



Olli Salminen¹, Saija Kuusela², Pekka Punttila² ja Kimmo Syrjänen²

Luonnonhoidon ja lisäsuojelun vaikutukset metsien monimuotoisuudelle tärkeisiin rakennepiirteisiin ja puuntuotannon mahdollisuuksiin

Salminen O., Kuusela S., Punttila P., Syrjänen K. (2023). Luonnonhoidon ja lisäsuojelun vaikutukset metsien monimuotoisuudelle tärkeisiin rakennepiirteisiin ja puuntuotannon mahdollisuuksiin. Metsätieteen aikakauskirja 2023-10721. Tutkimusartikkeli. 35 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10721>

Tiivistelmä

Tutkimuksessa arvioitiin MELA-ohjelmiston mallipohjaiseen tarkasteluun perustuen nykyisen perusluonnonhoidon ja tehostetun luonnonhoidon vaikutuksia metsien monimuotoisuutta kuvaavien rakennepiirteiden kehitykseen vuosina 2015–2064. Vaikutusarviot tehtiin 70 miljoonan kuutiometrin vuosittaisen runkopuukertymän (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän (TasoSY) mukaisilla hakkuiden tasoilla. Molemmat luonnonhoidon mallit perustuivat nykyisiin metsänhoitosuosituksiin ja vallitsevaan tasaikäisrakenteiseen metsien hoitoon. Voimaperäisimpänä toimenpiteenä tehostetun luonnonhoidon mallissa puuntuotannon ulkopuolelle siirrettiin monimuotoisuudelle arvokkaiden puuston rakennepiirteiden perusteella 1,2 miljoonaa hehtaaria nykyistä puuntuotannon metsämaata. Tämä lisäsuojelu, joka kohdistui etenkin korpiin ja iäkkäisiin kangasmetsiin, kasvatti suojellun metsämaan (ei sisällä kitu- tai joutomaata) pinta-alan nykyiseen nähden Etelä-Suomessa 2,7- ja Pohjois-Suomessa 1,4-kertaiseksi. Muina tehostetun luonnonhoidon toimina tarkasteltiin säästöpuiden määrän ja järeyden kasvatusta, sekapuuosuuden lisäystä harvennushakkuissa jätettävässä puustossa, ainespuukokoisen lehtipuun korjuun rajoittamista harvennushakkuiden aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa sekä kantojen nostosta luopumista. Puuntuotannon metsämaalla hakkuut määrittivät pitkälti metsien rakenteen kehitystä. Metsien monimuotoisuudelle tärkeiden rakennepiirteiden kehitys oli TasoSY-ratkaisuissa Taso70:n vastaavia selvästi heikompi, ja merkittävien monimuotoisuusvaikutuksien kehittymiselle on sitä paremmin mahdollisuuksia, mitä maltillisempia hakkuuta toteutetaan. Hakkuutasosta riippumatta tehostetun luonnonhoidon mallissa säästyivät enemmän monimuotoisuudelle merkittäviä rakennepiirteitä kuin perusluonnonhoidon mallissa. Erityisesti lisäsuojelun merkitys korostui kasvavien hakkuiden aikana, ja TasoSY:n tehostetun luonnonhoidon ratkaisun rakennepiirteiden kehitys oli hyvin lähellä Taso70:n perusluonnonhoidon mukaista ratkaisua. Merkittävästä lisäsuojelusta ja muista luonnonhoidon toimenpiteistä huolimatta tehostetun luonnonhoidon malli antaisi tämän tutkimuksen perusteella mahdollisuuksia myös runkopuun hakkuumäärien lisäykseen viime vuosikymmenen (2011–2020) aikana keskimäärin toteutuneeseen runkopuun hakkuumäärään (68 milj. m³ v⁻¹) verrattuna.

Asiasanat hakkuumahdollisuudet; kuollut puu; MELA; monimuotoisuus; skenaariotarkastelu; vanhat metsät; VMI

Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki; ²Suomen ympäristökeskus (Syke), Helsinki

Sähköposti o.salminen@outlook.com

Hyväksytty 6.8.2023

1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Suurimman puuntuotannollisesti ylläpidettävän hakkuukertymän arviot ovat 1990-luvulta lähtien osoittaneet, että vain puuntuotannon kannalta katsottuna Suomen metsät olisivat koko maan tasolla mahdollistaneet selvästi suuremmat hakkuut, kuin mikä toteutuneiden hakkuiden taso on ollut. Kotimaisen puun hakkuumääriin vaikuttavat kuitenkin hakkuumahdollisuuksien lisäksi etenkin puusta tehtävien tuotteiden kysyntä, metsänomistajien puunmyyntihalukkuus ja tuontipuun määrä. Viime vuosina sellun ja kartongin kysynnän kasvaessa ja raakapuun tuonnin supistuttua Suomen metsien hakkuukertymä, joka pysyi 1990-luvun lopulta 2010-luvun alkupuolelle asti keskimäärin noin 60 milj. m³:n tasolla, on alkanut nousta ollen vuonna 2015 68,0 ja vuonna 2018 ennätyselliset 78,2 milj. m³ ja vuonna 2019 72,9 ja 2020 69,0 milj. m³ (Luonnonvarakeskus 2021a). Vireillä olevien biotalouden investointisuunnitelmien ja puun tuonnin vähenemisen seurauksena kotimaisen puun kysyntä ja vuosittaiset hakkuumäärät saattavat vielä kasvaa 10–15 miljoonalla kuutiometrillä, ellei olemassa olevaa tuotantokapasiteettia vastaavasti suljeta. Toisaalta Suomen valtion hiilineutraalisuustavoitteet ja kansainväliset sitoumukset esim. EU:n LULUCF-asetuksen kautta voivat edellyttää merkittävää metsien hiilinielujen säilyttämistä ja näin hillitä hakkuiden kasvua. Vuosien 2014–2018 valtakunnan 12. metsien inventoinnin (VMI12:n) maastoaineistojen perusteella maakunnittain laskettu arvio suurimmasta puuntuotannollisesti ylläpidettävästä runkopuun vuosittaisesta hakkuukertymästä on 80,5 milj. m³ vuosille 2016–2025 ja 88,9 milj. m³ vuosille 2026–2035 (Luonnonvarakeskus 2021b; Hirvelä ym. 2023).

Hakkuumäärien kasvu on aiheuttanut huolta metsien monimuotoisuuden säilymisestä. Suomen luontotyyppeiden uhanalaisuusarvioinnin (Kouki ym. 2018) mukaan Suomen metsien luontotyypeistä 76 % on uhanalaisia. Uhanalaisimpia metsäluontotyyppejä ovat vanhat metsät, karut kasvupaikat sekä tietyt lehtotyypit (kynäjalavalehdot ja tuoret, runsasravinteiset lehdot) ja erikoistyyppit kuten esim. jalopuustoiset kangasmetsät. Uhanalaisuusarvioinnissa todetaan, että erityisen kiireellistä on säilyttää vanhoja metsiä ja vanhoja puuyksilöitä sisältäviä metsiä, koska niiden palauttaminen ennalleen esimerkiksi luonnonhoidon keinoin on mahdotonta. Suomen lajien uhanalaisuusarviointi (Hyvärinen ym. 2019) puolestaan osoittaa, että metsät ovat tärkein elinympäristö ylipäätään kaikille lajeille ja myös uhanalaisille lajeille. Yhteensä metsissä elää 2133 Punaisen listan (hävinnyt, uhanalainen, silmälläpidettävä tai puutteellisesti tunnettu) lajia. Uhanalaisista lajeista ensisijaisesti metsissä elää 31,8 % (833 lajia). Metsälajiston uhanalaistuminen ei ole pysähtynyt tavoitteista huolimatta. Metsälajien tilanteessa aidot positiiviset muutokset (115 lajia) edelliseen uhanalaisarviointiin (Rassi ym. 2010) nähden ovat suurelta osin seurausta ilmaston lämpenemisestä, kun taas aidot negatiiviset muutokset (142 lajia) johtuvat ennen kaikkea pitkällä aikavälillä tapahtuneesta vanhojen metsien sekä kookkaiden puiden vähenemisestä, lahoppuun (kuolleen puun) vähäisyydestä sekä kuloalueiden ja muiden luontaisen sukkession alkuvaiheiden vähenemisestä (Hyvärinen ym. 2019). Edellä mainitut syyt ovat olleet ensisijainen uhanalaisuuden aiheuttaja 73,8 %:lla metsien uhanalaisista lajeista ja näiden syiden arvioidaan olevan metsälajien keskeisimpiä uhkatekijöitä myös tulevaisuudessa (Hyvärinen ym. 2019).

Luonnonvarakeskus ja Suomen ympäristökeskus julkaisivat vuonna 2016 raportin ”Biotalouskenaarioiden mukaisten hakkuiden vaikutukset metsien monimuotoisuudelle tärkeisiin rakennepiirteisiin” (Korhonen ym. 2016), jossa vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian valmistelua varten tehtyihin hakkuuskenaarioihin perustuen tarkasteltiin metsien monimuotoisuudelle merkittävien rakennepiirteiden kehitystä. Laskelmien perusteella raportissa arvioitiin, että metsien käyttöä voidaan tiettyyn rajaan asti lisätä, mikäli samanaikaisesti tehostetaan metsien monimuotoisuuden edistämiskeinoja: lisätään METSO-ohjelman resursointia, kasvatetaan järeiden elävien säästöpuiden määrää, vältetään puun korjuuta arvokkailta luontokohteilta sekä minimoidaan kuolleen puun tuhoutumista ja korjuuta hakkuissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten nykyisillä luonnonhoidon käytännöillä ja laajamittaisesti käytettävillä tehostetun luonnonhoidon menetelmillä voitaisiin vaikuttaa monimuotoisuudelle tärkeiden metsien rakennepiirteiden kehitykseen, ja mitkä ovat tehostetun luonnonhoidon menetelmien vaikutukset puuntuotantoon. Tutkimus toteutettiin skenaarioanalyysinä MELA2016-ohjelmistoa käyttäen. Skenaariot ulottuivat vuoteen 2065 ja niissä tarkasteltiin metsien kehitystä kahdella hakkuutasolla, joissa metsien käsittely perustui joko vain vallitseviin metsänkäsittelymenetelmiin pohjautuvaan luonnonhoitoon tai toisaalta tehostetun luonnonhoidon menetelmiin. Molemmissa luonnonhoidon malleissa sovellettiin tasaikäisrakenteista metsien käsittelyä.

Tehostetun luonnonhoidon mallilla pyrittiin arvioimaan osittain jo nykyisiin metsäsertifiointijärjestelmiin sisältyviä keinoja, jotka pyrkivät lisäämään talousmetsien monimuotoisuutta, olettaen, että ne kattaisivat koko puuntuotannon maan. Esimerkiksi FSC-sertifiointi edellyttää 5 %:n pinta-alan tiukkaa suojelua, kohdistuen etenkin tiettyihin metsäelinympäristöihin, lisäksi 5 %:n pinta-alalla monimuotoisuuden lisäämistä ja muita talousmetsissä monimuotoisuutta edistäviä toimia esimerkiksi säästöpuiden osalta (Suomen FSC-yhdistys 2011). Tehostetun luonnonhoidon mallia ei kuitenkaan voi suoraan rinnastaa FSC-sertifiointiin, koska tehostetun luonnonhoidon mallissa mm. hakkuiden ulkopuolelle siirrettiin pysyvästi puuntuotannon metsämaata ja kohdevalikoima poikkeaa osin muutenkin mainitusta sertifiointijärjestelmästä. Tutkimuskysymyksen suhteen samantapaisia tarkasteluja on tehty Valtioneuvoston TEAS KEIMO -hankkeessa ”Kustannusvaikuttavat keinot metsäluonnon monimuotoisuuden köyhtymisen pysäyttämiseksi” (Kärkkäinen ym. 2021) ja VASU-hankkeessa ”EU:n biodiversiteetti-strategian 2030 vaikutus Suomen kannalta” (Kärkkäinen ja Koljonen 2021). Näissä hankkeissa tehostetun luonnonhoidon toimia kohdennettiin samaan tapaan metsälajiston kannalta arvokkaiksi tunnettuihin elinympäristöihin kuten tässä tutkimuksessa. Tutkimukset perustuivat myös skenaariolaskelmiin, mutta sovelletut skenaariotyökalut erosivat. Em. tutkimuksissa ei monimuotoisuuden kannalta tärkeiden metsien rakennepiirteiden kehitystä tarkasteltu yhtä yksityiskohtaisesti kuin tässä tutkimuksessa, mutta niissä käsiteltiin luonnonhoidon toimenpiteiden ja lisäsuojelun kustannusvaikutuksia, jota ei puolestaan tässä tutkimuksessa tehty.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Laskenta-aineisto

Tutkimus perustui valtakunnan metsien vuosina (VMI) 2013–2017 mitattuun koeala-aineistoon (Valtakunnan metsien ... 2013; 2017), jossa vuosi 2013 lukeutui VMI11:een ja muut vuodet VMI2:een. Aineiston muodostivat metsä- ja kitumaan koealat (61 950 kpl) sisältäen myös puuntuotannon ulkopuolella olleet koealat kuten luonnon- ja kansallispuistot, luonnonsuojelulain nojalla rauhoitetut ja Metsähallituksen omilla päätöksillä suojellut alueet sekä myös metsälain 10 §:n tarkoittamat monimuotoisuuden kannalta erityisen tärkeät elinympäristöt. Metsä- ja kitumaan pinta-ala oli yhteensä 22,8 milj. ha, ja sillä olevan puuston tilavuus 2460 milj. m³. Puuntuotantoon käytettävissä olevan metsämaan, jolle myös metsätalouden toimenpiteet kohdistuvat, pinta-ala oli 18,4 milj. ha ja puuston tilavuus 2176 milj. m³ (Taulukko 1).

Taulukko 1. Valtakunnan metsien inventoinnissa vuosina 2013–2017 mitatuista metsä- ja kitumaan koealoista muodostetun aineiston käsittelyluokittaiset pinta-alat ja puuston tilavuus koko Suomessa.

Käsittelyluokka	Metsämaa	Kitumaa	Yhteensä	Osuus, %
		Pinta-ala, milj. ha		
Ensisijaisesti puuntuotanto	17,3	- *)	17,3	75,7
Rajoitettu puuntuotanto	1,1	1,4	2,6	11,2
Puuntuotannon ulkopuolella	1,8	1,1	3,0	13,1
Yhteensä	20,3	2,5	22,8	100,0
		Tilavuus, milj. m ³		Osuus, %
Ensisijaisesti puuntuotanto	2026	- *)	2026	82,3
Rajoitettu puuntuotanto	150	34	184	7,5
Puuntuotannon ulkopuolella	219	31	250	10,2
Yhteensä	2409	66	2475	100,0

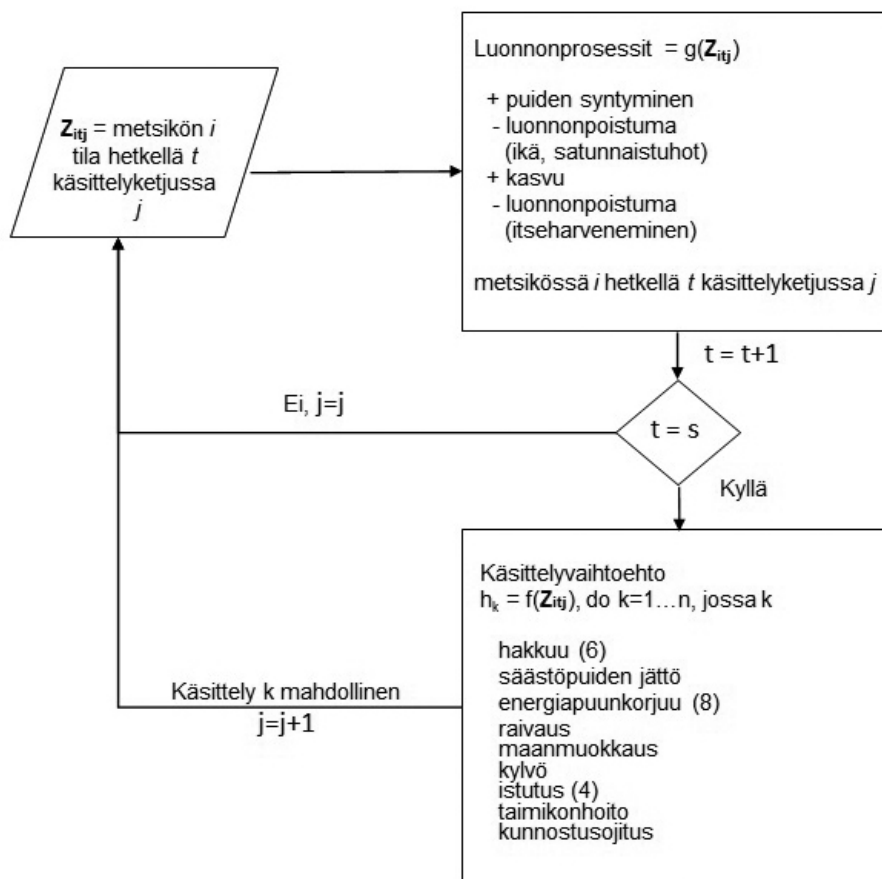
*) Kitumaat ovat joko rajoitetussa puuntuotannossa tai puuntuotannon ulkopuolella mutta käsittelyluokasta huolimatta niille ei tehty toimenpiteitä.

2.2 MELA-ohjelmisto

Nykyisten metsänhoitokäytäntöjen ja tehostetun luonnonhoidon vaikutuksia metsiemme monimuotoisuutta kuvaavien keskeisimpien rakennepiirteiden kehitykseen tarkasteltiin MELA2016-ohjelmistolla (Hirvelä ym. 2017) laskettujen kehitysarvioiden perusteella. Alun perin valtakunnan metsien inventointiin liittyvien hakkuumahdollisuuksien arviointiin kehitetty MELA-ohjelmisto (Siitonen 1983) koostuu metsiköiden käsittely- ja kehitysvaihtoehtoja tuottavasta, diskreettiin dynaamiseen simulointiin perustuvasta metsikkösimulaattorista (Siitonen ym. 1996) ja näitä vaihtoehtoja vertailevasta lineaarisen optimoinnin sovelluksesta (Lappi 1992). MELA-ohjelmistoa on käytetty useissa politiikka- ja strategiatöiden taustaselvityksissä: Kansallinen metsäohjelma 2010 ja 2015 (Nuutinen ja Salminen 1999; Salminen ja Hirvelä 2008), Suomen biodiversiteettiohjelman arviointi (Auvinen ym. 2007), Kansallinen metsästrategia 2025 (Valtioneuvoston ... 2015), Kansallisen energia- ja ilmastostrategia 2016 (Lehtonen ym. 2016), Suomen metsien CO₂-vertailutason laskenta Kioto II kaudelle vuosille 2013–2020 (UNFCCC 2011) ja EU:n määrittämälle LULUCF vertailukaudelle vuosille 2021–2025 (National ... 2019).

MELA-ohjelmistossa metsien kehitystä ohjaavat puiden kasvuun, kuolemiseen ja puiden syntyyn liittyvät empiiriset puutason deterministiset luonnonprosessimallit sekä simuloitavat toimenpiteet (Kuva 1). Ohjelmiston sisältämien tapahtumamäärittelyiden ja niitä ohjaavien käsittelyohjeiden avulla simulointi tuottaa automaattisesti kullekin metsikölle joukon (1–9999) vaihtoehtoisia toimenpideketjuja, joista optimointi valitsee koko metsäalueen kannalta tavoitefunktion ja rajoitteiden suhteen parhaimman tuloksen tuottavat vaihtoehdot. Tavoitefunktio ja rajoitteet ovat vapaasti määriteltävissä kaikkien MELA-muuttujien joukosta. Tässä tutkimuksessa, jossa pääpaino oli puuntuotannon metsämaan tarkastelussa, tavoitefunktiona käytettiin nettotuottojen nykyarvon maksimointia, joka on todettu metsätalouteen sopivaksi taloudelliseksi kriteeriksi (esim. Samuelson 1976). Rajoitteet kohdistuivat sekä puuntuotantoon että erilaisiin monimuotoisuutta kuvaaviin muuttujiin.

