusiokäyttöä, jolloin uusiokäytön osuus voidaan hyvällä syyllä olettaa suuremmaksi kuin se on historiallisesti ollut.

Energiabiomassan kohdalla valmistuksen hiilipäästö (0.05 eli 5 % energiabiomassan hiilestä) tarkoittaa oksien ja kantojen korjuun hiilipäästöjä. Muilla tuotteilla valmistuksen päästöt tarkoittavat sahan ja tehtaiden päästöjä.

Runkopuun korjuun hiilipäästöt lasketaan kaavasta

$$HR\% = 3.0 - 0.05Dq$$

jossa $HR\%$ on korjuun hiilipäästö (korjuussa vapautuva hiili prosentteina korjatun puutavaran sisältämästä hiilestä) ja Dq korjattujen puiden kvadraattinen keskiläpimitta (cm). Päästö on pienikokoisen puun korjuussa noin 2.5 % ja suurien puiden korjuussa noin 1.5 % ja vastaa tutkimuksissa saatuja tuloksia.

Puun kaukokuljetuksen hiilipäästöt lasketaan kuljetettavan tuoremassan, kuljetusmatkan, rekan kantavuuden ja polttoaineen kulutuksen perusteella. Tulokseen vaikuttaa parametritiedosto **energiapu.par**, jonka parametrit selityksineen ovat seuraavat:

- 150.00,'Aispuun kuljetusmatka'
- 100.00,'Energiapuun kuljetusmatka'
- 0.50,'Rekan polttoaineen kulutus kg/km'
- 30.00,'Kuorman max paino, tn'
- 0.00,'Oksien keruu avohakkuussa (1 = kerätään)'
- 0.00,'Oksien keruu luontaisessa uudistamisessa'
- 0.00,'Oksien keruu kasvatushakkuussa'
- 0.00,'Kantojen ja juurien keruu avohakkuussa'

- 0.00,'Kantojen ja juurien keruu luontaisessa uud.'
- 0.00,'Kantojen ja juurien keruu kasvatushakkuussa'
- 0.00,'Korjataan lämpötilaa avoalalla'
- 10.00,'Maksimikorjaus, %'
- 10.00,'PPA, jossa korjaus loppuu'

Samassa tiedostossa määritellään myös, kerätäänkö hakkuissa energiaoksia tai -kantoja. Koska parametrit ovat tapauskohtaisia, ne tulee tarkistaa tai määrittää uudelleen kunkin Monsu-laskennan alussa (Monsu kysyy, halutaanko parametrit määrittellä uudelleen). Kaukokuljetuksen hiilipäästö lasketaan yksikertaisesti polttoaineen kulutuksesta, joka riippuu kuljetusmatkasta ja kuormien lukumäärästä (joka riippuu rekan kantavuudesta ja korjattavan ainespuun ja energiapuun tuoremassasta).

Viimeiset kolme parametria määrittävät sen, suurennetaanko maan lämpötilaa avonaisilla alueilla. Jos näin tehdään, käyttäjän on ilmoitettava prosenttiluku, jolla lämpötilaa ja lämpötila-amplitudia suurennetaan, ja pohjapinta-ala, jossa korjaus loppuu. Korjausta pienennetään lineaarisesti metsikön pohjapinta-alan suurentuessa, ja se loppuu kokonaan, kun PPA saavuttaa viimeisen parametrin ilmoittaman arvon (10 m²/ha edellisessä esimerkissä). Tutkimuksissa (esim. Mannerkoski 2012) on havaittu, että metsämaa on kesäisin avoalalla lämpimämpää kuin metsässä, ja avoalan lämpöolot ovat myös äärevämmät.

Kaikki tiedoston **energiapuu.par** parametrit ovat tapauskohtaisia ja ne on syytä tarkistaa aina, kun laskelmia tehdään uudelle alueelle.