Nettotuottojen nykyarvon laskenta koostui puun myynnistä saatavista hakkuutuloista, joista vähennettiin hakkuun ja metsänhoidon kustannukset. Hakkuutulot laskettiin teollisuuspuulle (tukki- ja kuitupuu) puu- ja puutavaralajeittain määritetyillä tienvarsihinnoilla ja energiapuulle käyttöpistehinnoin. Kustannukset saatiin kunkin työlahin ajanmenekin ja yksikköhinnan tulona (ks. Hirvelä ym. 2017, 2023). Laskenta otti näin huomioon esimerkiksi poistettavien runkojen koon ja hehtaarikohtaisen hakkuukertymän vaikutukset, eikä laskenta edellyttänyt etukäteen annettuja



Kuva 1. Käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen simulointi MELA2016-ohjelmistossa. Suluissa oleva numero tapahtuman perässä osoittaa ko. tapahtumaan liittyviä mahdollisia vaihtoehtoisia menetelmiä (esim. ainespuuhakkuulle oli 6 erilaista hakkuutapaa: runkolukuun perustuva harvennushakkuu, pohjapinta-alaan perustuva harvennushakkuu, ylispuu-, avo-, siemenpuu- ja suojuspuuhakkuu).

minimikertymiä. Eriaikaiset tuotot ja kustannukset arvostettiin ajallisesti diskonttaamalla ne 4 %:n korkokannalla laskennan alkuhetkeen. Käsittelyvaihtoehtojen simulointi ei kuitenkaan perustunut 4 %:n laskentakorkoon, vaan vuoden 2013 mukaisiin metsänhoitosuosituksiin (ks. luku 2.3), joiden joukosta laskentakoron mukaisella ajan arvostuksella optimointi haki tavoitefunktion suhteen parhaat ratkaisut. Optimoinnin rajoitteista ja sovelletuista metsänhoidon suosituksista johtuen efektiivinen korko jäi 4 %:n korkoa pienemmäksi. Metsien monimuotoisuudelle tärkeiden rakennepiirteiden lisäämiseen pyrkivät toimet olivat mukana epäsuorasti vain hakkuutulojen mahdollisen vähenemisen kautta, sillä tutkimuksen tavoitteena ei ollut selvittää monimuotoisuudelle merkittävien rakennepiirteiden lisäysten hintaa tai taloudellisia edellytyksiä, vaan arvioida niiden vaikutuksia hakkuumahdollisuuksiin. Näin esimerkiksi lisäsuojeluun siirtyneen maan ja puuston hinnat eivät olleet mukana kustannuksina. MELA-ohjelmiston sisältämän nettotuottojen nykyarvon laskennan kuvaus on esitetty tarkemmin mm. Salminen ym. (2013) ja Hirvelä ym. (2017).

MELA-ohjelmiston keskeisimmät luonnonprosessien kehitysmallit on esitetty julkaisussa Hynynen ym. (2002). Puun pohjapinta-alan kasvumalli on lisäksi kalibroitu MELA2016-ohjelmistossa VMI11:ssä (2009–2013) mitatun läpimitan kasvun osalta vastaamaan vuosien 1984–2013 läpimitan kasvun indeksikorjattua keskitasoa. Vaikka tehty kalibrointi lisää MELA:n tuottamaa tilavuuden kasvun arviota, on näin saatu arvio selvästi VMI12:ssä mitattua kasvua pienempi (Hirvelä ym. 2023). MELA2016:n tilavuuskasvun arviota on tarkennettu ottamalla huomioon kalibrointijak-

son keskivuodesta (1999) vuoteen 2017 tapahtunut keskilämpötilan ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutus puuston kasvuun. MELA:n tuottama kasvun arvio oli vuosille 2015–2024 107,3 milj. m³ vuodessa vuosina 2015–2017 toteutuneilla hakkuiden tasolla, kun VMI12:ssa mitattu kasvu oli 107,8 milj. m³ (Luonnonvarakeskus 2021c).

Luonnonpoistuman arvio, joka keskeisesti määrittää lahoppuun määrän potentiaalisen kehityksen, pohjautuu MELA-ohjelmistossa metsikön sisäisestä kilpailusta (puun asemasta metsikössä) sekä puun ikääntymisestä johtuvaan yksittäisen puun eloonjäämisen/kuolemisen todennäköisyyssmalliin (Hynynen ym. 2002). Yksittäisen puun kuolemissmallia täydentää puuston ylitheydestä aiheutuva itseharvenemismalli. Säästöpuille oli käytössä samat mallit huolimatta esim. mahdollisesti lisääntyneestä tuulituhoriskistä. Tämän raportin laskelmissa luonnonpoistuma jäi kokonaisuudessaan metsään, kun käytännössä luonnonpoistumasta käyttöpuuksi on korjattu 11–13 % (Ihalainen 2013; Korhonen ym. 2021). MELA-ohjelmiston luonnonpoistuma-arvio ei sisällä suuria satunnaisia esim. myrskyjen aiheuttamia tuhoja, jotka voivat sysäyksittäin lisätä kuollutta puustoa. Tosin suurilta tuhoalueilta käyttökelpoinen puuainekorjataan useimmiten varsin tehokkaasti pois (Ihalainen ja Ahola 2003; Viiri ym. 2011; Korhonen ym. 2016).

2.3 Perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) käsittelymallit

Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta luonnonhoidon mallia kahta hakkuukertymätasoa vasten. Tarkasteltavat luonnonhoidon mallit olivat nykyisten metsänhoitosuosituksen mukainen luonnonhoidon taso eli ns. tavanomaisen luonnonhoidon tai perusluonnonhoidon malli (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon malli (TLH). Tulokset esitetään koko Suomen osalta sekä osittain myös Etelä- ja Pohjois-Suomi jaolla. Pohjois-Suomi käsittää kolme pohjoisinta maakuntaa: Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa ja Lappi. Muut maakunnat ja Ahvenmaa muodostavat Etelä-Suomen.

Metsien käsittely perustui molemmissa luonnonhoidon malleissa pääosin vuoden 2013 metsänkäsittelysuositukseen (Äijälä ym. 2014) sekä energiapuun korjuun ja kasvatuksen suositukseen (Koistinen ym. 2016). Taimikonhoitoa ja avohakkuun jälkeistä viljelyä lukuun ottamatta kaikki toimenpiteet olivat vaihtoehtoisia, jolloin mm. uudistushakkuille simuloitiin vaihtoehtona kasvatushakkuu, mutta vastaavasti myös kasvatushakkuille uudistushakkuu, jos suositusten uudistamiskriteerit täyttyivät. Molemmille hakkuutavoille oli aina vaihtoehtona myös kasvatusta ilman toimenpiteitä. Uudisojitus, lannoitus, kulotus, pystypuiden karsinta, yläharvennus ja eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatusta eivät olleet mukana vaihtoehtojen valikoimassa. MELA2016-ohjelmisto ei toistaiseksi sisällä kehitysmalleja kulotukselle, pystypuiden karsinnalle eikä eri-ikäisrakenteiselle metsänkasvatukselle, uudisojitusta ei nykyisin tehdä ja lannoitus on pääosin terveyslannoitusta.

Metsänhoitosuosituksen mukaisesti harvennushakkuissa voitiin korjata joko vain metsäteollisuuden ainespuuta (tukki- ja kuitupuuta), samanaikaisesti sekä aines- ja energiapuuta ns. yhdistetyssä korjuussa tai vain energiapuuta. Taimikonhoidossa ja harvennushakkuissa poistettava runkoluku noudatti suositusten mukaisia rajoja. Pohjapinta-alaohjeeseen perustuva harvennusuusi vaihtoehto oli mahdollinen, kun harvennussmallien alempi leimauskäyrä saavutettiin ja puusto harvennettiin harvennuskäyrien puoliväliin. Uudistushakkuuvaihtoehdot simuloitiin noudattaen suositusten 2–3 % tuottovaatimukseen (Äijälä ym. 2014) perustuvia läpimitta- ja uudistamisikärajoja, jos jompikumpi em. raja täyttyi. Avohakkuulla uudistettiin tuoreet ja rehevämät maat, ja luontainen uudistaminen oli mahdollinen kuivahkoilla ja karummilla kasvupaikoilla. Uudistushakkuissa jätettiin PLH-mallissa säästöpuina puulaji- ja kokojakauman mukaan tasaisessa suhteessa vähintään 10 rinnankorkeusläpimitaltaan ($d_{1,3}$) yli 10 cm:n puuta ja TLH-mallissa ensisijaisesti haapaa ja järeää puuta suosien vähintään 10 rinnankorkeusläpimitaltaan yli 20 cm:n puuta vallitsevia sertifiointijärjestelmiä mukaillen (ks. Liite L1. Säästöpuut PEFC- ja FSC-sertifioinneissa, saatavilla osoitteessa <https://doi.org/10.14214/ma.10721>).

PLH-mallissa aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa energiakäyttöön hakattava runkopuu sai koostua männyn (*Pinus sylvestris* L.), kuusen (*Picea abies* (L.) H. Karst.), koivun (*Betula* spp.) ja haavan (*Populus tremula* L.) osalta pienistä, rinnankorkeusläpimittaluokkien 4–9 cm puista ja muilla puulajeilla kaikista rinnankorkeusläpimitaltaan vähintään 4 cm:n puista. TLH-mallissa aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa voitiin kaikkein puulajien osalta energiapuuna korjata vain läpimitaltaan 4–9 cm:n puista. Harvennushakkuiden energiapuun korjattiin sekä puun rangan että oksat ja neulaset/lehdet sisältävää kokopuunemetelmää käyttäen kuivahkojen ja tätä viljavampien kankaiden mänty- tai lehtipuuvaltaisissa puustoissa ja oksat ja neulaset/lehdet metsään jättävää rankamenetelmää soveltaen em. kasvupaikkoja karummilla kangasmailla, turvemailla tai aina kun pääpuulaji oli kuusi. Kasvatusemetsien kokopuunkorjuun aiheuttama ravinnehävikki (esim. Palviainen ja Finér 2012) alentaa Helmisaaren ym. (2011) mukaan puuston kasvua hakkuutähteissä kasvupaikalta poistuvan typen määrästä ja kasvupaikasta riippuen männiköissä 4–8 % ja kuusikoissa 5–15 %. Näitä lukuja käytettiin soveltaen ravinnehävikkiin ja sen ajoittumiseen Jacobsonin ja Kukkolan (1999) tuloksia.

Avohakkuualoilta voitiin korjata joko vain teollisuuden ainespuuta tai ainespuun lisäksi a) hakkuutähdettä (oksat ja latvahakkapuu) tai b) hakkuutähdettä ja kantoja. Luontaisesti uudistettavilta aloilta korjattiin vain ainespuuta. Avohakkuualojen hakkuutähteestä korjattiin 70 %. PLH-mallissa voitiin avohakkuualoilta nostaa 85 % kannoista ja nostettavien kantojen kantoläpimitan oli oltava vähintään 25 cm. TLH-mallissa ei sallittu kantojen nostoa.

VMI12:n mukaista käsittelyluokitusta (ks. Taulukko 1) soveltaen rajoitetun puuntuotannon metsämaalla, jolla puuntuotantoa on rajoitettu esim. ulkoilun, asutuksen tai rannan läheisyyden vuoksi (Korhonen ym. 2021), vain ainespuun korjuu kasvatushakkuilla (harvennus ja ylispuiden poisto) oli mahdollista. Puuntuotannon ulkopuolella olevat alueet sekä kitumaa käsittelyluokasta riippumatta olivat toimenpiteiden ulkopuolella.

Laskelmat tehtiin viidelle kymmenvuotisjaksolle vuosille 2015–2064. Tarkastelujakso rajattiin 50 vuoteen, koska luonnonhoidon erot näkyvät vasta riittävän pitkän ajan kuluessa, mutta koska toisaalta pitkällä simulointikaudella malleihin liittyvien virheiden vaikutukset kertautuvat. MELA-laskelmatuloksia arvioitaessa on lisäksi otettava huomioon, että mallien puutteiden vuoksi erotuskyky esim. muiden lehtipuiden kuin koivujen osalta on vajavainen. Simuloinneissa ei voitu ottaa huomioon mahdollisia eroja luonnonhoidon eri malleissa koskien kuolleen puun korjuuta tai sen eriasteista tuhoutumista hakkuissa. Näitä asioita käsitellään tulosten tarkastelun yhteydessä.

Tehostetun luonnonhoidon mallilla (TLH) pyrittiin arvioimaan osittain jo nykyisiin metsäsertifointijärjestelmiin sisältyviä keinoja talousmetsien monimuotoisuuden lisäämiseksi olettaen, että ne käsittäisivät kattavasti koko puuntuotannon metsämaan (Taulukko 2). Voimaperäisin tehostetun luonnonhoidon toimenpide oli siirtää osa puuntuotannon metsämaasta lisäsuojeluun puuntuotannon ulkopuolelle. TLH-laskelmassa puuntuotannon ulkopuolelle siirrettiin puuntuotannon ja rajoitetun puuntuotannon metsämaasta kaikki vielä ojittamattomat korvet ja rehevät ojitetut korvet, rehevät ojittamattomat rämeet, Etelä-Suomessa kaikki yli 140-vuotiaat ja Pohjois-Suomessa yli 160-vuotiaat kangasmetsät sekä myös em. ikävuosia nuoremmat järeähköt (keskiläpimitta $D_{1,3} > 18$ cm) lehtipuulehdot. Ikärajojen valinnassa huomioitiin toteutuvan lisäsuojelun pinta-ala, sillä vaikka Etelä-Suomessa jo 120-vuotiaita kangasmetsiä voidaan pitää vanhoina (ks. esim. Korhonen ym. 2021), kohdennettiin lisäsuojelu vanhimpiin ja monimuotoisuuden kannalta todennäköisesti arvokkaimpiin jäljellä oleviin kangasmetsiin. Etelä-Suomen 120–140-vuotiaat metsät jätettiin tässä tarkastelussa ulkopuolelle, sillä niiden pinta-ala olisi muutoin kasvanut huomattavan suureksi. Ylipäättään kohteiden valinnassa korostuivat monimuotoisuuden (luontotyytit ja uhanalaiset lajit) kannalta merkittäviksi tunnistetut elinympäristöt (Kouki ym. 2018; Hyvärinen ym. 2019). Kaikki luonnontilaiset ja vanhat metsät tulee suojella tiukasti myös EU:n biodiversiteettistrategian perusteella (Euroopan komissio 2020).

Taulukko 2. Luonnonhoidon mallit: perusluonnonhoito (PLH) ja tehostettu luonnonhoito (TLH) sekä niihin kohdistuvat toimenpiteet ($d_{1,3}$ = rinnankorkeusläpimitta).

Toimenpide	Perusluonnonhoito (PLH)	Tehostettu luonnonhoito (TLH)
Harvennushakkuu	Pääpuulajia suosien	Pääpuulajia suosien, mutta jätetään sekapuuta 10 %
Kannonnosto	Suosituksen mukaisesti ¹⁾	Ei kannonnostoa
Muun lehtipuun ²⁾ hakkuu energiapuuksi	Kaikki $d_{1,3} > 4$ cm	Vain $d_{1,3}$ 4–9 cm
Säästöpuut	10 kpl $d_{1,3} > 10$ cm puita runkoluokasarjan mukaan tasaisesti	10 kpl $d_{1,3} > 20$ cm puita erityisesti järeää haapaa suosien
Puuntuotannon ulkopuolelle jätetty puuntuotannon metsämaa	Ei	Ojittamattomat lehdot ja myös ojitetut lehtokorvet ja rehevimmät rämeet Etelä-Suomi > 140 ja Pohjois-Suomi > 160 -vuotiaat kangasmetsät Järeät $D_{1,3} > 18$ cm lehtipuulehdot

¹⁾ Äijälä ym. 2014, Koistinen ym. 2016²⁾ koostuu muista lehtipuista kuin raudus- ja hieskoivusta tai haavasta

Valitut alueet siirtyivät toimenpiteiden ulkopuolelle heti laskennan alussa, eikä toteutusta jaksotettu pidemmälle ajalle, kuten esimerkiksi suojeluohjelmissa tai vapaaehtoisessa METSO-ohjelmassa käytännössä tapahtuu. Tällä haluttiin tarkastella sertifiointin tyyppistä välitöntä vaikutusta, ja vaikka esim. FSC-sertifiointi ei edellytä pysyvää suojelustatusta, niin tässä tutkimuksessa siirron oletettiin olevan koko laskelmakauden pysyvää. Jäljempänä tästä puuntuotannon ulkopuolelle siirtyneestä metsämaasta käytetään yksinkertaisuuden vuoksi ilmausta ”lisäsuojelu”. Kohteiden valinnassa ei otettu huomioon metsänomistusta, eikä VMI:n koeala-aineistoon perustuva tarkastelu mahdollista tilakohtaista tarkastelua.

2.4 Hakkuutasot

Tutkimuksessa tarkastellaan edellisessä luvussa kuvattujen perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisten metsien käsittelyn vaikutuksia monimuotoisuuden kannalta keskeisten metsien rakennepiirteiden kehitykseen kahdella hakkuukertymän tasolla. Hakkuutasoina käytettiin 70 miljoonan kuutiometrin vuotuista runkopuukertymää (Taso70) ja suurimman puuntuotannollisesti ylläpidettävän hakkuukertymän mukaista tasoa (TasoSY).

Taso70:n hakkuumäärät vastaavat vuosina 2015–2017 Suomessa keskimäärin vuosittain toteutunutta kertymää puu- ja puuvaralajeittain (Liite L2). Tukkia ko. kertymästä oli noin 26 milj. m³, kuitupuuta 35 ja energiारunkopuuta (sis. kotitalouksien polttopuun) 9 milj. m³. Lisäksi korjattiin hakkuutähdettä ja kantoja, jotka eivät sisälly tilastoituihin hakkuukertymään, noin 3 milj. m³. Laskelma tehtiin maakunnittain ja alueelliset kertymät saivat yksittäisinä kymmenvuotiskausina poiketa $\pm 0,5$ % vuosien 2015–2017 toteutuneesta tasosta.

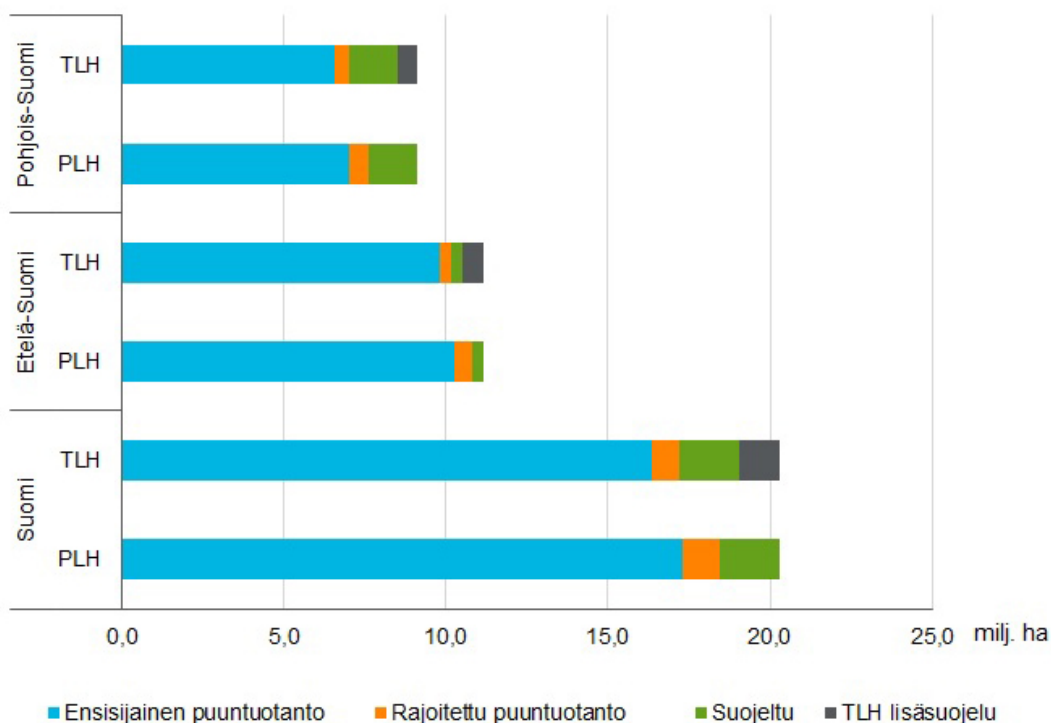
TasoSY:ssa maakunnittain lasketut hakkuukertymät määräytyivät vasta laskennan tuloksena. Laskelma noudatti Luonnonvarakeskuksen (2021b) hakkuumahdollisuusarvioissa sovellettua suurimman puuntuotannollisesti ylläpidettävän hakkuukertymän määrittelyä, jossa kausittaisten nettotulojen sekä aines- ja energiapuun kokonaiskertymän on säilyttävä laskennan edetessä vähintään edellisen kymmenvuotiskauden tasolla, tukkipuukertymän on pysyttävä vähintään ensimmäisen 10-vuotiskauden tasolla ja puuston tuottoarvo neljän prosentin korkokannalla laskettuna on laskelma-ajan lopussa vähintään alkuhetken tasolla. Laskelmassa ei rajoiteta kasvun ja poistuman suhdetta, metsien ikäluokkarakennetta tai uudistushakkuiden määrää, eikä puulajeita kestävyyttä edellytetä. Energiapuukertymä saa vapaasti koostua rangasta, hakkuutähteestä ja kannoista. TasoSY on lähtökohdiltaan puhtaasti puuvaroista lähtevä hakkuulaskelma, joka ei ota huomioon puumarkkinoita (raakapuun kysyntää ja tarjontaa) muuten kuin annettujen, mutta määrän suhteen kiinteiden, hintojen kautta.

3 Tulokset

3.1 Puuntuotannon ulkopuolelle (lisäsuojeluun) siirtyvä metsämaa

Lähtötilanteessa vuonna 2015 metsämaan ala oli 20,3 milj. ha, josta puuntuotannossa oli 18,4 ja puuntuotannon ulkopuolella (suoja-alueina) 1,8 milj. ha (ks. Taulukko 1). Puuntuotannon metsämaasta 1,15 milj. ha oli rajoitetussa puuntuotannossa. Suoja-alueiden pinta-ala pysyi muuttumattomana tavanomaista luonnonhoitoa vastaavassa perusluonnonhoidon (PLH) mallissa. Tehostetun luonnonhoidon mallissa (TLH) puuntuotannon metsämaasta 6,5 % eli noin 1,2 milj. ha (Kuva 2) siirtyi puuntuotannon ulkopuolelle taulukon 2 mukaisin kriteerein. Suojeluun siirtyi ensisijaisen puuntuotannon metsämaasta noin 5 % (0,9 milj. ha) ja jo rajoitetussa puuntuotannossa olevasta metsämaasta noin 29 % (0,3 milj. ha). Etelä-Suomessa tehostetun luonnonhoidon yhteydessä puuntuotannon ulkopuolelle jätetystä metsämaasta 72 % oli rajoittamattoman ja 28 % rajoitetun puuntuotannon metsämaata ja Pohjois-Suomessa vastaavat luvut olivat 75 % ja 25 %.

TLH-mallissa puuntuotannon ulkopuolelle olevan metsämaan pinta-ala kasvoi 1,7-kertaiseksi vuoden 2015 lähtötilanteen nähden (Taulukko 3): Etelä-Suomessa 2,7-kertaiseksi (lisäys 649 300 ha) ja Pohjois-Suomessa 1,4-kertaiseksi (lisäys 596 000 ha). Lisäys ei koskenut kitumaata, joka oli laskelmissa käsittelyluokasta riippumatta jo toimenpiteiden ulkopuolella, joten sen määrässä (1,1 milj. ha) ei tapahtunut muutosta.



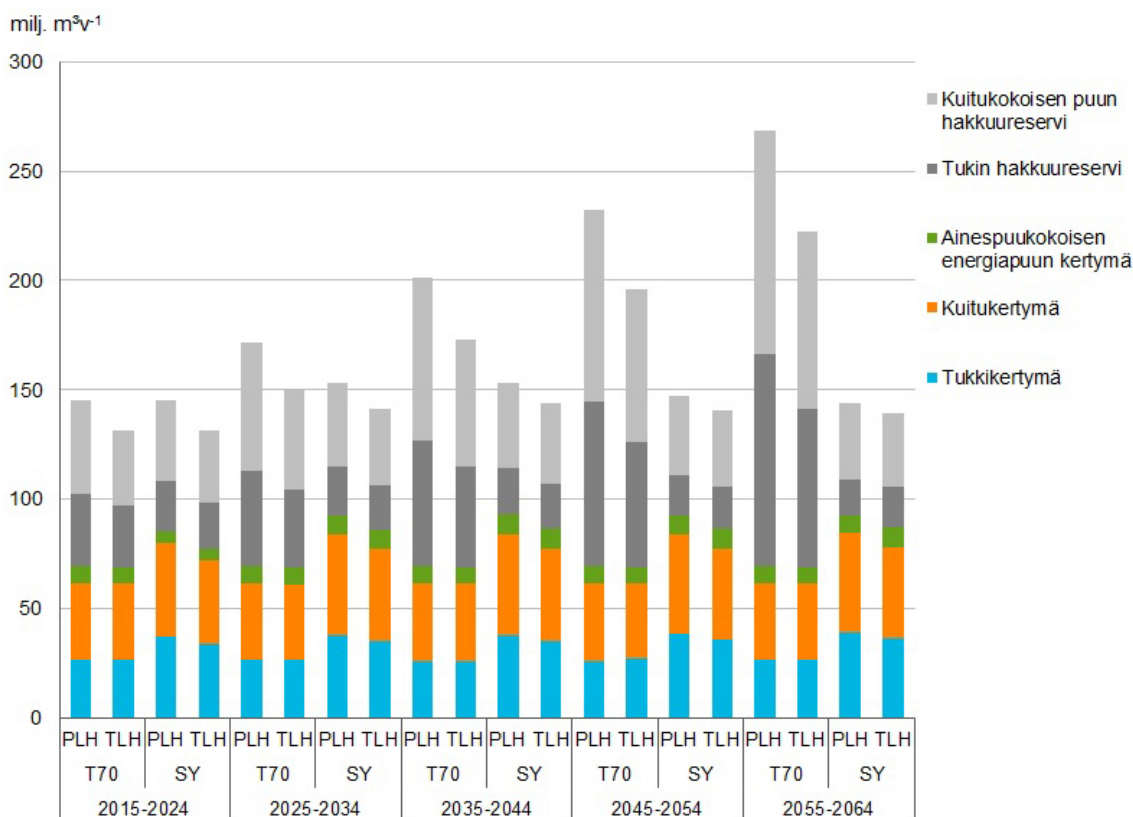
Kuva 2. Metsämaan pinta-alan jakautuminen ensisijaiseen ja rajoitettuun puuntuotantoon sekä suojeluun perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) malleissa, milj. ha.

Taulukko 3. Tehostetun luonnonhoidon mallissa (TLH) toimenpiteiden ulkopuolelle puuntuotannon maalla siirtyneet elinympäristöt, 1000 ha (E-S = Etelä-Suomi, P-S = Pohjois-Suomi).

Elinympäristöt, 1000 ha	Etelä-Suomi	Pohjois-Suomi
Kaikki ojittamattomat korvet ja ojitetut lehtokorvet	383,8	320,2
Rehevät ojittamattomat rämeet	42,0	43,7
Järeähköt ($d_{1,3} > 18$ cm) lehtipuuvaltaiset lehdot	96,9	7,0
Vanhat kangasmetsät (E-S > 140 v, P-S > 160 v)	126,6	225,6
Yhteensä	649,3	596,5

3.2 Hakkuukertymä ja hakkuumahdollisuuksien kehitys

Taso70:n hakkuutavoitteet, jotka perustuivat maakunnittain vuosina 2015–2017 keskimäärin toteutuneisiin aines- ja energiapuukertymien tasoon (Liite L2), saavutettiin sekä PLH- että TLH-malleja noudattavilla metsien käsittelyillä kaikkina viitenä kymmenvuotiskautena (Kuva 3). Erot sekä luonnonhoitomallien välillä että liitteen L2 mukaisiin lukuihin selittyvät kertymätavoitteille sallituilla $\pm 0,5$ %:n poikkeamilla. Kantojen korjuu ei ollut mahdollista TLH-mallin mukaisessa metsien käsittelyssä, mikä puolestaan selittää pienet erot luonnonhoitomallien energiapuun kertymäjakeissa (ks. Taulukko 4).



Kuva 3. Ainespuukokoisen hakkuukertymän ja sen hakkuureservin kehitys 70 milj. m^3 :n vuotuisten hakkuuiden Taso70 (T70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY (SY) -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, milj. m^3 v^{-1} .

Taulukko 4. Keskimääräinen energiapuukertymä vuodessa jakeittain Taso70- ja TasoSY-laskelmien perusluonnonhoidossa (PLH) ja tehostetussa luonnonhoidossa (TLH) vuosina 2015–2064, milj. m³ v⁻¹.

	milj. m ³ v ⁻¹					Keskimäärin
	2015–2024	2025–2034	2035–2044	2045–2054	2055–2064	
Taso70 PLH	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
- Ainespuukok. runkopuu	7,9	8,0	8,1	8,2	7,9	8,0
- Hakkuutähde [*]	4,2	4,1	3,9	3,9	3,9	4,0
- Kannot	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4
Taso70 TLH	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
- Ainespuukok. runkopuu	7,6	7,8	7,9	7,8	7,8	7,8
- Hakkuutähde [*]	4,8	4,6	4,5	4,6	4,6	4,6
- Kannot	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TasoSY PLH	22,6	26,4	26,8	27,5	30,9	26,8
- Ainespuukok. runkopuu	5,1	8,9	9,2	8,4	8,5	8,0
- Hakkuutähde [*]	9,4	10,3	10,3	10,9	12,1	10,6
- Kannot	8,1	7,2	7,3	8,3	10,4	8,2
TasoSY TLH	13,7	18,3	18,4	18,8	19,9	17,8
- Ainespuukok. runkopuu	4,9	8,6	8,8	8,7	9,3	8,1
- Hakkuutähde [*]	8,8	9,7	9,6	10,0	10,7	9,8
- Kannot	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

^{*}) Hakkuutähde sisältää tässä oksat, uudistushakkuiden hukkapuun ja ainespuukokoista puuta pienemmän energiaksi korjatun kasvatushakkuiden runkopuun

TasoSY-laskelmassa vuosittainen runkopuun hakkuukertymä oli kaudella 2015–2024 PLH-mallin mukaisesti metsiä käsiteltäessä 86 milj. m³ vuodessa ja TLH-mallissa 78 milj. m³ vuodessa. Seuraavilla 10-vuotiskausilla runkopuun kertymä nousi PLH-mallissa 93–94 milj. m³:iin ja TLH-mallissa 87 milj. m³:iin vuodessa (Kuva 3). TLH-mallin tukki- ja kuitukertymät olivat keskimäärin 10 % PLH-mallin tuottamia pienemmät koko 50 vuoden tarkastelujaksolla; vähenys oli suhteellisesti suurin lehtipuilla (13 %) ja pienin männyllä (5 %). TasoSY:n hakkuukertymä puutavaralajeittain keskimäärin vuodessa PLH- ja TLH-luonnonhoidossa vuosina 2015–2064 on esitetty liitteessä L3.

Metsänhoitosuosituksen sallima suurin mahdollinen ainespuukokoisen puun hakkuumäärä, ns. hakkuumahto, oli ensimmäisellä kymmenvuotiskaudella 2015–2024 Taso70- ja TasoSY-laskelman PLH-mallissa 145,3 ja TLH-mallissa 131,3 milj. m³ vuodessa. Taso70:n mukaiset hakkuumäärät lisäsivät tarkastelujakson aikana selvästi hakattavissa olevaa puuvarantoa kummallakin metsänhoidon mallilla hakkuureservin (hakkuumahdon ja hakkuukertymän erotuksen) yli kaksinkertaisuudessa. Metsävarojen kehityksen ja puuntuotannon kestävyuden salliessa TasoSY-laskelma pyrki hakkuumahdollisuuksien tehokkaaseen käyttöön, jolloin hakkuureservi ei Taso70-laskelman tavoin kasvanut vaan säilyi molemmilla luonnonhoidon malleilla lähes samantasoisena koko laskelma-kauden ajan (Kuva 3).

Metsien nykyisen ikärakenteen ja nettotuottojen nykyarvoa maksimoivan tavoitefunktion seurauksena uudistushakkuiden osuus oli sekä pinta-alasta että kertymästä kaikissa laskelmavaihtoehdoissa suurimmillaan ensimmäisellä kaudella (Taulukko 5). Taso70:een perustuvissa laskelmissa tavoitekertymä olisi voitu saavuttaa myös toisenlaisella hakkuiden rakenteella, koska hakkuukertymä oli tuotantomahdollisuuksien rajan (TasoSY) alapuolella. Metsien ikärakenteen

Taulukko 5. Vuosittainen uudistushakkuupinta-ala keskimäärin vuosina 2015–2064 70 milj. m³:n vuotuisien hakkuuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsitteilyillä, 1000 ha v⁻¹. Suluissa uudistushakkuuiden osuus (%) vuosittaisesta 1) kokonaihakkuuvalasta 2) ainespuukokoisen puun hakkuukertymästä.

Etelä-Suomi	1000 ha v ⁻¹ (% / %)										Keskim.			
	2015–2024	2025–2034	2035–2044	2045–2054	2055–2064	2015–2024	2025–2034	2035–2044	2045–2054	2055–2064				
Taso70	PLH	146 (37,8/67,9)	119 (27,4/56,9)	100 (24,2/49,8)	87 (22,1/46,5)	66 (17,7/38,1)	104 (25,9/51,8)	TLH	151 (40,2/70,2)	123 (29,0/58,5)	110 (27,5/54,3)	95 (25,0/50,6)	70 (18,9/40,6)	110 (28,1/54,8)
TasoSY	PLH	184 (47,1/79,3)	170 (35,7/67,8)	162 (37,6/66,8)	153 (38,6/68,2)	118 (29,9/61,3)	157 (37,7/68,5)	TLH	170 (47,6/79,2)	156 (34,7/65,3)	147 (36,1/63,9)	142 (37,5/64,8)	105 (26,9/54,4)	144 (36,3/65,3)
Pohjois-Suomi		2015–2024	2025–2034	2035–2044	2045–2054	2055–2064	Keskim.							
Taso70	PLH	52 (33,7/60,4)	31 (16,8/40,1)	23 (13,6/31,6)	15 (9,2/23,4)	9 (6,0/15,8)	26 (15,7/34,2)	TLH	54 (34,4/60,7)	36 (19,3/42,6)	27 (15,8/34,4)	20 (11,9/27,3)	13 (8,0/18,0)	30 (17,8/36,6)
TasoSY	PLH	95 (45,5/72,5)	91 (34,1/61,6)	91 (38,8/65,7)	85 (37,6/66,4)	63 (27,6/56,9)	85 (36,5/64,5)	TLH	80 (44,1/71,6)	84 (34,0/61,4)	84 (38,1/64,0)	78 (35,9/64,2)	58 (26,2/54,7)	77 (35,3/62,9)

muutoksen, puuston järeytymisen (m^3/runko) ja runkojen kokonaistilavuuden ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) kasvun seurauksena kasvatushakkuiden merkitys kasvaa tarkastelujajan kuluessa. Hakkuurakenteen selvä muutos etenkin Taso70-ratkaisuissa vaikuttaa puuntuotannon metsämaan metsien rakennepiirteiden kehitykseen (ks. Liite L4.1-4.5).

TasoSY:n koko 50 vuoden keskimääräinen vuosittainen energiapuukertymä oli 1,5–2-kertainen vuosina 2015–2017 toteutuneeseen nähden. Energiaksi ohjautuneen runkopuun määrä oli kuitenkin pienempi, joten lisäys johtuu hakkuutähteen ja kantojen korjuumäärien kasvusta (Taulukko 4). TasoSY:n PLH-mallissa kantoja nostettiin 50 vuoden aikana keskimäärin $8,2 \text{ milj. m}^3$ vuodessa, kun vuosina 2015–2017 tilastojen mukaan kantoja käytettiin keskimäärin noin $0,7 \text{ milj. m}^3$ vuodessa ja vuosina 2018–2020 vain noin $0,3 \text{ milj. m}^3 \text{ v}^{-1}$. Suurimmillaan, n. $1 \text{ milj. m}^3 \text{ v}^{-1}$, kantojen käyttö oli 2010-luvun taitteessa (Luonnonvarakeskus 2021d). TLH-mallissa kantoja ei korjattu. TasoSY:n PLH-mallissa ainespuun suuremmat hakkuut mahdollistivat TLH-malliin verrattuna 6–13 % suuremman hakkuutähteen korjuun kaudesta ja uudistushakkuiden ajoittumisesta riippuen. Nykyisen ainespuukäytön kannalta taloudellisesti vähäarvoisempien lehtipuiden korjuu energiapuuksi lisäsi PLH-mallissa lehtipuurunkojen energiakäyttöä 12,5 % TLH-malliin nähden.

3.3 Kokonais- ja lehtipuutilavuuden kehitys

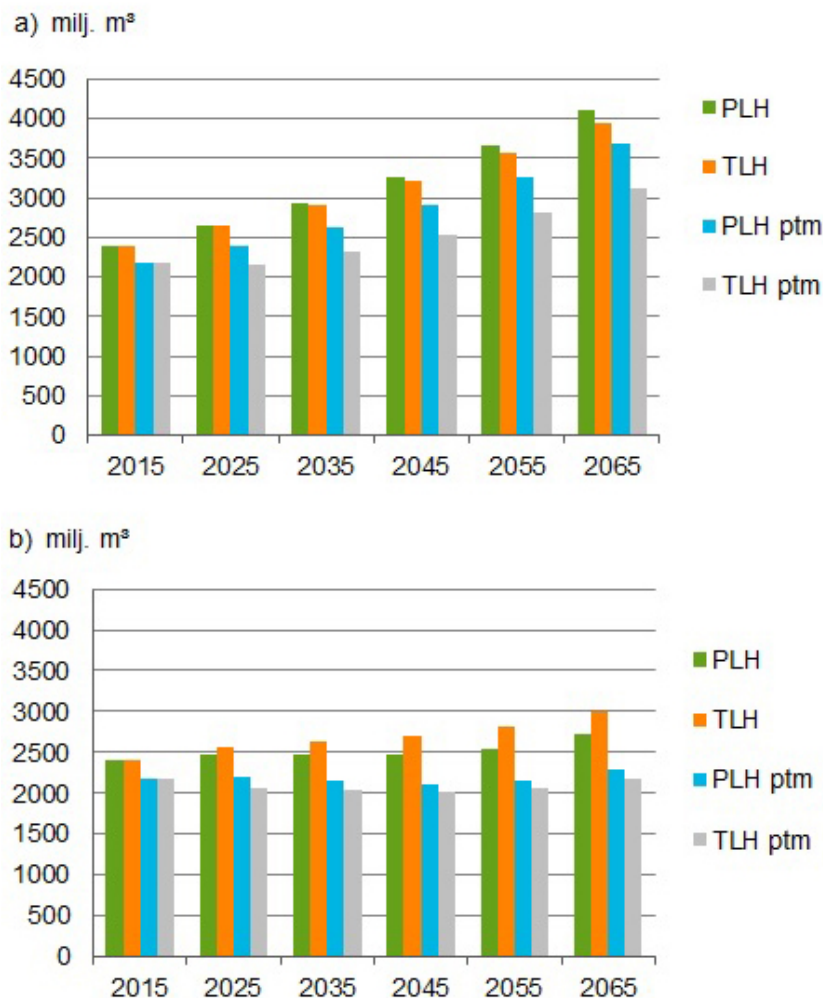
3.3.1 Kokonaistilavuus

Runkopuun kokonaistilavuus oli metsämaalla laskelmien alussa 2395 milj. m^3 (Etelä-Suomi 1603 milj. m^3 ja Pohjois-Suomi 792 milj. m^3) ja puuntuotannon metsämaalla 2176 milj. m^3 (Etelä-Suomi 1527 milj. m^3 ja Pohjois-Suomi 649 milj. m^3). Taso70:n mukaisilla hakkuumäärillä ja niitä selvästi suuremman kasvun seurauksena runkotilavuus kasvoi PLH-mallin metsien käsittelyllä vuoteen 2065 mennessä 4101 milj. m^3 :iin (lisäystä 1706 milj. m^3) ja puuntuotannon metsämaalla 3682 milj. m^3 :iin (lisäystä 1506 milj. m^3). Vastaavasti TLH-mallissa tilavuus kasvoi 3951 milj. m^3 :iin (lisäystä 1556 milj. m^3) ja puuntuotannon metsämaalla 3129 milj. m^3 :iin (lisäystä 953 milj. m^3) (Kuva 4a). Puuston tilavuuden maltillisempi kasvu TLH-mallissa johtui pääosin puuntuotannon metsämaan puuston pienemmästä kasvusta vakioidun hakkuupaineen kohdistuessa lisäsuojelun johdosta vähentyneeseen puustoon. Osittain ilmiötä selittää myös lisäsuojellun puuston ikääntymisestä aiheutuva kasvun aleneminen tarkastelujakson loppupuolella.