Tulostusesimerkkejä

Hiilitase tulostetaan taulukkomuodossa seuraavasti:

| Tunnus | 2013-2022 | 2023-2032 | 2033-2042 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Biomassan muutos, tn | 72 | 155 | 94 |
| Kuolleet puut, tn | 14 | 19 | 23 |
| Hakkuutähteet, tn | 282 | 241 | 288 |
| Karike + hajoaminen, tn | -174 | -241 | -271 |
| Maan hiilitase, tn | 122 | 19 | 39 |
| Puutavara, tn | 520 | 503 | 541 |
| Puunkorjuu, tn | -10 | -9 | -11 |
| Kaukokuljetus, tn | -3 | -3 | -3 |
| Valmistus, tn | -52 | -30 | -57 |
| Korvausvaikutukset, tn | 210 | 225 | 223 |
| Vanhat tuotteet hajoaminen, | -370 | -173 | -109 |
| Uudet tuotteet hajoaminen, t | -253 | -390 | -460 |
| Uusiokäyttö, tn | 83 | 80 | 77 |
| Tuotteiden hiilitase, tn | 125 | 203 | 200 |
| Kokonaistase, tn | 319 | 377 | 333 |

Osio 'Karike + hajoaminen' sisältää seuraavat komponentit

- Alkutilanteessa olevan orgaanisen aineen hajoaminen (alustettu orgaaninen aines) (-)
- Vuotuinen karikesato (+)
- Maan "uuden" orgaanisen aineen (kuolleet puut, karike, hakkuutähteet) hajoaminen (-)

Muut edellä selostetut komponentit tulostetaan erikseen. Vanhojen tuotteiden hajoaminen tarkoittaa ennen laskentakauden alkua valmistettujen tuotteiden hajoamista, ja se ei riipu metsän tulevasta käsittelystä (se on aina sama tietyille laskenta-alueelle). Nähdään, että vanhojen tuotteiden hajoamisessa vapautuu ajan kuluessa yhä vähemmän hiiltä. Uusien tuotteiden hajoaminen tarkoittaa laskentakauden aikana valmistettujen tuotteiden hajoamista.

Puunkorjuun hiilipäästöt ovat tyypillisesti noin 2 % korjatun puun hiilestä ja kuljetuksen hiilipäästöt ovat noin 1 %. Valmistuksen hiilipäästöt voivat olla merkittävät, varsinkin jos korjataan runsaasti kuusikuitupuuta (josta tehdään mekaanista massaa).

Se, onko hiilitase positiivinen ja kuinka suuri se on, riippuu eniten korjatun kuusikuitupuun määrästä, bioenergian korjuusta, oletetuista korvausvaikutuksista ja oletetusta uusiokäytöstä. Kaikkein eniten hiilitaseeseen vaikuttaa se, lisääntyykö vai väheneekö elävän puuston biomassa. Ilman korvausvaikutuksia ja uusiokäyttöä metsätalouden hiilitase on yleensä negatiivinen, ellei elävän puuston biomassa lisääny.

Taseen lisäksi saadaan tulostusta hiilivarastojen kehityksestä:

| Tunnus | 2012 | 2022 | 2032 | 2042 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Puuston hiili, 1000 tn | 3.1 | 3.1 | 3.3 | 3.4 |
| - Mänty, 1000 tn | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 1.7 |
| - Kuusi, 1000 tn | 0.8 | 0.8 | 1.1 | 1.2 |
| - Muut puulajit, 1000 tn | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| Maan hiili, 1000 tn | 97.1 | 97.6 | 97.5 | 97.7 |
| - Kivennäismaat, 1000 tn | 10.9 | 11.3 | 11.1 | 11.2 |
| - Suot, hapellinen, 1000 tn | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 |
| - Suot, hapeton, 1000 tn | 79.6 | 79.6 | 79.6 | 79.6 |
| Hiilivarasto yht., 1000 tn | 100.2 | 100.8 | 100.8 | 101.1 |

Jos alueella on soita, valtaosa hiilivarastosta on yleensä soiden hapettomassa kerroksessa. Tämä varasto on varsin vakaa, ellei soita ojiteta, jolloin hapeton kerros ohenee.