Vuosina 2015–2017 maakunnittain toteutuneita hakkuukertymiä noudattavilla Taso70:n hakkuumäärillä Pohjois-Suomen osuus puuntuotannon metsämaan kokonaistilavuudesta kasvoi 50 vuoden tarkastelujaksolla alun 30 %:sta noin 10 prosenttiyksikköä molemmilla luonnonhoidon malleilla (Taulukko 6). Pohjois-Suomen osuus puuntuotannon metsämaan kokonaistilavuuden lisäyksestä oli PLH-mallilla 51 % ja TLH-mallilla 60 %.

TasoSY:n PLH-mallissa puuston runkotilavuus nousi metsämaalla 2714 milj. m^3 :iin (lisäystä 319 milj. m^3) ja puuntuotannon metsämaalla 2295 milj. m^3 :iin (lisäystä 119 milj. m^3). TasoSY:n TLH-mallin mukaisessa ratkaisussa puuston kokonaistilavuus metsämaalla oli 2999 milj. m^3 vuonna 2065 (lisäystä 604 milj. m^3). Hakkuiden ja lisäsuojeluun siirtymisen aiheuttaman vähennyksen seurauksena TLH-mallissa lopputilavuus oli puuntuotannon metsämaalla alkutilavuuteen nähden 3 milj. m^3 matalampi ollen 2173 milj. m^3 . (Kuva 4b).

Puuston tilavuus lisääntyi Pohjois-Suomessa molemmilla TasoSY:n ratkaisuilla myös puuntuotannon metsämaalla, mutta väheni Etelä-Suomessa sekä PLH- että TLH-mallien mukaisilla metsien käsittelyillä (Taulukko 6). TasoSY-laskelmien puuntuotannon metsämaan tilavuuden kehitykseen vaikuttivat alueelliset erot puuston hakkuukypsyudessa, eivät puumarkkinat.



Kuva 4. Kokonaistilavuuden kehitys perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä koko metsämaalla (PLH, TLH) ja puuntuotannon metsämaalla (PLH ptm, TLH ptm) a) 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuuiden tasolla (Taso70) ja b) suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY), milj. m³.

Taulukko 6. Runkopuun kokonaistilavuuden kehitys puuntuotannon metsämaalla vuosina 2015–2065 Etelä- ja Pohjois-Suomessa 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, milj. m³.

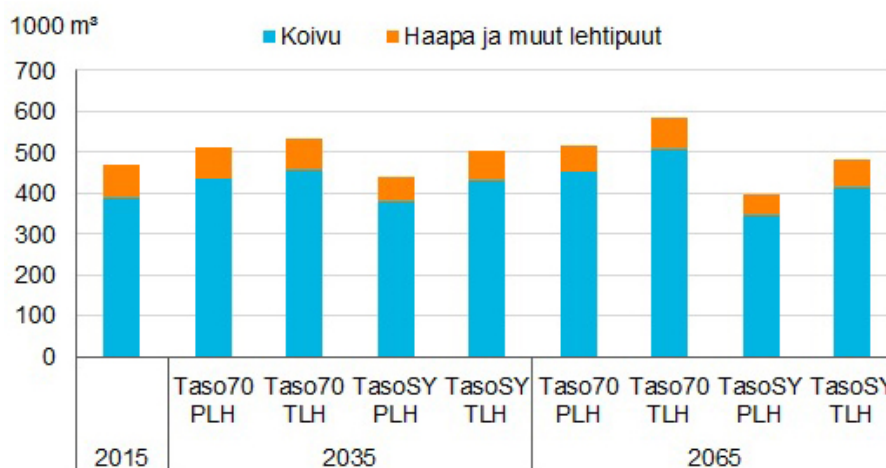
	2015	milj. m ³									
		2025		2035		2045		2055		2065	
		PLH	TLH	PLH	TLH	PLH	TLH	PLH	TLH	PLH	TLH
Taso70											
Etelä-Suomi	1527,2	1607,1	1462,9	1707,4	1524,1	1841,3	1607,9	2035,1	1740,3	2271,5	1911,8
Pohjois-Suomi	648,8	771,7	684,3	911,6	801,3	1063,4	928,6	1232,1	1068,9	1410,8	1216,3
Suomi	2176,0	2378,9	2147,2	2619,0	2325,4	2904,8	2536,5	3267,2	2809,2	3682,3	3128,0
TasoSY											
Etelä-Suomi	1527,2	1519,5	1428,5	1465,2	1395,6	1416,3	1363,0	1436,3	1383,2	1516,3	1452,3
Pohjois-Suomi	648,8	684,5	632,7	693,5	646,2	701,7	658,0	727,7	679,9	778,5	719,8
Suomi	2176,0	2204,0	2061,2	2158,7	2041,8	2118,0	2021,0	2164,1	2063,1	2294,8	2172,1

3.3.2 Lehtipuuston tilavuus

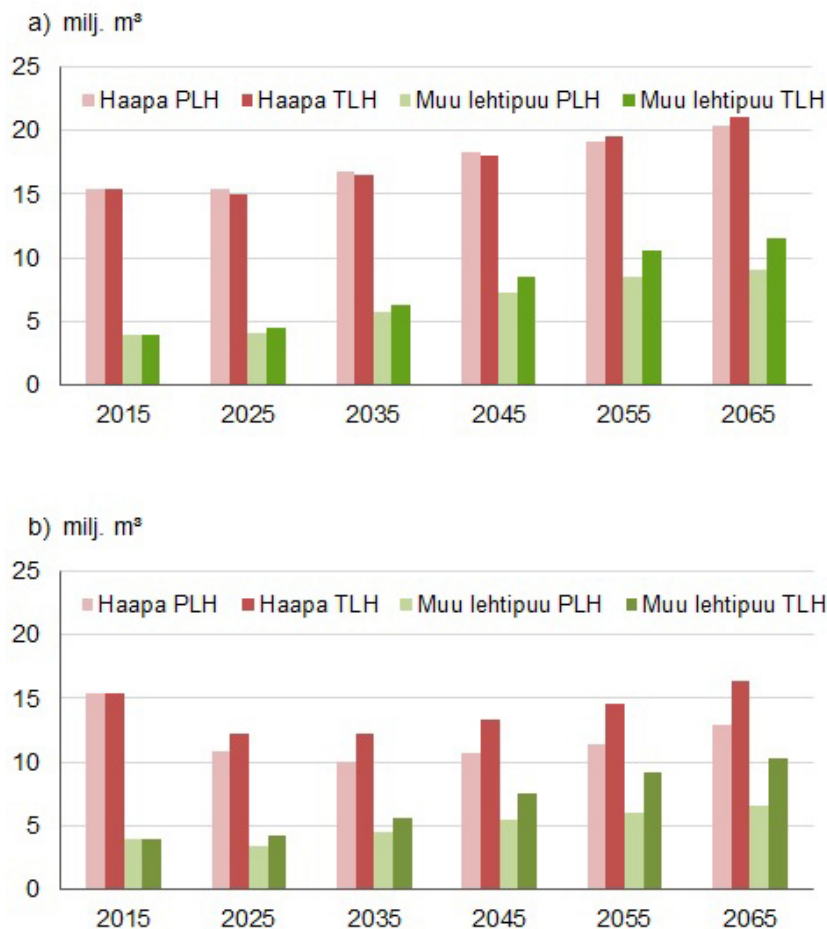
Lehtipuuston runkotilavuus oli laskennan alussa metsämaalla 469 milj. m³ (Kuva 5). Taso70:n hakkuumäärillä lehtipuuston tilavuus lisääntyi vuoteen 2065 mennessä PLH-mallilla 515 milj. m³:iin ja TLH-mallilla 583 milj. m³:iin. TasoSY:n laskelmissa, joissa ei ollut toteutuneen kysynnän asettamia rajoitteita eikä puulajeittain tilavuuden tai kertymän kestävyysrajoitteita, lehtipuuston tilavuus laski 398 milj. m³:iin PLH-mallissa ja nousi 483 milj. m³:iin TLH-mallin metsien käsittelyssä. TasoSY:n PLH-laskelmaa lukuun ottamatta koivun tilavuus kasvoi eri laskelmavaihtoehdoissa, mutta haavan ja muun lehtipuun (sisältää käsitteenä kaikki muut lehtipuut paitsi raudus- ja hieskoivun sekä haavan) runkotilavuus väheni laskelmasta riippuen 3–28 milj. m³.

Lehtipuuston tilavuuden kehitystä selittivät pääosin laskentaoletusten mukaisesti talouden tuotto-odotukset, sovelletut rajoitteet ja metsänhoidon käytänteet. Lehtipuun kasvatuksen kannattavuus on nykyisillä puun hinnoilla ja mallien mukaisilla kasvuoletuksilla havupuita heikompaa, ja MELA-ohjelmiston tuottamissa ratkaisuisa lehtipuulle uudistaminen (koivu) valikoitui toimenpiteenä vain aivan viljavimmille maille lehtoihin tai lehtomaisiin kankaisiin. Lisäksi käytetyissä harvennushakkuiden poisto-ohjeissa vallitsevaa puulajia pyrittiin jättämään, jolloin hakkuut kohdistuivat voimakkaana lehtipuustoon, joka kasvaa pääosin sekapuuna (Suomen metsien pinta-alasta lehtipuuvaltaisia on 10 %, kun lehtipuuston osuus tilavuudesta on lähes 20 % - Korhonen ym. 2021).

Monimuotoisuuden kannalta lehtipuuston kokonaistilavuuden kehitystä oleellisempaa on vanhan ja järeän lehtipuuston kehitys (Hyvärinen ym. 2019). Alkuvaiheen notkahduksen jälkeen Taso70:n mukaisilla hakkuilla järeän haavan ja muun (ei raudus- eikä hieskoivu tai haapa) järeän lehtipuun tilavuudet kasvoivat koko metsämaalla PLH- ja TLH-käsittelyillä (Kuva 6a). TasoSY:n hakkuilla järeän haavan tilavuus metsämaalla laski aluksi huomattavasti (Kuva 6b), sillä järeää haapaa ohjautui sovelletun hinnoittelun seurauksena (haapatukin hinta määriteltiin koivukuitupuuna) energiapuuksi kuten käytännössäkin tapahtuu, mutta TasoSY:n ratkaisuisa määrää ei kysynnän suhteen rajoitettu. Järeän haavan tilavuus ylitti TasoSY:n TLH-käsittelyssä nykytason vasta laskenta-ajan loppupuolella, ja PLH-käsittelyllä se pysyi edelleen nykyisen tilavuuden alapuolella. Muun järeän lehtipuuston kuin koivun ja haavan tilavuus kasvoi myös TasoSY:n hakkuilla. Lisäsuojelun merkitys järeän ($d_{1,3} > 30$ cm) lehtipuuston osalta on huomattava sekä Taso70:n että TasoSY:n mukaisilla hakkuilla (Taulukko 7).



Kuva 5. Lehtipuuston tilavuuden kehitys metsämaalla runkopuun 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden tasolla (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) vuoteen 2065 perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, 1000 m³.



Kuva 6. Järeän (rinnankorkeusläpimitta $d_{1,3} > 30$ cm) haavan ja muun (ei koivut tai haapa) järeän lehtipuun tilavuuden kehitys metsämaalla a) 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden tasolla (Taso70) ja b) suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) vuoteen 2065 PLH- ja TLH-käsittelyillä, milj. m³.

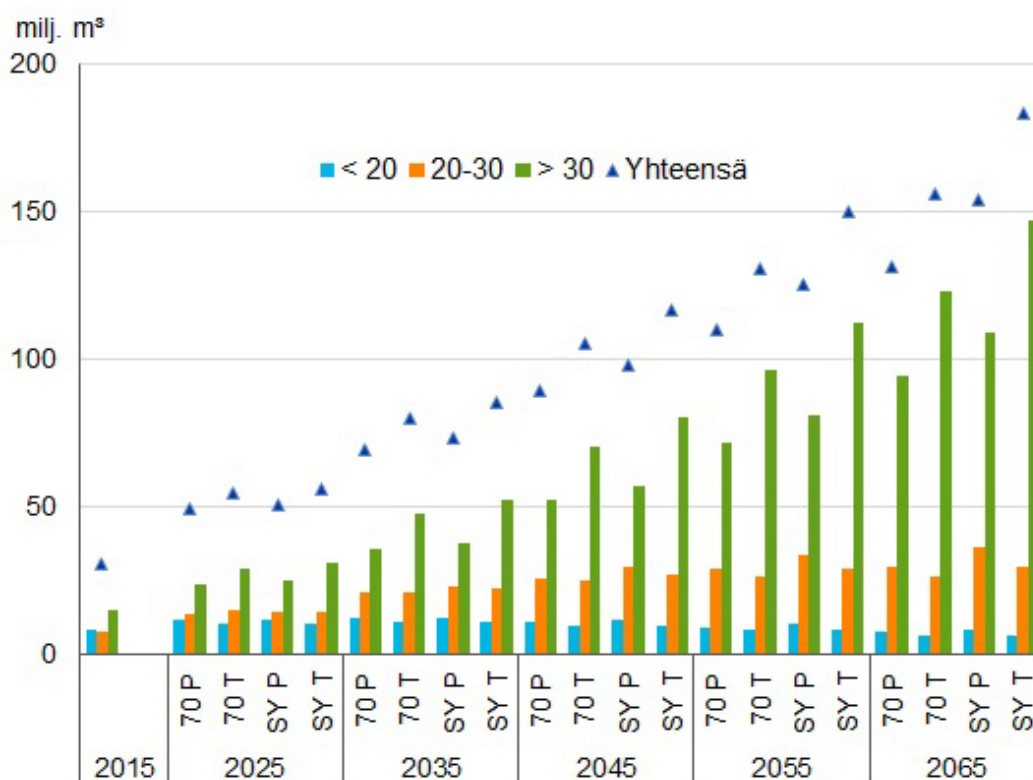
Taulukko 7. Suojellun metsämaan järeän (rinnankorkeusläpimitta $d_{1,3} > 30$ cm) lehtipuuston osuus puulajeittain koko metsämaan ko. puulajin rinnankorkeusläpimitalta yli 30 cm puiden tilavuudesta 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, %.

		2015	2025	2035	2045	2055	2065
		%					
Taso70							
Koivu	PLH	9,8	10,8	10,2	9,4	9,2	8,5
	TLH	9,8	32,1	33,7	32,4	32,8	30,6
Haapa	PLH	12,4	15,6	17,3	19	20,7	21,8
	TLH	12,4	30,6	34,4	37,6	40,0	41,7
Muu lehtipuu	PLH	16,6	16,6	13,9	13,1	12,7	12,6
	TLH	16,6	55,9	50,5	44,9	42,4	39,2
TasoSY							
Koivu	PLH	9,8	14,3	15,6	17,3	21,7	18,2
	TLH	9,8	37,6	41,5	44,5	53	49,7
Haapa	PLH	12,4	22,2	29,2	32,7	34,7	34,3
	TLH	12,4	37,7	46,4	50,8	53,0	53,3
Muu lehtipuu	PLH	16,6	20,2	17,9	17,4	18,0	17,4
	TLH	16,6	59,5	56,0	50,3	48,5	43,5

3.4 Säästöpuuston tilavuus

Säästöpuut ovat uudistushakkuissa jätettävää monimuotoisuuspuustoa, joten niiden tilavuuden kehitys on suorassa kytköksessä uudistushakkuiden määrään: mitä enemmän metsiä hakataan, sitä enemmän säästöpuuta jätetään (ks. myös Korhonen ym. 2016). Säästöpuiden tilavuus oli tarkastelujakson alussa 30,9 milj. m³ kasvaen Taso70:n PLH-mallin mukaisella metsänkäsittelyllä yli nelinkertaiseksi 131,4 milj. m³:iin ja TLH-mallin mukaisella metsien käsittelyllä yli viisinkertaiseksi 156,0 milj. m³:iin vuoteen 2065 mennessä (Kuva 7). TasoSY:n hakkuilla säästöpuuston kokonaistilavuus viisinkertaistui vuoden 2015 tasosta 154,2 milj. m³:iin PLH-mallissa ja kuusinkertaistui TLH-mallissa 183,1 milj. m³:iin.

Järeiden, yli 30 cm rinnankorkeusläpimitaltaan olevien säästöpuuhaapojen tilavuus lisääntyi Taso70:n hakkuilla perusluonnonhoidon (PLH) mallissa tarkastelujaksolla 3,8 milj. m³:sta 6 milj. m³:iin (Taulukko 8). Tehostetun luonnonhoidon (TLH) mallissa järeän haavan säästöpuutilavuus kasvoi 4,3 milj. m³ ollen 5,8 milj. m³ vuonna 2065. Muun lehtipuun (muut lehtipuut kuin koivut ja haapa) järeän, d_{1,3}-läpimitalta yli 30 cm:n säästöpuutilavuus lähes kymmenkertaistui PLH-mallissa vuoden 2015 tasosta (0,3 milj. m³) vuoteen 2065 mennessä (2,4 milj. m³) ja lähes 15-kertaistui TLH-mallissa (3,7 milj. m³). Järeän säästöpuuhaavan määrä lisääntyi 0,28 milj. m³ enemmän TLH-mallissa PLH-malliin verrattuna ja muun järeän säästölehtipuun määrä vastaavasti 1,15 milj. m³ enemmän.



Kuva 7. Säästöpuutilavuuden kehitys läpimittaluokittain vuosina 2015–2065 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden tasolla (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, milj. m³. Lyhenteiden selitykset: 70 P = Taso70 PLH, 70 T = Taso70 TLH, SY P = TasoSY PLH, SY T = TasoSY TLH.