Yleensäkin laskelmat ovat epäluotettavampia turvemaidella kuin kivennäismailla, koska saatavissa oleva tieto on niukempaa. Esim. ojitettujen ja ojitamattomien soiden happitilanne (hapellisen kerroksen paksuus) ei yleensä ole käytettävissä mittaustietona. Turpeen hajoamisen simuloinnista Yasso-mallilla on vasta vähän kokemuksia.

Viitteitä

Díaz-Balteiro, L., Romero, C., 2003. Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach. *Forest Ecology and Management* 174, 447-457.

- Díaz-Balteiro, L., Rodriguez, L.C.E., 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration – A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management* 229, 247-258.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H., Haapala, H., 2002. Models for predicting stand development in MELA System. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 835. 116 p.
- Hyvän metsänhoidon suositukset. 2001. (Recommendations for good silviculture). Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapio. 95 pp. (in Finnish).
- Hyvönen, R., Olsson, B.A., Lundkvist, H., Staaf, H., 2000. Decomposition and nutrient release from *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L. logging residues. *Forest Ecology and Management* 126, 97-112.
- Karjalainen, T., Kellomäki, S., Pussinen, A., 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. *Silva Fennica* 28(2), 67-80.
- Karjalainen, T., 1996a. Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climate conditions. *Forest Ecology and Management* 80, 113-132.
- Karjalainen, T., 1996b. Model computations on sequestration of carbon in managed forests and wood products under changing climate conditions in Finland. *Journal of Environmental Management* 47, 311-328.
- Korpilahti, A. 1998. Finnish forest energy systems and CO₂ consequences. *Biomass and Bioenergy* 15(4/5), 293-297.
- Lamom, S.H., Savidge, R.A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25, 381-388.
- Laasasenaho, J., 1982. Taper curve and volume equations for pine spruce and birch. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 pp.
- Liski, J., Karjalainen, T., Pussinen, A., Nabuurs, G.-J., Kauppi, P., 2000. Trees as carbon sinks and sources in the European Union. *Environmental Science & Policy* 3, 91-97.
- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R., Karjalainen, T., 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31, 2004-2013.
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Sievänen, R., 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189, 168–182.
- Melin, Y., Petersson, H., Nordfjell, T., 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden—A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257, 1445-1451.
- Metsäteho, 2009. Feedstock supply chain CO₂-eq emissions. *Metsätehon Katsaus* 38. 4 pp.
- Mäkinen, H., Hynynen, J., Siitonen, J., Sievänen, R., 2006. Predicting the decomposition of Scots pine, Norway spruce and birch stems in Finland. *Ecological Applications*, 16(5), 1865-1879.
- Pukkala, T., Lähde, E., and Laiho, O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management* **258**: 207-216.

Pussinen, A., Karjalainen, T., Mäkipää, R., Valsta, L., Kellomäki, S., 2002. Forest carbon sequestration and harvests in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecology and Management* 158, 103-115.

Repola, J., 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4), 625-647.

Repola, J., Ojansuu, R., Kukkola, M., 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 53. 28 pp.

Romero, C., Rios, V., Díaz-Balteiro, L., 1998. Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: Theory and applications. *Journal of Operational Research Society* 49, 121-131.

Seely, B., Welham, C., Kimmins, H., 2002. Carbon sequestration in boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management* 169, 123-135.

Thomas, S.C., Malczewski, G. 2007. Wood carbon content of tree species in Eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environmental Management* 85, 659-662.

Wihersaari, M. 2005. Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. *Biomass and Bioenergy* 28, 435–443.

Yatskov, M., Harmon, M.E., Krankina, O.N., 2003. A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 1211-1226.

LIITE 3 Suunnitteluongelman muotoilu ja optimointimenetelmä MONSU-mallissa

Optimoinnissa tavoitteiksi asetettiin 10-vuotiskausittaiset puulajikohtaiset hakkuumäärät tukille (HT) ja kuidulle (HK), ainespuutilavuus suunnittelukauden lopulla (LT) sekä nettonykyarvo (NNA) laskettuna 1 prosentilla. Optimointiongelma, jossa etsitään paras aluetason tavoitteet täyttävä käsittelyvaihtoehto kuviolle, kuvattiin additiivisena hyötyfunktiona seuraavasti:

$$z = w_{NNA}u_{NNA}(NNA) + w_{LT}u_{LT}(LT) + \sum_{p=1}^5 w_{HTp}u_{HT}(HT_p) + \sum_{p=1}^5 w_{HKp}u_{HK}(HK_p)$$

missä w on tavoitteen paino, u on tavoitteen osahyötyfunktio ja p on 10-vuotiskausi.

Osahyötyfunktio nettonykyarvolle oli lineaarinen, pienimmän arvon saadessa osahyödyn 0 ja suurimman arvon saadessa osahyödyn 1. Hakkuutavoitteiden osahyöty kasvoi lineaarisesti nollassa tavoitearvoon ja laski lineaarisesti nolnaan tavoitearvon jälkeen. Tavoitepainojen (w) yhteenlaskettu arvo oli 1. Kaikilla tavoitteilla oli sama painoarvo, 0.03226. Hakkuumäärätavoitteen painoa nostettiin, jos se ei muuten saavuttanut tavoitearvoa ja tällöin NNA:n ja LT:n laskettiin vastaavasti.

Optimointiongelma ratkaistiin käyttämällä meta-heuristiikkoihin kuuluvaa simulated annealingia (SA) (Lockwood and Moore 1992; Dowland 1993; Öhman and Eriksson 1998). SA käy läpi ratkaisuavaruutta vaihdellen kuvioden käsittelyvaihtoehtoja hyväksyen silloin tällöin myös ratkaisua huonontavia vaihtoehtoja ja näin etsien hyviä lokaaleja optimeita. SA ajon jälkeen kaikkien kuvioden kaikki käsittelyvaihtoehdot käytiin vielä läpi niin monta kertaa kuin parannusta ratkaisuun vielä saatiin aikaan. Tämä SA:n ja Heron (Pukkala and Kangas 1993; Pukkala and Heinonen 2006) yhdistelmä on tuottanut aikaisemmin hyviä tuloksia vastaavissa ja vielä vaikeammassakin metsäsuunnittelun optimointitehtävissä (Pukkala and Kurttila 2005). Parhaat mahdolliset parametrit optimointimenetelmille etsittiin kokeilemalla tapauskohtaisesti ennen varsinaisia optimointeja. Paras löydetty ratkaisu raportoidaan.

Nettotulojen laskennassa käytettiin tienvarsihintoja ja Rummukainen ym. (1995) hakkuukustannusfunktioita (Taulukko liite3.1). Metsänhoitokustannukset vaihtelivat Suomen eri osa-alueella (Taulukko liite3.2).

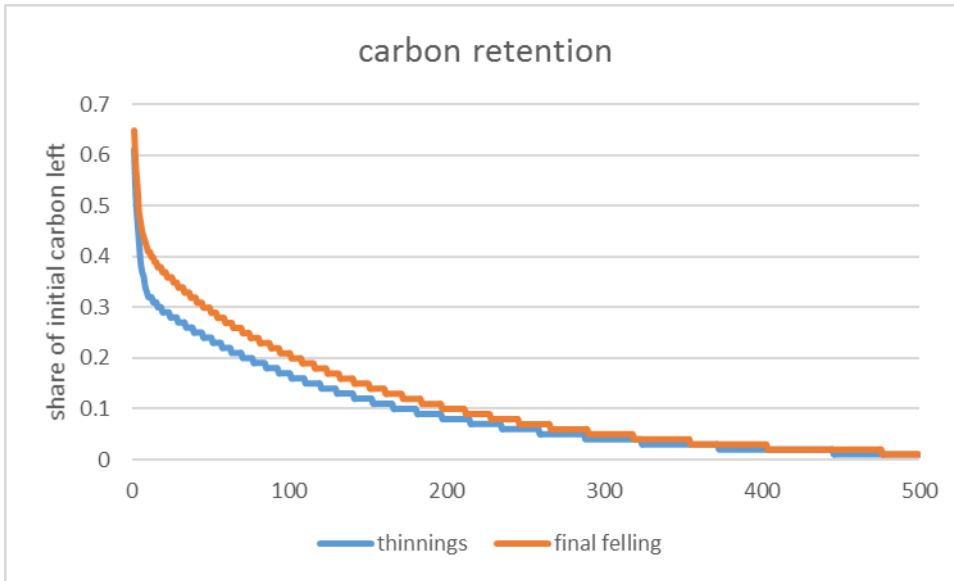
Taulukko liite3.1 Analyyseissä käytetyt puutavaralajien hinnat ja mitat Suomen eri osissa. Samoja mittoja käytettiin kaikilla alueilla, mutta hinnat vaihtelivat alueittain. ES = Etelä-Suomi, KS = Keski-Suomi, PS = Pohjois-Suomi.