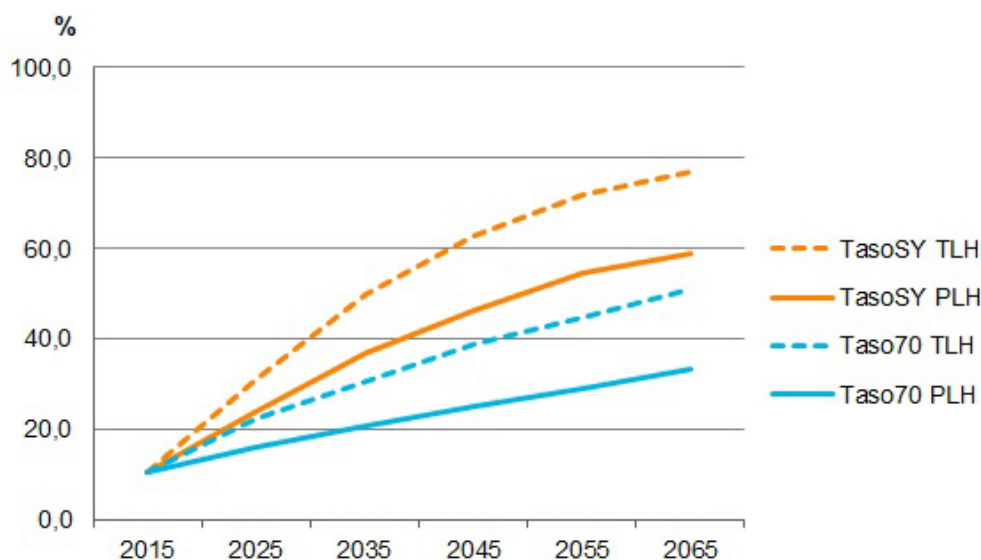
Taulukko 8. Järeän (rinnankorkeusläpimitta $d_{1,3} > 30$ cm) haavan ja järeän muun (ei koivut tai haapa) lehtipuun säästöpuutilavuuden kehitys tarkastelujaksolla eri laskelmavaihtoehdoissa 70 milj. m^3 :n vuotuisten hakkuuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, milj. m^3 .

	2015	2025	2035	2045	2055	2065
	milj. m^3					
Haapa $d_{1,3} > 30$ cm						
Taso70 PLH	1,49	2,16	3,00	3,79	4,48	5,32
Taso70 TLH	1,49	2,24	3,17	4,11	4,91	5,78
TasoSY PLH	1,49	2,19	3,05	3,89	4,61	5,51
TasoSY TLH	1,49	2,34	3,34	4,29	5,11	6,03
Muu lehtipuu*) $d_{1,3} > 30$cm						
Taso70 PLH	0,29	0,48	0,89	1,50	2,10	2,63
Taso70 TLH	0,29	0,53	1,12	2,08	3,07	3,99
TasoSY PLH	0,29	0,48	0,91	1,54	2,14	2,72
TasoSY TLH	0,29	0,56	1,18	2,20	3,30	4,37

*) koostuu muista lehtipuista kuin raudus- ja hieskoivusta tai haavasta

TasoSY:n hakkuilla järeiden yli 30 cm $d_{1,3}$ -läpimitaltaan olevien säästöpuuhaapojen tilavuuden kehitys noudatti Taso70:n mukaista kehitystä: tilavuus lähes kolminkertaistui vuodesta 2015 (1,5 milj. m^3) kummassakin käsittelyskenaariossa (PLH 6,2 milj. m^3 ja TLH 6,5 milj. m^3). Muun järeän lehtipuun kuin haavan ja koivun tilavuus kuusinkertaistui lähtötasosta (0,7 milj. m^3) nykyisten luonnonhoitomenetelmien PLH-mallissa (4,4 milj. m^3) ja kahdeksankertaistui tehostetun luonnonhoidon TLH-mallissa (5,8 milj. m^3).

Tehostetun luonnonhoidon malli (TLH) tuotti laskentaoletusten mukaisesti enemmän ja järeämpiä säästöpuuta kuin perusluonnonhoito (PLH). Ero korostui etenkin muiden lehtipuiden kuin koivun ja haavan säästöpuutilavuuden kehityksessä (Taulukko 8). Säästöpuiden merkitys puuntuotannon metsämaan järeän lehtipuuston kehityksen osalta kasvoi molemmilla metsänhoi-



Kuva 8. Säästöpuiden osuus puuntuotannon metsämaan järeän (rinnankorkeusläpimitta $d_{1,3} > 30$ cm) haavan ja muun (ei koivu tai haapa) järeän lehtipuun yhteenlasketusta tilavuudesta 70 milj. m^3 :n vuotuisten hakkuuiden tasolla (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, %.

donmalleilla ja molemmilla hakkuutasoilla, korostuneesti kuitenkin TasoSY:n voimaperäisimmillä hakkuilla. Säästöpuiden osuus puuntuotannon metsämaan järeästä lehtipuustosta nousi tarkastelujaksolla 30–80 %:iin nykyisestä noin 10 % tasosta (Kuva 8). Laskelmissa sovelletut lehtipuiden poisto-ohjeet ja toisaalta muiden lehtipuiden kuin koivujen uudistumismallit voivat korostaa säästöpuiden merkitystä yliarvioimalla lehtipuiden todellista poistumaa harvennushakkuissa ja toisaalta aliarvioiden niiden uudistumista.

3.5 Vanhojen metsien pinta-ala

Tässä tutkimuksessa vanhaksi metsäksi luokiteltiin Etelä-Suomessa yli 120-vuotiaat ja Pohjois-Suomessa yli 160-vuotiaat metsät (Korhonen ym. 2020, 2021). Näin määritellyn vanhan metsän mukaisen metsämaan (sis. suojellun ja puuntuotannon metsämaan) pinta-ala oli Suomessa Korhosen ym. (2020) mukaan 1,4 milj. ha, joka on n. 7 % koko metsämaan alasta. Etelä-Suomessa yli 120-vuotiaiden metsämaan metsien osuus oli vuonna 2015 laskelmien alussa 3,9 % (0,438 milj. ha) ja Pohjois-Suomessa yli 160-vuotiaita metsiä oli metsämaan alasta 10,5 % (0,962 milj. ha) (Taulukko 9). Metsikön ikä perustui VMI12:n maastoinventoinnin perusteella määritettyyn vallitsevan jakson pohjapinta-alalla painotettuun puuston keski-ikään. Metsikön ikää kasvatettiin simuloidun ajan kulun mukaisesti iän nollautuessa pätehdakkuissa.

Molemmilla luonnonhoidon malleilla (PLH ja TLH) ja hakkuutasoilla (Taso70 ja TasoSY) vanhojen metsien pinta-ala metsämaalla kasvoi 50 vuoden tarkastelujaksolla alkuhetkeen verrattuna (Taulukko 9). Taso70:n hakkuilla PLH:n mukaisella metsien käsittelyllä vanhojen metsämaan metsien pinta-ala nousi 2,2 milj. ha:iin ja TLH-käsittelyllä 2,3 milj. ha:iin. TasoSY-laskelmissa PLH-mallilla vanhojen metsien pinta-ala nousi 1,75 ja TLH-mallilla 2 milj. ha:iin.

Metsien järeytymis- ja tilavuuskehityksen nopeutumisen seurauksena yhä suurempi osa Taso70:n mukaisesta vakioidusta hakkuukertymästä saatiin laskelma-ajan edetessä kasvatushakkuista (ks. Taulukko 5) ja metsien ikärakenne kehittyi ensimmäisen kymmenvuotiskauden jälkeen Etelä-Suomessa monimuotoisuuden kannalta suotuisasti. Taso70:n PLH-mallissa Etelä-Suomen yli 120-vuotiaiden metsien määrä lähes kaksinkertaistui nykyisestä vuoteen 2065 mennessä ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) toimet tuottivat Etelä-Suomeen vanhoja, yli 120-vuotiaita metsiä vielä noin 60 000 ha enemmän (Taulukko 9).

Etelä-Suomessa vanhojen metsien määrä väheni aluksi molemmilla hakkuutasoilla (Kuva 9a). Nettotuottojen nykyarvoa maksimoiva tavoitefunktio kohdisti hakkuita ensimmäiselle 10-vuotiskaudella uudistuskypsiin metsiin, joiden arvokasvuprosentti alitti laskentakoron ja joissa edelleen kasvatuksen vaihtoehtokustannus oli suuri puustoon sitoutuneen pääoman vuoksi. Tavoitefunktion vaikutus korostui erityisesti TasoSY:n ratkaisuisissa, joissa hakkuukertymä noudattiin PLH- kuin TLH-malleissa puuntuotannon kestävyysrajoitteiden määrittämää tuotantomah-

Taulukko 9. Vanhojen metsämaan metsien (Etelä-Suomi metsät yli 120 vuotta ja Pohjois-Suomi yli 160 vuotta) pinta-alan kehitys vuodesta 2015 vuoteen 2065, milj. ha ja niiden osuus koko metsämaan alasta 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, %.

	2015		Taso70				TasoSY			
			PLH		TLH		PLH		TLH	
	milj. ha	%	milj. ha	%	milj. ha	%	milj. ha	%	milj. ha	%
Etelä-Suomi	0,44	3,9	0,79	7,0	0,85	7,6	0,52	4,7	0,67	5,9
Pohjois-Suomi	0,99	10,5	1,44	15,7	1,46	15,9	1,23	13,4	1,33	14,5
Suomi	1,43	6,9	2,23	10,9	2,31	11,3	1,75	8,6	2,00	9,8



Kuva 9. Vanhojen metsien pinta-alan kehitys metsämaalla kymmenvuotiskausittain 2015–2065 perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun (TLH) luonnonhoidon malleilla Taso70:n ja TasoSY:n hakkuilla a) Etelä-Suomessa (yli 120-vuotiaat metsämaan metsät) ja b) Pohjois-Suomessa (yli 160-vuotiaat metsämaan metsät), 1000 ha.

dollisuuksien rajaa. TasoSY:n hakkuilla Etelä-Suomen vanhojen yli 120-vuotiaiden metsämaan metsien ala supistui laskelmien alussa PLH-mallissa 160 000 ha ja TLH-mallissakin 140 000 ha lisäsuojelusta huolimatta. Laskentakauden loppuun eli vuoteen 2065 mennessä vanhojen metsien pinta-ala kasvoi nykyisestä myös TasoSY:n mukaisissa hakkuuskenaariossa Etelä-Suomessa PLH-mallilla 80 000 ha (18 %) ja TLH-mallilla 230 000 ha (52 %) (Taulukko 9).

Pohjois-Suomessa vanhojen yli 160-vuotiaiden metsien pinta-alan kehitys metsämaalla oli molempien luonnonhoitomallien ja hakkuutasojen välillä tasaisempaa kuin Etelä-Suomessa (Kuva 9b). Tämä johtui sekä nykyisestä huomattavasta vanhojen metsien suojelutasosta (Taulukko 10) että puuntuotannon metsien rakenteesta. Pohjois-Suomessa puuntuotannon piirissä olevat metsämaan metsät ovat vasta saavuttamassa joko harvennus- tai uudistamisvaiheen hakkuukypsyyden, jolloin Pohjois-Suomessa ei ole samanlaista hakkuukypsien metsien reserviä kuin Etelä-Suomessa. Pohjois-Suomessa Taso70:n mukaisilla hakkuilla sekä PLH- että TLH-malleilla vanhojen metsien pinta-ala kasvoi 50 vuodessa noin 45 % (0,5 milj. ha) ja vastaavasti TasoSY:n hakkuilla perusluonnonhoidolla (PLH) 24 % ja tehostetussa luonnonhoidossa (TLH) 34 % (Taulukko 9).

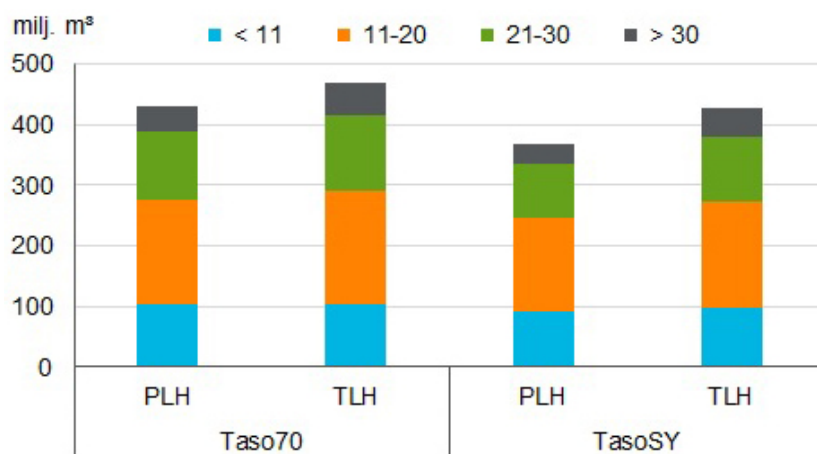
Taulukko 10. Suojellun metsämaan suhteellinen osuus vanhojen (Etelä-Suomi metsät yli 120 vuotta ja Pohjois-Suomi yli 160 vuotta) koko metsämaan metsien pinta-alasta 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden Taso70 ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän TasoSY -laskelmissa perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, %.

		2015	2025	2035	2045	2055	2065
		%					
Etelä-Suomi > 120 v							
Taso70	PLH	14,5	21,4	25,4	26,1	26,1	25,2
	TLH	14,5	36,0	42,2	45,5	48,2	49,1
TasoSY	PLH	14,5	30,9	37,8	39,4	39,0	37,9
	TLH	14,5	47,7	56,3	60,0	61,1	62,4
Pohjois-Suomi > 160 v							
Taso70	PLH	70,9	74,0	74,0	72,1	69,1	65,4
	TLH	70,9	87,3	86,8	85,2	82,6	79,0
TasoSY	PLH	70,9	79,4	80,1	79,7	78,2	76,6
	TLH	70,9	90,6	90,3	90,0	88,6	87,0

TasoSY:n PLH-mallia lukuun ottamatta vanhojen metsien pinta-ala kasvoi vuoteen 2065 mennessä Etelä-Suomessa suhteellisesti enemmän kuin Pohjois-Suomessa. Etelä-Suomessa erityisesti puuntuotannon ulkopuolelle siirtyneen pinta-alan (lisäsuojelun) merkitys osoittautui merkittäväksi etenkin skenaariossa, jossa hakkuut tulevaisuudessa kasvavat voimakkaasti (TasoSY) (Taulukko 10).

3.6 Luonnonpoistuma ja kuolleen puun määrä

Vuosien 2015–2064 luonnonpoistuman MELA-arvio (Kuva 10) oli Taso70:n PLH-luonnonhoidon mallissa metsämaalla 432 milj. m³ (21,3 m³ ha⁻¹) ja TLH-luonnonhoidossa 469 milj. m³ (23,1 m³ ha⁻¹) ja vastaavasti TasoSY:n PLH-mallilla 368 milj. m³ (18,2 m³ ha⁻¹) ja TLH:ssa 427 milj. m³ (21,1 m³ ha⁻¹). Taso70:n luonnonpoistuman arvio oli PLH-mallissa noin 15 % ja TLH-luonnonhoidolla noin 10 % suurempi kuin TasoSY:n vastaavissa ratkaisuissa. Luonnonpoistumana



Kuva 10. Vuosien 2015–2064 luonnonpoistuma metsämaalla kuolleiden puiden rinnankorkeuden ($d_{1,3}$) läpimittaluokissa 70 milj. m³:n vuotuisten hakkuiden tasolla (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä, milj. m³.

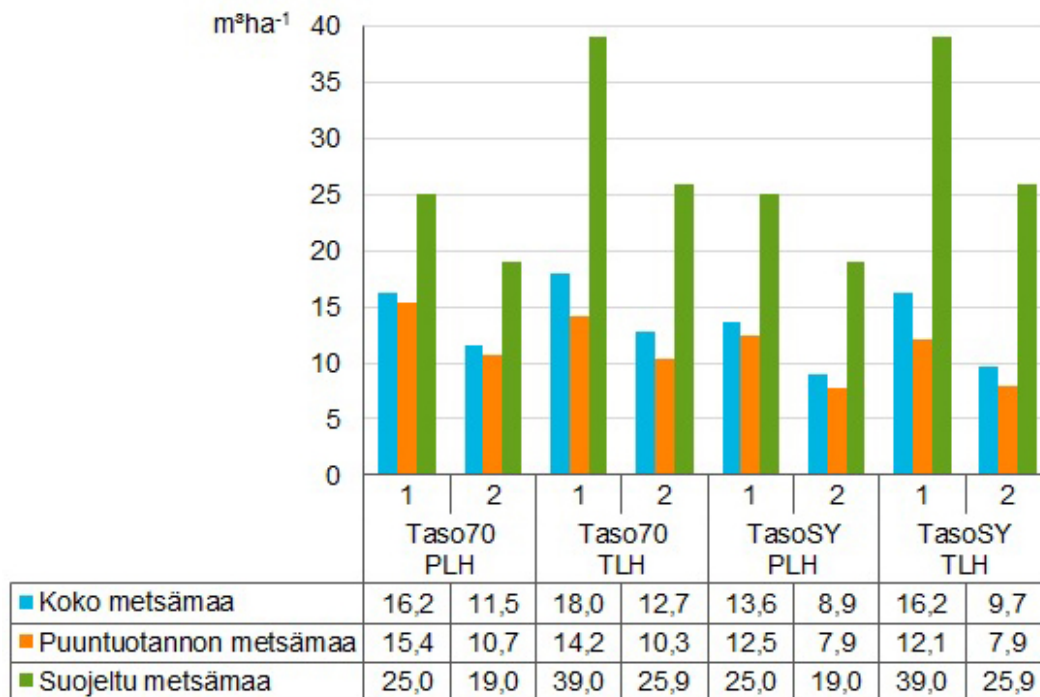
Taulukko 11. a) Suojellun metsämaan osuus rinnankorkeusläpimitan ($d_{1,3}$) vuosien 2015–2064 koko metsämaan luonnonpoistumasta, %. b) Säästöpuiden osuus rinnankorkeusläpimitan ($d_{1,3}$) vuosien 2015–2064 puuntuotannon metsämaan luonnonpoistumasta, %.

		a) Suojeltu metsämaa				b) Säästöpuut			
		Taso70		TasoSY		Taso70		TasoSY	
		PLH	TLH	PLH	TLH	PLH	TLH	PLH	TLH
		%				%			
Luonnonpoistuma	$d_{1,3} > 0$ cm	13,1	30,7	15,4	33,7	3,3	3,7	3,9	4,3
	$d_{1,3} > 10,5$ cm	14,0	33,1	16,7	36,8	4,3	4,8	5,2	5,6
	$d_{1,3} > 30,5$ cm	25,3	55,4	34,1	63,9	16,8	23,4	25,5	34,2
Luonnonpoistuma havupuut	$d_{1,3} > 0$ cm	13,9	24,6	16,5	28,1	2,8	3,0	3,3	3,5
	$d_{1,3} > 10,5$ cm	14,2	25,1	16,9	28,8	3,3	3,5	3,9	4,1
	$d_{1,3} > 30,5$ cm	30,8	52,4	39,4	59,8	18,0	21,7	25,4	29,1
Luonnonpoistuma lehtipuut	$d_{1,3} > 0$ cm	12,2	37,5	14,1	39,5	3,9	4,7	4,6	5,2
	$d_{1,3} > 10,5$ cm	13,9	43,8	16,5	46,7	5,7	7,1	7,0	8,1
	$d_{1,3} > 30,5$ cm	20,1	57,9	28,6	67,6	15,8	25,0	25,7	39,9

kuolleiden puiden läpimittarakenteen kehitys (% tilavuudesta) oli metsämaalla samankaltainen laskelmavaihtoehdosta riippumatta painottuen ensimmäisellä kaudella $d_{1,3}$ -läpimitaltaan alle 11 cm:n puihin järeämmän puuston osuuden kasvaessa tarkastelun loppua kohden. Koko tarkastelujaksolla vuosina 2015–2064 $d_{1,3}$ -läpimittaluokkien suhteelliset tilavuusosuudet olivat eri laskelmavaihtoehdoissa samaa suuruusluokkaa: alle 11 cm puiden osuus oli 25 %, 11–20 cm 40 %, 21–30 cm 25% ja yli 30 cm 10 %.

Koko metsämaan vuosien 2015–2064 luonnonpoistumasta suojelualueiden osuus oli lisäsuojelun seurauksena THL-ratkaisuissa selvästi PLH-ratkaisuja suurempi (Taulukko 11a). Suojellun metsämaan osuus kasvoi, mitä järeämmästä puusta oli kyse, ja vaikutus oli lehtipuilla suurempi kuin havupuilla. Suojelun merkitystä korosti hakkuumäärien kasvu. Vastaavasti säästöpuiden osuus puuntuotannon metsämaan vuosien 2015–2064 luonnonpoistumasta korostui rinnankorkeusläpimitalta ($d_{1,3}$) yli 30 cm puilla, hakkuumäärien kasvaessa ja tehostetun luonnonhoidon ratkaisuihin (Taulukko 11b).