| | ES | KS | PS | Koko Suomi | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|-----------|
| | €/m ⁻³ | €/m ⁻³ | €/m ⁻³ | Lpm., cm | Pituus, m |
| Mänty tukki | 58 | 55 | 54 | 15 | 4.3 |
| Mänty kuitu | 29 | 28 | 25 | 6 | 2.7 |
| Kuusi tukki | 56 | 54 | 53 | 16 | 4.3 |
| Kuusi kuitu | 30 | 29 | 26 | 6 | 2.7 |
| Lehti tukki | 49 | 45 | 42 | 18 | 3.7 |
| Lehti kuitu | 29 | 29 | 28 | 6 | 2.7 |
| Energiapuu | 20 | 20 | 20 | 3 | 2.0 |

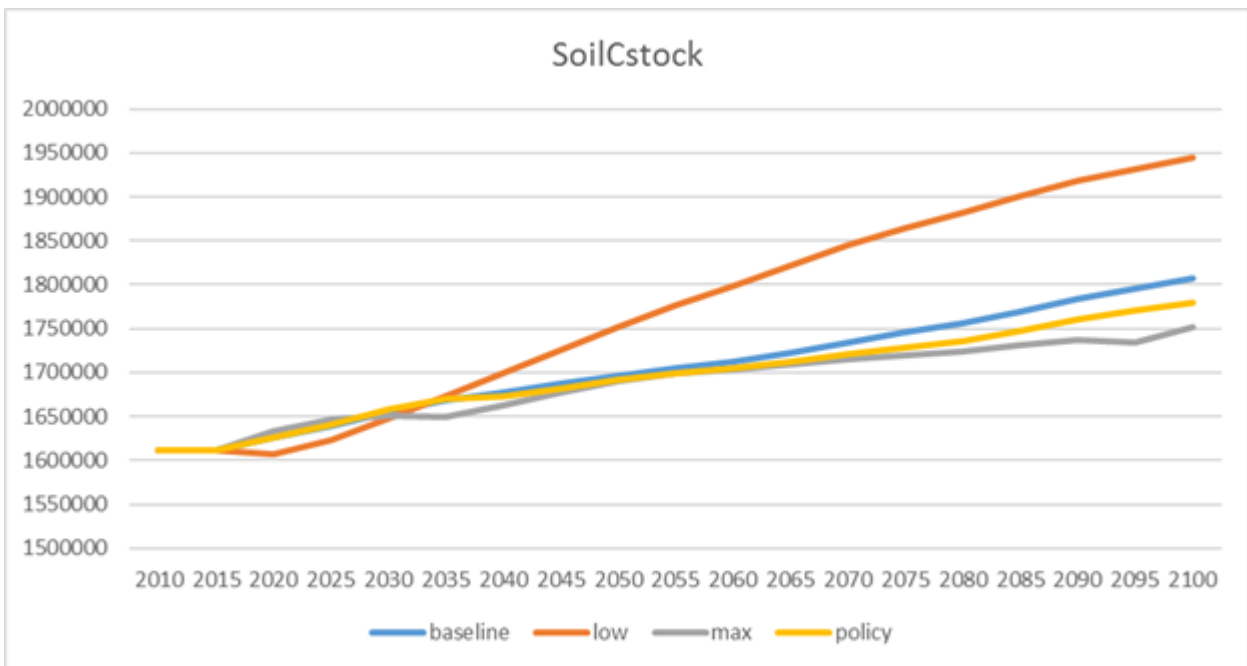
Taulukko liite 3.2 Analyseissä käytetyt metsänhoitotoimien hinnat (€/ha) Suomen eri alueilla.