Valtakunnan metsien inventoinnissa lahoppuuna lasketaan läpimitaltaan vähintään 10 cm:n ja pituudeltaan vähintään 1,3 m:n kuolleen puun rungot tai esim. katkenneet, kuolleen puun osat (Valtakunnan ... 2013). Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 10,5 cm:n puiden kumulatiivisen luonnonpoistuman MELA-arvio oli vuosille 2015–2064 koko metsämaalla Taso70:n PLH-mallissa 329 milj. m^3 (76,3 % metsämaan luonnonpoistumasta) ja keskimäärin $16,2 m^3 ha^{-1}$ (Kuva 11-1). TLH-mallissa vastaavat luvut olivat 364 milj. m^3 (77,8 %) ja keskimäärin $18,0 m^3 ha^{-1}$. TasoSY:n PLH-ratkaisussa yli 10 cm puiden luonnonpoistuman arvio oli 276 milj. m^3 (75,1 %) $13,6 m^3 ha^{-1}$ ja TLH-mallissa 329 milj. m^3 (76,9 %) ja $16,2 m^3 ha^{-1}$. Puuntuotannon metsämaalla keskimääräinen luonnonpoistuma hehtaarilla oli 1–4 m^3 pienempi ja suojelualueilla 10–27 m^3 suurempi kuin metsämaalla keskimäärin. Em. luvuissa ei ole otettu huomioon lahoamista eikä uudistushakkuiden ja siihen liittyvän maanmuokkauksen seurauksena maahan kaatuneen kuolleen puun eli ns. maapuun tuhoutumista, jonka on arvioitu olevan 60–70 % (Hautala ym. 2004; Ihalainen ja Mäkelä 2009). Jos lahoamisen ja hakkuiden yhteydessä tapahtuvan tuhoutumisen vaikutus otetaan huomioon soveltaen vuosittain Etelä- ja Pohjois-Suomessa yksinkertaistaen koko luonnonpoistumana kuolleella puulla Mäkisen ym. (2006) lahoamisytälöitä ja uudistushakkuiden yhteydessä maapuun 70 % tuhoutumista, niin kumulatiivisen kuolleen puun määrän arvio laskee $3,9–13,1 m^3 ha^{-1}$ ollen koko metsämaalla keskimäärin $8,9–12,7 m^3 ha^{-1}$, puuntuotannon metsämaalla $7,9–10,7 m^3 ha^{-1}$ ja puuntuotannon ulkopuolella olevalla metsämaalla $19,0–25,9 m^3 ha^{-1}$ (Kuva 11-2).



Kuva 11. Rinnankorkeusläpimitalta yli 10,5 cm puiden luonnonpoistuma keskimäärin metsämaan hehtaarilla 70 milj. m³:n vuotuisen hakkuiden (Taso70) ja suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän tasolla (TasoSY) perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) mukaisilla metsien käsittelyillä vuosina 2015–2064, m³ ha⁻¹. 1) lahoamista ja maapuun hävikkiä uudistushakkuiden ja maamuokkauksen yhteydessä ei ole otettu huomioon, 2) lahoaminen ja maapuun hävikki on otettu huomioon soveltaen yksinkertaista kuolleelle puulle puulajeittain Mäkisen ym. (2006) lahoamisyhtälöitä ja maapuulle 70 %:n hävikkiä uudistushakkuissa.

4 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa arvioitiin nykyiseen metsänhoitoon kuuluvan perusluonnonhoidon (PLH) ja tehostetun luonnonhoidon (TLH) vaikutuksia metsien monimuotoisuudelle tärkeiden rakennepiirteiden kehitykseen 50 vuoden tarkastelujaksolla (2015–2064) kahdella eri hakkuiden tasolla. Tutkimuksessa käytetyt luonnonhoidon mallit perustuivat nykyisiin metsänhoitosuosituksiin ja vallitsevaan tasaikäisrakenteiseen metsien hoitoon, jossa puusto uudistetaan päätehakuussa joko avohakkuulla ja viljellen tai luontaisen uudistamisen kautta. Kehitysmallien puutteen vuoksi peitteellisen metsänkasvatuksen menetelmät eivät olleet mukana tutkimuksessa.

Tehostetun luonnonhoidon toimina tarkasteltiin puuntuotannon ulkopuolella olevan (suo-jellun) metsämaan alan lisäystä, 10 %:n sekapuuosuuden jättöä hakkuiden jälkeiseen puustoon, säästöpuiden määrän ja niiden koon lisäystä, harvennushakkuiden yhdistetyssä aines- ja energiapuun korjuussa ainespuukokoisen lehtipuun korjuuta energiapuuksi vain 4–9 cm:n rinnankorkeusläpimitoissa sekä luopumista kantojen korjuusta. Nämä luonnonhoidon toimet, joita jo osittain mm. metsäsertifioinneissa sovelletaan, kattoivat vain osan mahdollisista; mukana ei ollut esim. piden-nettyjä kiertoaikoja tai uudistamisalaa koskevia rajoituksia. Tulokset perustuvat yksinkertaistetuihin laskelmaoletuksiin sekä metsien kehityksen mallipohjaiseen tarkasteluun. Näihin molempiin liittyvien puutteen vuoksi tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon, että laskelmien erotuskyky monimuotoisuuden kannalta merkittävien rakennepiirteiden osalta oli rajallinen. Laskelmatulokset perustuvat lisäksi optimoinnin tuottamiin ratkaisuihin ja laskennassa käytetty nettotuottojen nykyarvoa maksimoiva tavoitefunktio painotti alussa saatavia tuloja, mikä vaikutti erityisesti uudistushakkuiden painottumiseen ensimmäiselle kymmenvuotiskaudelle.

Hakkuukertymien osalta selvityksessä tutkittiin kahta hakkuutasoa: Taso70 ja TasoSY. Taso70:ssa runkopuun vuotuinen hakkuukertymä oli koko tarkastelujakson 70 milj. m³ vuodessa. Valittu taso perustui vuosina 2015–2017 maakunnittain toteutuneeseen hakkuukertymään ja sen rakenteeseen. TasoSY määräytyi puolestaan MELA-laskennan tuloksena, ja se edusti suurinta jatkuvasti ylläpidettävää hakkuumäärää, joka pyrki hyödyntämään metsien hakkuumahdollisuudet täysimääräisesti puuntuotannollisen kestävyuden määrittämässä rajoissa. Näiden hakkuutasojen katsottiin osoittavan luonnonhoidon vaikutukset metsien rakennepiirteiden kehitykseen toimitaessa suunnilleen nykyisellä ja toisaalta intensiivisellä hakkuiden tasolla. Liitteissä L4.1–4.5 on esitetty kootusti tutkimuksen tulokset vertailevina graafeina.

Tehostetun luonnonhoidon (TLH) mallissa puuntuotannon ulkopuolelle siirtyi 1,2 miljoonaa hehtaaria nykyistä puuntuotannon metsämaata molemmilla hakkuutasoilla. Osa tästä (0,3 milj. ha) oli jo ennestään rajoitetussa käytössä olevaa talousmetsää, mikä vähensi siirtymän puuntuotannollisia vaikutuksia. Puuntuotannon ulkopuolelle siirtyneet kohteet valittiin puuston rakennepiirteiden perusteella lisäsuojelun kohdistuessa etenkin korpiin ja iäkkäisiin kangasmetsiin. Valtakunnan metsien inventoinnin maastokoeloihin perustuvassa tarkastelussa ei voitu ottaa huomioon kohteiden kokoa eikä sijaintia suhteessa olemassa olevaan suojelualueverkostoon tai uhanalaisten lajien esiintymispaikkoihin. Kohteiden yksityiskohtaisempi valinta olisi edellyttänyt kattavaa kuvioaineistoa. Metsien monimuotoisuudelle arvokkaiden alueiden sijaintia ja kytkeytyvyyttä koko Suomen mittakaavassa on selvittänyt esim. Mikkonen ym. (2018). Kohteiden valinnassa ei liioin otettu huomioon metsien omistusta eikä esim. lisäsuojelun varsinaisia kustannuksia. Käytännössä suojelun toteutukseen vaikuttavat kuitenkin keskeisesti metsänomistajien intressit, suojelusta maksettava korvaus ja muut kannustimet. Kärkkäinen ym. (2021) sekä Kärkkäinen ja Koljonen (2021) ovat tarkastelleet laajamittaisen lisäsuojelun ekologisten vaikutusten lisäksi sen sosiaalisia ja taloudellisia vaikutuksia.

Kattavuutensa vuoksi lisäsuojeltuun alaan kuului todennäköisesti kuitenkin uhanalaisia metsä- ja suoluontotyyppisiä. Etenkin Etelä-Suomessa nykyinen metsien suojelualueverkosto saisi näiden alueiden kautta merkittävää vahvistusta suojellun ja monimuotoisuuden kannalta laadukkaan metsämaan pinta-alan lähes kolminkertaistuksessa vuoden 2015 tilanteesta. Myös Pohjois-Suomessa vaikutus suojellun metsämaan pinta-alaan olisi huomattava. Määrällisenä vertailukohtana voidaan käyttää esimerkiksi Etelä-Suomen monimuotoisuusohjelma METSON pysyvän suojelun tavoitetta, joka on 96 000 hehtaaria vuoteen 2025 mennessä (Valtioneuvoston ... 2014). TLH-skenaarion mukaisen suojelun toteuttaminen toisi uutta suojelupinta-alaa METSO-tavoitteeseen verrattuna noin kuusinkertaisesti enemmän sekä Etelä- että Pohjois-Suomeen. Suojelun positiiviset vaikutukset metsälajistoon ovat monitahoiset: metsäpeitteen ja lajiston habitaattien suoran säilyttämisen lisäksi suojelulla voidaan mm. vaikuttaa varsin nopeasti metsien laatuun (esim. kuolleen puun määrien lisääntymisen kautta) sekä edesauttaa lajien säilymistä muuttuvassa ilmastossa, etenkin jos suojelualueet ovat riittävän laajoja ja toisiinsa kytkeytyneitä (Virkkala ym. 2022).

Taso70-laskelmissa kumpikin luonnonhoidon malli mahdollisti tavoitteeksi asetetun 70 milj. kuutiometrin vuosittaiset hakkuut puuston määrän lisääntyessä samalla selvästi kasvua pienemmillä hakkuilla. Vuosien 2015–2017 kuitupuupainotteisen kertymäarakenteen ja harvennusikäisten metsien tilavuuden kasvun myötä hakkuiden painopiste siirtyi tulevaisuudessa yhä enemmän kasvatushakkuihin, mikä vaikutti monimuotoisuuden kannalta metsien ikärakenteen suotuisaan kehitykseen myös Taso70:n PLH-ratkaisussa.

Suurin ylläpidettävä hakkuukertymä (TasoSY) oli PLH-mallin mukaisessa metsien käsittelyssä koko 50 vuoden aikana keskimäärin 92,1 milj. m³ vuodessa kasvaen alun (v. 2015–2024) 86 milj. kuutiometrillä 94 milj. m³:iin vuodessa tarkastelun lopussa (v. 2055–2064). TasoSY:n TLH-mallissa vuosittainen hakkuukertymä oli keskimäärin noin 7 milj. m³ PLH-ratkaisua pienempi ollen 78–87 (keskimäärin 85,4) milj. m³ vuodessa. Suurimman ylläpidettävän hakkuukertymän

laskenta tasoittaa tehostetun luonnonhoidon puuntuotannollisia vaikutuksia, sillä välitön hakatavissa oleva puumäärä aleni 140 milj. m³, joka ensimmäisen 10-vuotiskauden vuosille jaksotettuna olisi 14 milj. m³ vuodessa.

Laskelmien hakkuukertymissä ei otettu huomioon metsään jäänyttä ainespuukokoista runkopuuta, jonka osuus on Ihalaisen (2013) mukaan ollut runsas 0,5 % tilastoidusta hakkuukertymästä. Laskelmissa ei liioin kalibroitu hakkuissa syntyvää hukkapuun kokonaismäärää VMI-arvioihin, kuten on tehty VMI12:n hakkuukertymäarvioiden tulosjulkaisuissa (Luonnonvarakeskus 2021b; Hirvelä ym. 2023). Laskelmien mukainen runkopuun hakkuupoistuma on näin käytäntöön nähden optimistinen ja em. hukkapuun kalibrointi olisi lisännyt jonkin verran Taso70:n toteuttamiseen tarvittavia hakkuuta, mikä olisi heikentänyt metsien rakennepiirteiden kehitystä monimuotoisuuden kannalta. TasoSY-laskelmissa vaikutus olisi ollut hakkuukertymää alentava.

TasoSY:n TLH-mallin energiapuukertymässä näkyi pidättäytyminen kantojen korjuusta muiden jakeiden pysyessä PLH-ratkaisun kanssa kutakuinkin samalla tasolla. TasoSY:n PLH-ratkaisussa kantoja nostettiin keskimäärin noin 8,2 milj. m³ vuodessa. Taso70:n PLH-laskelmassa kantojen korjuuta oli keskimäärin 0,4 milj. m³ vuodessa. Kantojen korjaamatta jättäminen on monimuotoisuuden kannalta positiivinen teko, sillä kantojen poisto vähentää monimuotoisuudelle tärkeää kuollutta puuta ja vaikuttaa negatiivisesti maaperän eliöyhteisöihin. Vaikka kantojen korjuu on ollut viime vuosina vähäistä, niin puun ensiasteisen energiakäytön lisäys tulevaisuudessa saattaa kohdistua kantoihin, sillä muun hakkuutähteen osalta potentiaali on jo käytössä (Anttila ym. 2018). Lisäksi runkopuun osalta Euroopan komissio on ehdottanut uusiutuvan energian direktiivin (RED II) tarkistamista siten, että puun energiakäyttö perustuisi ns. kaskadiperiaatteelle, jossa energiaksi ohjautuisi vain muuhun käyttöön soveltumaton aines.

Taso70:n mukaisilla hakkuumäärillä puuston tilavuus lisääntyi 50 vuodessa PLH-laskelmassa 1388 ja TLH-laskelmassa 952 milj. m³ enemmän kuin TasoSY-laskelmassa. Lisäys voi vaikuttaa positiivisesti ainakin tavanomaiseen sulkeutuneiden metsien lajistoon, etenkin kun hakkuiden painopiste siirtyi Taso70:n mukaisella kertymärakenteella kasvatusmetsiin ja puuntuotannon metsämaan metsien ikäluokkarakenne vanheni.

Hakkuiden ohella tilavuuden kehitykseen vaikuttaa keskeisesti puuston kasvu. MELA-ohjelmiston tuottamat kasvuarviot on saatu samalla tavalla kuin julkistetuissa VMI12:n hakkuumahdollisuusarvioissa (Luonnonvarakeskus 2021b; Hirvelä ym. 2023). Arvio perustuu valtakunnan metsien vuosien 1984–2013 mitattuihin puulajeittain laskettuihin läpimitan indeksikorjattuihin kasvuihin, jossa on otettu huomioon kalibrointijakson keskivuodesta (1999) vuoteen 2017 tapahtunut keskilämpötilan ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousu. VMI13:n vuosien 2019–2020 mittausaineiston mukaan puuston kasvu on notkahtanut. Tässä laskelmassa käytetyt indeksikorjatut kasvumallit ennustavat puuston kasvun tasoa, joka on VMI12:n ja VMI13:n kasvuarvioiden puolivälissä. VMI13:n kasvutulosten perusteella ei voi vielä arvioida, että tässä tutkimuksessa käytettyjen mallien kasvun taso olisi virheellinen. Alempi puuston kasvu johtaisi tilavuuden pienempään lisäykseen, mikä vaikuttaisi Taso70:n laskelmissa tavoitteen saavuttamiseen ja johtaisi todennäköisesti puuntuotannon maalla nyt arvioitua heikompaan monimuotoisuudelle tärkeiden rakennepiirteiden kehitykseen. TasoSY:n laskelmissa, joissa hakkuukertymän kehitys seuraa kasvua, kertymät jäisivät alemmalla kasvun tasolla esitettyjä pienemmiksi.

Tehostetun luonnonhoidon malli tuotti lehtipuustoa perusluonnonhoidon mallia 12 % enemmän Taso70- ja 20 % enemmän TasoSY-laskelmassa. Lehtipuuston tilavuuden kasvu keskittyi lähinnä Pohjois-Suomeen. Suurimman puuntuotannollisesti ylläpidettävän hakkuukertymän (TasoSY) skenaarioissa lehtipuuston tilavuus väheni lähtöpuustoon verrattuna Etelä-Suomessa 50 vuodessa PLH-laskelmassa noin 80 ja TLH-laskelmassa 21 milj. m³. Taso70:n TLH-laskelmassa lehtipuuston tilavuus lisääntyi Etelä-Suomessa 16 %, ja säilyi PLH-laskelmassa nykytasolla.

Laskelmien harvennushakkuissa sovellettu hakkuujärjestys, jonka mukaan muita puulajeja poistettiin ennen kasvatettavaksi valittua pääpuulajia, yliarvioi käytäntöön verrattuna lehtipuuston hakkuut johtaen lehtipuuston kehityksen todennäköiseen aliarvioon. TasoSY-laskelmissa lehtipuuston kehitystä selittävät myös laskentaoletusten mukaiset talouden tuotto-odotukset, jolloin kaikki metsänhoitosuosituksen mukaisesti hakkuukypsä puutavara korjattiin kannattavuuden ja rajoitteiden sen salliessa ilman käytännön kysynnän asettamia rajoja. Lisäksi lehtipuiden kasvatuksen kannattavuus oli käytetyillä puun hinnoilla ja mallien mukaisilla kasvuoletuksilla havupuita heikompaa, joten uudistaminen lehtipuulle valikoitui toimenpiteenä vain aivan viljavimmille maille lehtoihin tai lehtomaisiin kankaisiin. Taso70:n laskelmissa noudatettu vuosien 2015–2017 toteutuneen kertymän rakenne määrittä puolestaan lehtipuuston hakkuut ja sen mukaisesti myös varsin vähäiset toimenpiteet lehtipuukertymän turvaamiseksi tulevaisuudessa.

Metsien puulajisuhteiden muutokset (kuten lehtipuiden väheneminen ja lehtojen kuusettuminen) ovat olleet yksi taantumisen syy 27 %:lle uhanalaisista ja silmälläpidettävistä metsälajeista (426 lajille 1587 lajista) ja yhtenä tulevaisuudessa vaikuttavana uhkatekijänä 28 %:lle näistä lajeista (Hyvärinen ym. 2019). Lehtipuuston kokonaismäärä on itse asiassa viimeisen 100 vuoden aikana lisääntynyt (Korhonen ym. 2021), mutta vanhojen yli 150-vuotiaiden lehtipuiden määrä on sen sijaan vähentynyt huomattavasti 1970-luvulta nykypäivään: VMI6:ssa vanhojen lehtipuiden määrän arvio oli 158 milj. runkoa ja VMI11:ssa 102 milj. runkoa (Henttonen ym. 2019). Lehtipuuston kokonaiskehitystä merkittävämpää monimuotoisuuden kannalta on järeän vanhan lehtipuuston kehitys, sillä etenkin uhanalaisille lajeille vanhojen järeiden elävien lehtipuiden ja järeän lehtilahopuun väheneminen on kohtalokasta. Näistä riippuville lajeille sopivan puuston määrän tulisi lisääntyä siellä, missä lajistoa vielä esiintyy – muualla tällaisen puuston lisääntyminen ei näy lajien populaatioiden nopeana vasteena, jos lajit ovat jo ehtineet hävitä alueelta (ks. esim. Korhonen ym. 2016). Vanhojen haapojen kuoleminen ja uudistumisvaikeudet suojelualueilla (Kouki ym. 2004; Latva-Karjamaa ym. 2007; Junninen 2012; Hardenbol ym. 2020) voivat heijastua negatiivisesti haapalajiston tilaan myös talousmetsissä, jos suojelualueet eivät enää toimi vaateliaan lajiston lähdealueina (Korhonen ym. 2020).