| | Etelä-Suomi | Keski-Suomi | Pohjois-Suomi |
|------------------------------|-------------|-------------|---------------|
| Uusistusalan raivaus | 204 | 190 | 142 |
| Laikutus | 310 | 314 | 277 |
| Äestys | 235 | 227 | 174 |
| Mätästys | 380 | 374 | 309 |
| Kylvö | 245 | 260 | 203 |
| Istutus | 698 | 703 | 631 |
| Taimikon varhaishoito | 347 | 312 | 300 |
| Taimikon harvennus | 447 | 442 | 408 |
| Nuoren metsän hoito | 450 | 394 | 343 |
| Avohakkuualan ennakkoraivaus | 265 | 260 | 186 |

LIITE4 EFISCEN laskennassa käytettyjä tunnuksia



Kuva liite4.1 Puutuotteiden sisältämän hiilen vapautuminen harvennus- ja päätehakuissa CO2FIX mallin oletuksilla laskettuna.



Kuva liite4.2 Maaperän hiilivaraston kehitys EFISCEN-mallin mukaan eri hakkuuskenaarioissa.

LIITE 5 PREBAS-mallin tunnuksia

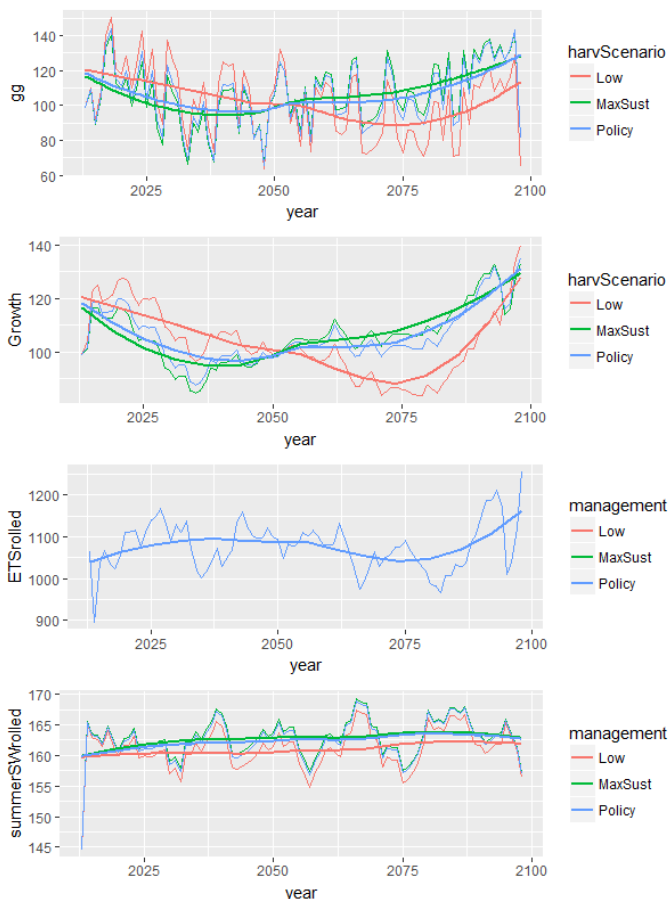
Related to climate sensitivity of PREBAS results, some analysis:

First pane is the gross growth, and a smoothed line with geom_smooth
 Second is Running mean of gross growth in 10 year window (see function below)
 Third is ETS mean over country
 Fourth is summer soil moisture average.