Lehtipuuston kokonaistilavuuden osalta TasoSY:n mukaiset lehtipuuston hakkuut johtaisivat metsiemme monimuotoisuuden ja metsäekosysteemin heikkenemiseen verrattuna nykytilaan. Myönteinen huomio on kuitenkin se, että järeän, rinnankorkeudelta yli 30 cm:n läpimittaisen lehtipuuston tilavuus metsämaalla kasvoi myös TasoSY:n ratkaisuissa: PLH-laskelmassa 24 milj. ja TLH-laskelmassa 57 milj. m³. Taso70:n PLH-laskelmassa järeän lehtipuuston tilavuus kasvoi 50 vuoden aikana 100 milj. ja TLH-laskelmassa 115 milj. m³. Pääosa lisäyksestä oli koivua (Taso70:n PLH 90 ja TLH 102 milj. m³; TasoSY:n PLH 23,5 ja TLH 49 milj. m³), mutta myös muun järeän lehtipuun kuin koivun tilavuus lisääntyi skenaarioissa lukuun ottamatta TasoSY:n PLH-ratkaisua.

Lisäsuojelu ja säästöpuiden jättäminen vaikuttivat huomattavasti järeän lehtipuun kehitykseen. Tarkastelujakson lopussa rinnankorkeusläpimitaltaan yli 30 cm:n haavoista ja muista lehtipuista kuin koivuista lähes 19 % oli Taso70:n PLH-laskelmassa suojelualueilla ja 27 % säästöpuina, ja vastaavasti TLH-laskelmassa 41 % suojelualueilla ja 30 % säästöpuina. TasoSY-laskelman PLH-ratkaisussa järeästä haavasta ja muusta järeästä lehtipuusta kuin koivuista 50 vuoden kuluttua suojelualueilla oli 29 % ja säästöpuina 42 % ja TLH-ratkaisussa suojelualueilla oli 50 % ja säästöpuina 39 %. Laskelmissa ei otettu huomioon säästöpuiden mahdollista korjuuta myöhemmissä hakkuissa tai kotitarvepuuksi, vaan ne säilyivät laskennassa koskemattomina koko tarkastelujakson ajan aina kuolemaansa asti. Käytännössä kuitenkin lähes kolmanneksella uudistushakkuualoista on korjattu säästöpuustoa esimerkiksi polttopuiksi kotitarvekäyttöön, ja korjuu on kohdistunut etenkin järeisiin säästöpuihin (Salomäki 2005; Kurttila ja Hänninen 2006; Hänninen ym. 2008, 2010).

Robergen ym. (2015) Ruotsissa tekemien skenaariolaskelmien mukaan järeiden havupuiden määrä lisääntyi sekä säästämällä 5 % elinympäristöjen pinta-alasta (painotus vanhoissa metsissä) että jättämällä avohakkuuleimikoiden pinta-alasta 5 % säästöpuustolle yksittäisinä säästöpuina ja säästöpuuryhminä, mutta järeän lehtipuun määrää kasvatti merkittävämmiin ainoastaan säästöpuukäytäntö, tosin vasta pitkän ajan (yli 50 vuotta) kuluessa. Talousmetsien luonnonhoidon laadun seuranta-aineistojen mukaan säästöpuiden määrä Suomessa oli yksityismaiden uudistusaloilla vuosina 2013–2017 keskimäärin 1,3 % korjattavasta puustosta (Siitonen ym. 2020). Robergen ym. (2015) skenaarioissa käyttämä säästöpuun määrä oli nelinkertainen em. tasoon nähden. Verrattaessa Robergen ym. (2015) tuloksiin, tässä tutkimuksessa suojelualueiden merkitystä korosti lisäsuojeluun siirrettyjen järeäpuustoisten lehtipuumetsien määrä.

Säästöpuilla on todettu olevan positiivisia monimuotoisuusvaikutuksia boreaalisen metsän lajistolle (esim. Keto-Tokoi 2018; Keto-Tokoi ym. 2021; Koivula ym. 2022). Pykälän (2019) kirjallisuuskatsauksen mukaan suuri osa uhanalaisten epifyyttien talousmetsien esiintymistä löytyy nk. avainbiotoopeilta tai säästöpuilta – etenkin säästöpuuhaapojen merkitys epifyyttilajistolle on merkittävä. Tässä tutkimuksessa säästöpuutilavuus kasvoi hakkuumääristä riippuen 4,5–6 kertaiseksi nykyiseen nähden. Tutkimusten mukaan säästöpuita tulisi avohakkuissa jättää 5–10 % puustosta, jotta ne säilyttäisivät laajamittaisemmin talousmetsien monimuotoisuutta (Keto-Tokoi 2018; Kuuluvainen ym. 2019; Keto-Tokoi ym. 2021). Skenaariolaskelmiin sisällytetyissä luonnonhoidon menetelmissä päästäisiin siis vähintään lähelle tätä tasoa. Säästöpuiden tilavuuden kehitys on kytköksissä suoraan hakkuiden määrään, jolloin Taso70:n ratkaisussa säästöpuita kertyi 50 vuodessa keskimäärin noin 15 % vähemmän kuin TasoSY:n vastaavissa ratkaisussa. Lisääntyvistä hakkuista seuraavilla suuremmilla säästöpuumäärillä ei kuitenkaan voida kompensoida hakkuissa tuhoutuvia, monimuotoisuudelle arvokkaita ja mahdollisesti vaateliaan lajiston leviämislähteinä toimivia metsiä eikä tälle lajistolle välttämättömiä, hakkuissa hävitettyjä rakennepiirteitä. Esimerkiksi Saariston ym. (2020) tutkimuksessa havaittiin, että järeästä, ennen hakkuuta metsissä olevasta arvokkaasta elävästä lehtipuustosta – suuriläpimittaisista haavoista, raidoista (*Salix caprea* L.) ja muista lehtipuista – hävisi hakkuissa noin 90 % ja eläviksi säästöpuiksi oli jätetty näiden sijaan pääasiassa pieniläpimittaisempaa koivua ja mäntyä. Näiden kohteiden vanhoihin, eläviin puihin liittyvien monimuotoisuusarvojen voidaan siis katsoa vähentyneen 90 % samalla kun säästöpuiden määrä lisääntyi.

Vanhojen (Etelä-Suomi yli 120 v. ja Pohjois-Suomi yli 160 v.) metsämaan metsien pinta-ala lisääntyi 50 vuoden kuluessa Taso70:n hakkuilla perusluonnonhoidossa 0,83 milj. ja tehostetun luonnonhoidon ratkaisussa 0,91 milj. hehtaaria. TLH-ratkaisussa lisäsuojelu tuotti 50 vuodessa Etelä-Suomen suojelualueille noin 0,23 milj. hehtaaria ja Pohjois-Suomen suojelualueille noin 0,21 milj. hehtaaria enemmän vanhoja metsiä kuin mitä suojelualueille muodostui samassa ajassa perusluonnonhoidossa, jossa suojelualueiden pinta-ala pysyi ennallaan. Vanhojen metsien pinta-ala kasvoi Taso70-laskelmissa myös puuntuotannon metsämaalla, sillä puuston tihentymisen ja järeytymisen seurauksena hakkuut kohdistuivat nykyistä enemmän kasvatusikäisiin metsiin painottuen harvennushakkuisiin. Osaksi lisäsuojelun aiheuttaman vähennyksen seurauksena vanhojen metsien määrä lisääntyi puuntuotannon metsämaalla perusluonnonhoidolla Etelä-Suomessa 0,17 milj. ja Pohjois-Suomessa 0,19 milj. hehtaaria tehostetun luonnonhoidon mallia enemmän. Myös suurimman ylläpidettävän hakkuutason (TasoSY) laskelmissa vanhojen metsien pinta-ala kasvoi 50 vuodessa: perusluonnonhoidossa noin 0,35 milj. ja tehostetussa luonnonhoidossa lähes 0,6 milj. hehtaaria. Tehostettu luonnonhoito lisäsi vanhojen metsien määrää 50 vuodessa perusluonnonhoitoon verrattuna noin 0,25 milj. hehtaaria enemmän. Suojelualueilla ero oli 0,44 milj. hehtaaria, mutta toisaalta suojeluun siirtyneen alan seurauksena tehostettu luonnonhoito supisti puuntuotannon metsämaalla perusluonnonhoitoon verrattuna vanhojen metsien alaa 0,20 milj. hehtaaria hakkuiden kohdistuessa vähentyneeseen puuvarantoon.

Vanhojen metsien sekä vanhojen ja kookkaiden puiden väheneminen on yksi taantumisen syy kolmasosalle uhanalaisista ja silmälläpidettävistä metsälajeista (542 lajille 1587 lajista) ja yhtenä tulevaisuudessa vaikuttavana uhkatekijänä 34 %:lle näistä lajeista (Hyvärinen ym. 2019). Luontotyyppejen uhanalaisuusarvioinnissa (Kouki ym. 2018) korostettiin olemassa olevien vanhojen metsien ja vanhoja puuyksilöitä sisältävien metsien säästämistä, koska niiden palauttamiseen ei ole nopeita luonnonhoidollisia keinoja. Skenaariolaskelmien mukainen vanhojen metsien pinta-alan lisääntyminen sekä suojelualueilla että puuntuotannon metsämaalla parantaisi selvästi vanhojen metsien ja vanhojen puiden lajiston tilannetta. Lisäsuojelu on välittömänä toimenä monimuotoisuuden turvaamisen kannalta merkittävä, sillä sen avulla pystytään vaikuttamaan uhanalaisimpaan osaan metsäluontoamme. Monimuotoisuuden turvaamisen näkökulmasta suojeltujen metsien tarve kasvaa, mitä intensiivisemmin metsiä puuntuotannollisesti hyödynnetään.

Vanhoissa metsissä on myös enemmän kuollutta puuta, ja lahoppuun väheneminen on yksi taantumisen syy kolmasosalle uhanalaisista ja silmälläpidettävistä metsälajeista (523 lajille 1587 lajista) ja yhtenä tulevaisuudessa vaikuttavana uhkatekijänä 34 %:lle näistä lajeista (Hyvärinen ym. 2019). Kuolleen puuston kehityksen arviointi perustui tässä tutkimuksessa MELA-ohjelmiston tuottamaan luonnonpoistumaan. Luvuissa ei ole mukana hakkuiden yhteydessä kaadettua ja metsään jäänyttä/jätettyä runkopuuta, oksapuuta tai kantoja, eikä mallinnuksessa voitu huomioida satunnaisten laajojen luontaisten häiriöiden, kuten myrskyjen tuottamaa kuollutta puuta.

Kuollutta puuta syntyi 50 vuoden kuluessa puuntuotannossa ja suojellussa olevalle metsämaalle laskelmasta riippuen 18,2–23,1 m³ hehtaarille, josta rinnankorkeudelta yli 10 cm:n puita oli 13,6–18,0 m³ ja yli 30 cm:n puita 1,6–2,6 m³. Kuolleen puun kokonaiskertymä metsämaalla oli Taso70-ratkaisun perusluonnonhoidossa 3,1 m³ ja tehostetussa luonnonhoidossa 2,0 m³ suurempi kuin TasoSY:n vastaavissa ratkaisuissa. Tehostettu luonnonhoito lisäsi kuollutta puuta perusluonnonhoitoon nähden 2–3,1 m³ hehtaarilla. Em. luvuissa ei ole mukana lahoamista eikä hakkuiden ja maanmuokkauksen yhteydessä tapahtuvaa kuolleen, maahan kaatuneen puun tuhoutumista. Kun ne otettiin huomioon, niin rinnankorkeudelta yli 10 cm:n puista lahoppuuta kertyi 50 vuodessa Taso70:n PLH-ratkaisussa 11,5, TLH-ratkaisussa 12,7 ja TasoSY:n PLH-ratkaisussa 8,9 ja TLH-ratkaisussa 9,7 m³ hehtaarille. Näissä luvuissa ei ole otettu huomioon mahdollisia eroja luonnonhoitomallien välillä maahan kaatuneen kuolleen puun tuhoutumisasteissa.

Valtakunnan metsien 12. inventoinnin mukaan yli 10 cm:n läpimitan omaavan lahoppuun määrä metsämaalla oli koko Suomessa keskimäärin 5,8, Etelä-Suomessa 4,5 ja Pohjois-Suomessa 7,5 m³ hehtaarilla (Korhonen ym. 2021), joten laskelmatulosten perusteella lahoppuuston määrä nykytilanteeseen verrattuna lisääntyisi laskelmasta riippumatta. VMI:ssä kyse on yli 10 cm:n läpimitaisesta lahoppuusta, mutta näissä laskelmissa rinnankorkeusläpimitaltaan yli 10,5 cm puiden koko rungon tilavuudesta, mikä tuottaa hieman korkeampia lahoppuun tilavuuksia. MELA-ohjelmistolla saatu luonnonpoistuman arvio 50 vuoden jaksolla oli keskimäärin 7,7–9,7 milj. m³ vuodessa ja kuolleen puun hehtaarikohtainen määrä vastaavasti keskimäärin 0,34–0,43 m³ vuodessa. Tämä luonnonpoistuman MELA-arvio on suurempi kuin VMI:n pysyvien koealojen aineistosta laskettu toteutunut luonnonpoistuma: VMI9–10:n pysyvien koealojen aineistosta laskettu luonnonpoistuman määrä oli koko metsä- ja kitumaalla 5,3 milj. m³ v⁻¹ (0,23 m³ ha⁻¹ v⁻¹) ja metsään jääneen luonnonpoistuman määrä 4,7 milj. m³ v⁻¹ (0,21 m³ ha⁻¹ v⁻¹) talouskäyttöön otetun luonnonpoistuman määrä ollessa näin 0,6 milj. m³ v⁻¹ (Ihalainen 2013). VMI11–12 välissä kuolleisuus oli vastaavasti 7,0 milj. m³ v⁻¹, josta 6,1 milj. m³ v⁻¹ (0,26 m³ ha⁻¹ v⁻¹) jäi metsään (Korhonen ym. 2021). Tämän raportin laskelmissa luonnonpoistuma oletettiin jätettävän kokonaisuudessaan metsään sekä perusluonnonhoidon (PLH) että tehostetun luonnonhoidon (TLH) käsittelyissä. Laskelmatulokset yliarvioivat tässä suhteessa luonnonpoistuman ja sen mukaisesti lasketun lahoppuun kehityksen. Laskelmat osoittavat kuitenkin, että lahoppuun määrää voidaan kasvattaa erityisesti välttämällä kuolleen puun tuhoutumista ja korjuuta hakkuiden yhteydessä.

Taloustmetsien kuolleen puun määrän kasvattamiseksi tarvitaan kuitenkin selkeä tason nosto nykyisin käytössä olevissa luonnonhoidon keinoissa (Korhonen ym. 2016, 2020). Valtakunnan metsien inventoinneissa on seurattu kuolleen puun määrän kehitystä 2000-luvun alusta lähtien (VMI9), ja VMI12-tulosjulkaisun mukaan kuolleen puun määrä ei ole 20 vuoden aikana kasvanut, vaan se on pysynyt ennallaan ($5,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) koko maan tasolla (Korhonen ym. 2021). Lisäksi taloustmetsissä (puuntuotannon metsämaalla) kuolleen puun määrä on luonnonhoidon tavoitteista huolimatta laskenut (ks. Korhonen ym. 2021, kuva 39). Taloustmetsien luonnonhoidon laadun seuranta-aineistojen 1995–2018 perusteella luonnonhoidon taso ei suosituksista ja neuvonnasta huolimatta ole 2000-luvun alusta lähtien parantunut, vaan taso oli laskenut 2010-luvulla, ja tarkastelujakson viimeisten viiden vuoden (2014–2018) aikana luonnonhoidon taso oli määrällisissä muuttujissa keskimäärin noin 20 % heikompi kuin mitä se oli 2000-luvulla, ja lähes 30 % heikompi kuin mitä se oli ollut parhaalla viisivuotijaksolla aikavälillä 1998–2009 (Siitonen ym. 2020).

Ekologian teorian ja empiiristen aineistojen mukaan monien metsälajien esiintyminen vaarantuu ja runsaus vähenee selvästi, kun lajeille sopivan elinympäristön määrä vähenee alle 10–20 %:iin luontaisesta määrästä. Kun tätä periaatetta soveltaa kuolleista puista riippuvaiseen lajistoon, lajien esiintyminen vaarantuisi kuolleiden puiden määrän laskiessa taloustmetsissä alle $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mikä on noin kymmenys luonnontilaisesta määrästä (Kuusela ym. 2022). Esittämiemme skenaariolaskelmien toimenpiteillä tämän tason tuntumaan näyttäisi olevan mahdollista päästä. Uhanalaistuneen lahoppulajiston kannalta tämä määrä on kuitenkin liian vähäinen, sillä näiden lajien on havaittu esiintyvän metsiköissä vasta, kun lahoppuun määrä on suuruusluokkaa $20\text{--}40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (esim. Junninen ja Komonen 2011). Taloustmetsissä näin korkeisiin määriin ei todennäköisesti tulla pääsemään, mutta em. $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ määrä voisi kuitenkin riittää estämään uusien lajien uhanalaistumisen. Metsähallitus on asettanut tämän tavoitetason omille tavanomaisille taloustmetsilleen jo vuoden 2004 ympäristöoppaassa (Heinonen ym. 2004).

Puuntuotannon metsämaalla hakkuut määrittelevät pitkälti metsien rakenteen kehitystä. Metsien monimuotoisuuden kannalta tärkeiden rakennepiirteiden kehitys oli TasoSY:n ratkaisussa Taso70:n vastaavia selvästi heikompi. Hakkuutasosta riippumatta tehostetun luonnonhoidon (TLH) malli tuotti taloustmetsissä monimuotoisuudelle merkittäviä rakennepiirteitä enemmän kuin perusluonnonhoidon (PLH) malli. Erityisesti lisäsuojelun merkitys korostui kasvavien hakkuuden skenaariossa: TasoSY:n tehostetun luonnonhoidon ratkaisussa rakennepiirteiden kehitys olikin samalla tasolla kuin Taso70:n perusluonnonhoidon mukaisessa ratkaisussa. Tehostetun luonnonhoidon malli antaisi tämän perusteella mahdollisuuksia runkopuun hakkuumäärien lisäykseen viime vuosikymmenen (2011–2020) aikana keskimäärin toteutuneeseen runkopuun hakkuumäärään ($68 \text{ milj. m}^3 \text{ v}^{-1}$) verrattuna olettaen, että käytetyt puuston kehitysmallit ennustavat puuston kasvua ja kuolemista oikein. Tulos poikkeaa hieman aiemmin esitetyistä arvioista (Kärkkäinen ym. 2021; Kärkkäinen ja Koljonen 2021). Ero selittyy pitkälti sovellettujen skenaariotyökalujen ennakoimasta metsien kehityksen eroista. Puuston tilavuus kasvoi tämän tutkimuksen skenaarioissa selvästi voimakkaammin kuin em. selvityksissä. Toki sovelletuilla luonnonhoitotoimilla ja hakkuumäärien eroilla oli tähän vaikutuksensa. Tässä tutkimuksessa lisäsuojelun määrä oli suurempi, mutta muut tehostetun luonnonhoidon keinot suppeammat: mm. jatkuva kasvatus puuttui tarkastelusta. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että malliperusteiset skenaariolaskelmat ovat aina todellisuuden yksinkertaistuksia, ja monimuotoisuuden kokonaisvaikutusten kannalta erilaisten hakkuutapojen ja toisaalta suojeltavien kohteiden alueellinen suunnittelu ja sijoittuminen on avainasemassa (esim. Eyvindson ym. 2018), mitä ei valtakunnan metsien maastokoelainventointiin pohjautuen kyetty tässä tutkimuksessa tarkastelemaan.

Liitetiedostot

L1.pdf; Säästöpuut PEFC- ja FSC-metsäsertifoinneissa,
L2. pdf; Maakunnittain toteutunut hakkuukertymä puutavaralajeittain vuosina 2015–2017,
L3. pdf; TasoSY:n mukaiset hakkuukertymät puutavaralajeittain keskimäärin vuodessa PLH- ja TLH-luonnonhoidossa vuosina 2015–2064,
L4.1–4.5.pdf; Metsien monimuotoisuudelle keskeisten rakennepiirteiden kehitys vuoteen 2065 mennessä vertailugraafeina, saatavilla osoitteessa <https://doi.org/10.14214/ma.10721>.

Tutkimusdatan avoimuus

Tutkimusaineisto perustuu valtakunnan metsien 12. inventoinnin koeala-aineistoon ja sen käyttöoikeudesta on sovittava Luonnonvarakeskuksen kanssa.

Ohjelmakoodin avoimuus

Kaupallisena tuotteena MELA2016-ohjelmiston lähdekoodi ei ole avoimesti saatavilla. Ohjelmiston ajoversio on kuitenkin korvauksetta mahdollista saada yliopistojen ja korkeakoulujen tutkimuskäyttöön samoin kuin tutkimuksessa käytetyt ajoparametrit.

Kirjoittajien työnjako

Kirjoittajat ovat yhdessä vastanneet tutkimuksen suunnittelusta ja tutkimusraportin laatimisesta. Salminen on tehnyt tutkimuksen MELA-laskelmat ja toiminut artikkelin pääkirjoittajana.

Kiitokset

Kiitokset erityisesti Kari T. Korhoselle arvokkaasta panoksesta työn alkuvaiheessa. Lisäksi kiitämme hankkeen rahoittajia ja käsikirjoituksen korjausehdotuksista kahta anonyymia tarkastajaa ja päätoimittaja Teppo Hujalaa.

Rahoitus

Tutkimus on tehty Luonnonvarakeskuksen (Luke) ja Suomen ympäristökeskuksen (Syke) yhteistyönä ja se on osa Metsäteollisuus ry:n metsäympäristöohjelmaa vuosille 2016–2020. Tutkimusta ovat rahoittaneet Metsäteollisuus ry:n jäsenyrityksistä Stora Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj, Harvestia Oy, Kuhmo Oy, Pölkky Oy, Tornator Oyj, Metsäliitto Osuuskunta, Kotkamills Wood Oy, Versowood Oy ja Vapo.

Lähteet

- Anttila P, Nivala V, Salminen O, Hurskainen M, Kärki J, Lindroos TJ, Asikainen A (2018) Regional balance of forest chip supply and demand in Finland in 2030. *Silva Fenn* 52, article id 9902. <https://doi.org/10.14214/sf.9902>.
- Auvinen A-P, Hildén M, Toivonen H, Primmer E, Niemelä J, Aapala K, Bäck S, Härmä P, Ikävalko J, Järvenpää E, Kaipiainen H, Korhonen KT, Kumela H, Kärkkäinen L, Lankoski J, Laukkanen M, Mannerkoski I, Nuutinen T, Nöjd A, Punntila P, Salminen O, Söderman G, Törmä M, Virkkala R (2007) Evaluation of the Finnish national biodiversity action plan 1997–2005. *Monographs of the Boreal Environment Research* 29: 1–54. <http://hdl.handle.net/10138/39337>.
- Euroopan komissio (2020) Vuoteen 2030 ulottuva EU:n biodiversiteettistrategia. Luonto takaisin osaksi elämäämme. Komissio tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. COM(2020) 380 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/AUTO/?uri=celex:52020DC0380>.
- Eyvindson K, Repo A, Mönkkönen M (2018) Mitigating forest biodiversity and ecosystem service losses in the era of bio-based economy. *Forest Policy Econ* 92: 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.04.009>.
- Hautala H, Jalonen J, Laaka-Lindberg S, Vanha-Majamaa I (2004) Impacts of retention felling on coarse woody debris (CWD) in mature boreal spruce forests in Finland. *Biodivers Conserv* 13: 1541–1554. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000021327.43783.a9>.
- Hardenbol AA, Junninen K, Kouki J (2020) A key tree species for forest biodiversity, European aspen (*Populus tremula*), is rapidly declining in boreal old-growth forest reserves. *For Ecol Manag* 462, article id 118009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118009>.
- Heinonen P, Karjalainen H, Kaukonen M, Kuokkanen P (toim) (2004) Metsätalouden ympäristöopas. Metsähallitus.
- Helmisaari H.-S, Hanssen KH, Jacobson S, Kukkola M, Luiro J, Saarsalmi A, Tamminen P, Tveite B (2011) Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: long-term impact on tree growth. *For Ecol Manag* 261: 1919–1927. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.015>.
- Henttonen HM, Nöjd P, Suvanto S, Heikkinen J, Mäkinen H (2019). Large trees have increased greatly in Finland during 1921–2013, but recent observations on old trees tell a different story. *Ecol Indic* 99: 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.015>.
- Hirvelä H, Härkönen K, Lempinen R, Salminen O (2017) MELA2016 Reference manual. *Natural resources and bioeconomy studies* 7/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>.
- Hirvelä H, Härkönen K, Salminen O, Eyvindson K, Lempinen R (2023) Suomen metsien hakuumahdollisuudet vuosina 2016–2045 valtakunnan metsien 12. inventointiin perustuen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 21/2023. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-634-4>.
- Hynynen J, Ojansuu R, Hökkä H, Salminen H, Siipilehto J, Haapala P (2002) Models for predicting the stand development – description of biological processes in MELA system. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1815-X>.
- Hyvärinen E, Juslén A, Kempainen E, Uddström A, Liukko U-M (toim) (2019) Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus, Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/299499>.
- Hänninen H, Koskela T, Kurttila M (2008) Finnish family forest owners’ retention tree management behaviour. *Julkaisussa: Bergseng E, Delbeck G, Hoen HF (toim) Scandinavian Forest Economics* 42: Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics, Lom, Norway, 6th–9th April 2008, Ås. s. 344–360. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.199196>.
- Hänninen H, Kurttila M, Koskela T (2010) Miten säästöpuut säilyvät uudistusaloilla? *Julkaisussa: Koskela T, Hänninen R, Ovaskainen V (toim) Metsien monimuotoisuuden turvaamisen keinot*

- ja yhteiskunnalliset vaikutukset (TUK) -tutkimusohjelman loppuraportti. Metlan työraportteja 158: 35–38. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2236-4>.
- Ihalainen A (2013) Metsähukkapuu ja luonnonpoistuma poistumatilastoissa. Metsätieteen aikakauskirja 3/2013: 609–623. <https://doi.org/10.14214/ma.6026>.
- Ihalainen A, Ahola A (2003) Pyry- ja Janika-myrskyjen aiheuttamat puuston tuhot. Metsätieteen aikakauskirja 3/2003: 385–401. <https://doi.org/10.14214/ma.6803>.
- Ihalainen A, Mäkelä H (2009) Kuolleen puuston määrä Etelä- ja Pohjois-Suomessa 2004–2007. Metsätieteen aikakauskirja 1/2009: 35–56. <https://doi.org/10.14214/ma.5834>.
- Jacobson S, Kukkola M (1999) Skogsbränsleuttag i gallring ger kännbara tillväxtförluster. Skog-Forsk 13/1999. https://www.skogforsk.se/cd_20190114162455/contentassets/ec7fe4d257174b-39be11e47a93c67e84/jacobson_resultat-13-1999.pdf.
- Junninen K (toim) (2012) Haapametsien käävät. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 199. <https://julkaisut.metsa.fi/assets/pdf/lp/Asarja/a199.pdf>. ISBN 978-952-446-942-5.
- Junninen K, Komonen A (2011) Conservation ecology of boreal polypores: a review. Biol Conserv 144: 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.07.010>.
- Keto-Tokoi P (2018) Tutkimustietoon perustuvia suosituksia vastuullisen metsänhoidon kehittämiseksi. WWF Suomen raportteja 37. https://wwf.fi/app/uploads/v/p/l/luhifazfb7hhjzxr-rh5e6sh/wwf_metsanhoitoraportti_web.pdf. ISBN 978-952-5242-46-1.
- Keto-Tokoi P, Koivula M, Kuuluvainen T, Lindberg H, Punttila P, Shorohova E, Vanha-Majamaa I (2021) Säästöpuumetsätaloudella monimuotoisuutta talousmetsiin. Metsätieteen aikakauskirja, artikkelitunnus 10541. <https://doi.org/10.14214/ma.10541>.
- Koistinen A, Luiro J-P, Vanhatalo K (toim) (2016) Metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen, työopas. Tapion julkaisuja. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/10/Metsanhoiton-suositukset-energiapuun-korjuuseen-Tapio-20191230.pdf>. ISBN 978-952-5632-81-1.
- Koivula M, Louhi P, Miettinen J, Nieminen M, Piirainen S, Punttila P, Siitonen J (2022) Talousmetsien luonnonhoidon ekologisten vaikutusten synteesi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 60/2022. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-472-2>.
- Korhonen KT, Auvinen A-P, Kuusela S, Punttila P, Salminen O, Siitonen J, Ahlroth P, Jäppinen J-P, Kolström T (2016) Biotalouskenaarioiden mukaisten hakkuiden vaikutukset metsien monimuotoisuudelle tärkeisiin rakennepiirteisiin. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2016. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-294-2>.
- Korhonen KT, Ihalainen A, Kuusela S, Punttila P, Salminen O, Syrjänen K (2020) Metsien monimuotoisuudelle merkittävien rakennepiirteiden muutokset Suomessa vuosina 1980–2015. Metsätieteen aikakauskirja, artikkelitunnus 10198. <https://doi.org/10.14214/ma.10198>.
- Korhonen KT, Ahola A, Heikkinen J, Henttonen HM, Hotanen J-P, Ihalainen A, Melin M, Pitkänen J, Rätty M, Sirviö M, Strandström M (2021) Forests of Finland 2014–2018 and their development 1921–2018. Silva Fenn 55, article id 10662. <https://doi.org/10.14214/sf.10662>.
- Kouki J, Arnold K, Martikainen P (2004) Long-term persistence of aspen – a key host for many threatened species – is endangered in old-growth conservation areas in Finland. J Nat Conserv 12: 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2003.08.002>.
- Kouki J, Junninen K, Mäkelä K, Hokkanen M, Aakala T, Hallikainen V, Korhonen KT, Kuuluvainen T, Loiskekoski M, Mattila O, Matveinen K, Punttila P, Ruokanen I, Valkonen S, Virkkala R (2018) Metsät. Julkaisussa: Kontula T, Raunio A (toim) Suomen luontotyyppeiden uhanalaisuus 2018. Luontotyyppeiden punainen kirja. Osa 1 - tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018: 171–201. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4816-3>.
- Kurttila M, Hänninen H (2006) Metsänomistajien tiedot monimuotoisuudesta ja säästöpuustosta. Julkaisussa: Horne P, Koskela T, Kuusinen M, Otsamo A, Syrjänen K (toim) METSO:n jäljillä

- Etelä-Suomen metsien monimuotoisuusohjelman tutkimusraportti. Maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, Metsätutkimuslaitos ja Suomen ympäristökeskus, s. 224–228. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021100649457>.
- Kuuluvainen T, Lindberg H, Vanha-Majamaa I, Keto Tokoi P, Punttila P (2019) Low-level retention forestry, certification, and biodiversity: case Finland. *Ecol Process* 8, article id 47. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0198-0>.
- Kuusela S, Ahlroth P, Keränen I, Mikkonen N, Punttila P, Romppanen S, Soimakallio S, Syrjänen K (2022) Biodiversiteetti-integraatio LULUCF-asetuksessa. <http://hdl.handle.net/10138/347474>. ISBN 978-952-11-5472-0.
- Kärkkäinen L, Koljonen S (toim) (2021) Arvio EU:n biodiversiteettistrategian 2030 vaikutuksista Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 75/2021. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-298-8>.
- Kärkkäinen L, Hynynen J, Rätty M, Horne P, Juutinen A, Korhonen KT, Koskela T, Miettinen J, Maidell M, Miina J, Määttä K, Otsamo A, Punttila P, Svensberg M, Syrjänen K (2021) Kustannusvaikuttavat keinot metsäluonnon monimuotoisuuden köyhtymisen pysäyttämiseksi. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:21. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-217-6>.
- Lappi J (1992) JLP: a linear programming package for management planning. Finnish Forest Research Institute Research Papers 414. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1218-6>.
- Latva-Karjanmaa T, Penttilä R, Siitonen J (2007) The demographic structure of European aspen (*Populus tremula*) populations in managed and old-growth boreal forests in eastern Finland. *Can J For Res* 37: 1070–1081. <https://doi.org/10.1139/X06-289>.
- Lehtonen A, Salminen O, Kallio M, Tuomainen T, Sievänen R (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. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-264-5>.
- Luonnonvarakeskus (2021a) Hakkuukertymä ja puuston poistuma alueittain. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma>. Viitattu 16.11.2021.
- Luonnonvarakeskus (2021b) Alueelliset hakkuumahdollisuusarviot. Saantitapa: <http://www.luke.fi/MELA-metsalaskelmat>. Viitattu 16.11.2021.
- Luonnonvarakeskus (2021c) Puuston vuotuinen kasvu metsä- ja kitumaalla. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsavarat>. Viitattu 16.11.2021.
- Luonnonvarakeskus (2021d) Metsähakkeen kokonaiskäyttö maakunnittain. Saantitapa: <https://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>. Viitattu 16.11.2021.
- Luonnonvarakeskus (2021e) Kuolleen puuston keskitilavuus metsämaalla (m³ ha⁻¹). Saantitapa: <https://stat.luke.fi/metsavarat>. Viitattu 16.11.2021.
- Mikkonen N, Leikola N, Lahtinen A, Lehtomäki J, Halme P (2018) Monimuotoisuudelle tärkeät metsäalueet Suomessa – Puustoisten elinympäristöjen monimuotoisuusarvojen Zonation-analyyysien loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 9/2018. <http://hdl.handle.net/10138/234359>.
- Mäkinen H, Hynynen J, Siitonen J, Sievänen R. (2006) Predicting the decomposition of Scots pine, Norway spruce, and birch stems in Finland. *Ecol Appl* 16: 1865–1879. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1865:PTDOSP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1865:PTDOSP]2.0.CO;2).
- National Forestry Accounting Plan for Finland (2019) Submission of updated National Forestry Accounting Plan including forest reference level (2021–2025) for Finland (20 December 2019). Ministry of Agriculture and Forestry, Natural Resources Institute Finland. <https://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Suomen+vertailutasoraportti/96423a2c-c70d-3daa-ef7f-b867b321600a>.

- Nuutinen T, Salminen O (1999) Hakkuumahdollisuusarviot. Julkaisussa: Reunala A, Halko L, Marila M (toim) Kansallinen metsäohjelma 2010 - taustaraportti. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 6/1999: 124–131. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-53-2023-2>.
- Palviainen M, Finér L (2012) Estimation of nutrient removals in stem-only and whole-tree harvesting of Scots pine, Norway spruce, and birch stands with generalized nutrient equations. *Eur J For Res* 131: 945–964. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0567-4>.
- Pykälä J (2019) Avainbiotooppien merkitys epifyyttijäkälille. *Metsätieteen aikakauskirja*, artikkelitunnus10170. <https://doi.org/10.14214/ma.10170>.
- Rassi P, Hyvärinen E, Juslén A, Mannerkoski I (toim) (2010) Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2010. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus, Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/299499>.
- Roberge J-M, Lämås T, Lundmark T, Ranius T, Felton A, Nordin A (2015) Relative contributions of set-asides and tree retention to the long-term availability of key forest biodiversity structures at the landscape scale. *J Environ Manage* 154: 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.040>.
- Saaristo L, Korhonen KT, Laitinen J, Partanen J, Pasanen H, Punttila P, Siitonen J (2020) Kustannustehokas luonnonhoidon laadun seurantatiedon kerääminen. Tapio Oy. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/01/Kustannustehokas-luonnonhoidon-laadun-seurantatiedon-kerääminen.pdf>.
- Salomäki M (2005) Säästöpuut Isojoen Sahan avohakkuualueilla 2000–2004. Pro gradu -tutkielma, Joensuun yliopisto.
- Salminen O, Hirvelä H (2008) MELA-vaihtoehtolaskelmat Kansallisen metsäohjelman 2015 valmistelua varten. Julkaisussa: Uusivuori J, Kallio M, Salminen O (toim) Vaihtoehtolaskelmat kansallisen metsäohjelman 2015 valmistelua varten. *Metlan työraportteja* 75. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2089-6>.
- Samuelson PA (1976) Economics of forestry in an evolving society. *Econ Inq* 14: 466–492. <https://doi.org/10.1111/j.1465-7295.1976.tb00437.x>.
- Siitonen J, Punttila P, Korhonen KT, Heikkinen J, Laitinen J, Partanen J, Pasanen H, Saaristo L (2020) Talousmetsien luonnonhoidon kehitys vuosina 1995–2018 luonnonhoidon laadun arvioinnin sekä valtakunnan metsien inventoinnin tulosten perusteella. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 69/2020. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-056-4>.
- Siitonen M (1983) A long term forestry planning system based on data from the Finnish national forest inventory. Julkaisussa: Kuusela K, Nyyssönen A (toim.) *Forest inventory for improved management. Proceedings of the IUFRO Subject group 4.02 meeting in Finland, September 5–9, 1983. Research notes* 17. University of Helsinki, Department of Forest mensuration and management, s. 195–207.
- Siitonen M, Härkönen K, Hirvelä H, Jämsä J, Kilpeläinen H, Salminen O, Teuri M (1996) MELA handbook 1996 edition. Finnish Forest Research Institute Research Papers 622. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1543-6>.
- Suomen FSC-yhdistys (2011) Suomen FSC-standardi. FSC standard for Finland V1-1. Hyväksytty 21.01.2011 FIN. <https://fi.fsc.org/sites/default/files/2021-04/Suomen%20FSC%20standardi%2012%2005%202011.pdf>.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2011) Report of the technical assessment of the forest management reference level submission of Finland submitted in 2011. FCCC/TAR/2011/FIN. <https://unfccc.int/resource/docs/2011/tar/fin01.pdf>.
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11) (2013) Maastotyön ohjeet 2013. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Metsäntutkimuslaitos. Moniste.
- Valtakunnan metsien 12. inventointi (VMI12) (2017) Maastotyön ohjeet 2017. Koko Suomi ml.

Ahvenanmaa. Luonnonvarakeskus. Moniste.

- Valtioneuvoston periaatepäätös (2014) Etelä-Suomen metsien monimuotoisuuden toimintaohjelman jatkamisesta 2014–2025. Valtioneuvosto. https://metsonpolku.fi/documents/115183005/124140911/METSO_periaatep%C3%A4%C3%A4t%C3%B6sSuomi_valmis_05062014.pdf/83cfb551-c160-e107-75ff-c663ba4c1bf8/METSO_periaatep%C3%A4%C3%A4t%C3%B6sSuomi_valmis_05062014.pdf?t=1655807546172.
- Valtioneuvoston periaatepäätös (2015) Kansallinen metsästrategia 2025. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 6/2015. <https://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Kansallinen+mets%C3%A4strategia+2025/c8454e55-b45c-4b8b-a010-065b38a22423>. ISBN 978-952-453-908-1.
- Viiri H, Ahola A, Ihalainen A, Korhonen KT, Muinonen E, Parikka H, Pitkänen J (2011) Kesän 2010 myrskytuhot ja niistä seuraava hyönteistuhoriski. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2011: 221–225. <https://doi.org/10.14214/ma.6559>.
- Virkkala R, Kuusela S, Määttänen A-M, Leikola N, Heikkinen R, Kontula T, Junttila V, Syrjänen K, Kartano L, Punttila P (2022) Metsät. Julkaisussa: Kuusela S, Annala M, Kontula T, Leikola N, Määttänen A-M, Virkkala R, Virtanen E (toim) Kohti kattavaa suojelualueverkostoa. Luonnon monimuotoisuuden turvaamisen painopisteet Suomessa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 18/2022. <http://hdl.handle.net/10138/344399>.
- Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Vanhatalo K, Väisänen P (toim.) (2014) Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-6612-32-4.

67 viitettä.