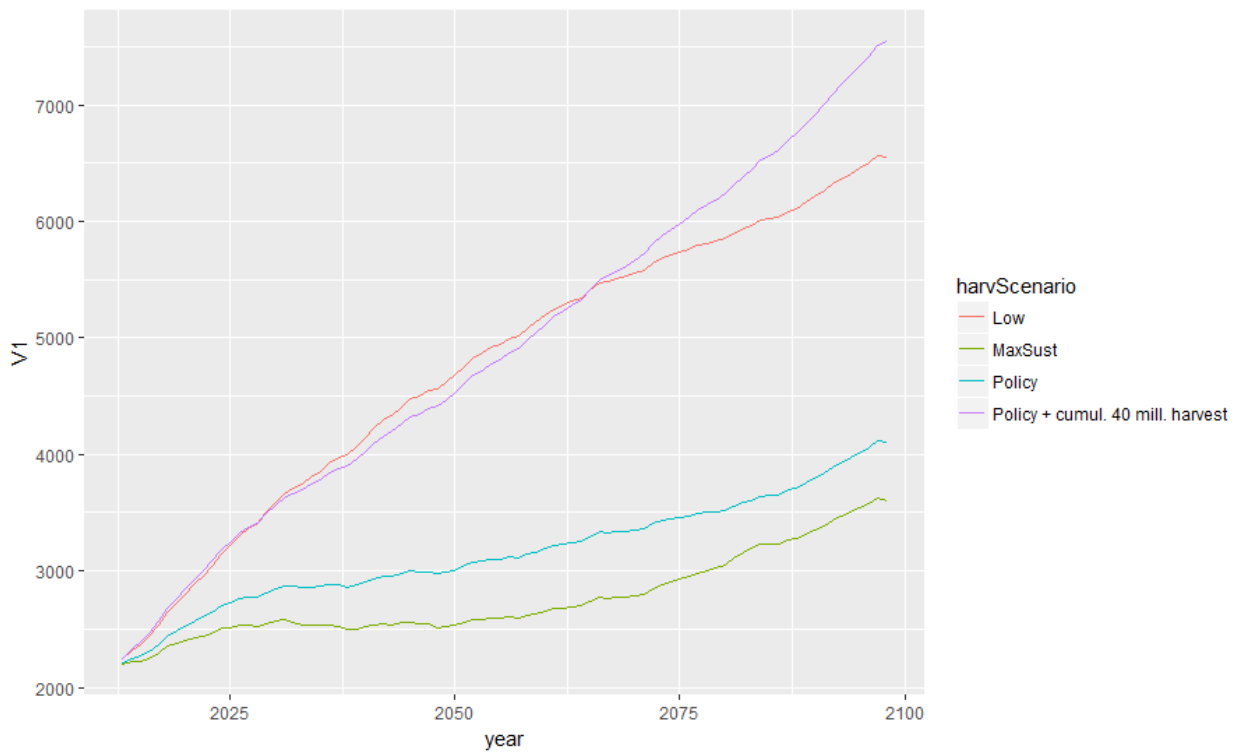
Some observations:

First year had a very low moisture, which may reflect in growth estimates. Thereafter, soil moisture probably plays lesser role, as the correlation in the entire data series is 0.02. NOTE first year water deficit may still exist, but it does not weight much on long data series.

However, ETS has average correlation of 0.61 (calculated from annual results). After first two years, the following decade has good ETS, which maintains high growth, which then decreases, which seem to reduce growth. End of the century increase in growth is clearly stimulated by ETS. It is particularly clear for MaxSust and Policy, but harder to detect from low scenario because the trend.



Kuva liite5.1 PREBAS-mallin kasvun kytkeytyminen ilmastotunnuksiin.



Kuva liite5.2 Kasvun pienenemisen ja kuolleisuuden lisääntymisen vaikutus Matala-skenaarion puuston tilavuuden kehitykseen.