



Paula Jylhä¹, Saija Huuskonen², Anssi Ahtikoski³, Jyrki Hytönen ja Lasse Aro⁴

Mänty, kuusi, raudus- ja hieskoivu kivennäismaa- ja turvepeltojen metsityksessä – puuntuotos, hiilensidonta ja yksityistaloudellinen kannattavuus

Jylhä P., Huuskonen S., Ahtikoski A., Hytönen J., Aro L. (2024). Mänty, kuusi, raudus- ja hieskoivu kivennäismaa- ja turvepeltojen metsityksessä – puuntuotos, hiilensidonta ja yksityistaloudellinen kannattavuus. Metsätieteen aikakauskirja 2024-24001. Tutkimusartikkeli. 26 s. <https://doi.org/10.14214/ma.24001>

Tiivistelmä

Peltojen metsitystä alettiin tukea Suomessa 1970-luvun alussa, jolloin tavoitteena oli vähentää maataloustuotantoa. Vuosina 2021–2023 voimassa olleella metsitystukilainsäädännöllä edistettiin hiilensidontaa metsittämällä maataloustuotannosta jo poistuneita peltoja ja muita joutoalueita. Tutkimuksessa selvitettiin puuntuotosta, metsityksen kannattavuutta ja hiilensidontaa männyllä ja kuusella sekä raudus- ja hieskoivulla 1990-luvun alussa perustetuilta, onnistuneiksi arvioituilta pellonmetsityskokeilta kerätyn aineiston avulla. 29–30-vuotiaina mitattujen puustojen jatkokehitystä ennustettiin Motti-ohjelmistolla, ja kannattavuuden mittarina käytettiin paljaan maan arvoa (PMA). Kuusella mitattiin suurin puuntuotos. Sen keskimääräinen vuotuinen tilavuuskasvu oli kivennäismaalla $9,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja turvemaalla $7,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Männyllä vastaavat tuotokset olivat $7,6$ ja $7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; rauduskoivulla $8,1$ ja $7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja hieskoivulla $6,7$ ja $7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. PMA oli kuusella ilman metsitystukea 3 %:n korkokannalla kivennäismailla noin $2\,500 \text{ € ha}^{-1}$ ja turvemailla $1\,300 \text{ € ha}^{-1}$. Metsitys oli muilla puulajeilla pääsääntöisesti kannattamatonta ilman tukea. Joutoalueiden metsitystuki olisi nostanut edellä mainitut PMA:t kuusella kivennäismailla 2-kertaiseksi ja turvemailla 2,3-kertaiseksi, ja myös rauduskoivun kasvatuksesta kivennäismailla olisi tullut kannattavaa. Hiilidioksiditonni olisi turvemailla kiertoaikana saatu kuusella sidotuksi $3,4 \text{ €:n}$ metsitystuella (laskentakorko 3 %). Kivennäismailla metsitystuen käyttö olisi ollut kuusella ja rauduskoivulla yhtä tehokasta (tuki n. $3,7 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2^{-1}$). Männyllä metsitystukea olisi jouduttu käyttämään sidottua hiilidioksiditonnia kohden noin 30 % enemmän kuin kuusella sekä kivennäis- että turvemailla. Korkean puuntuotoksen, kannattavuuden ja tehokkaan hiilensidontan perusteella pellot kannattaisi metsittää kuusella, elleivät maan ominaisuudet tai maisematekijät rajoita puulajivalintaa.

Asiasanat biomassatuotos; hiilensidonta; kannattavuus; paljaan maan arvo; pellonmetsitys; puuntuotos

Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Tuotantojärjestelmät, Kokkola; ²Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Helsinki; ³Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Tampere, ⁴Luonnonvarakeskus (Luke), Biotalous ja ympäristö, Turku

Sähköposti paula.jylha@luke.fi

Hyväksytty 3.10.2024

1 Johdanto

Suomessa käynnistettiin laajamittainen tuettu pellonmetsitys 1960 ja -70-lukujen vaihteessa maataloustuotannon vähentämiseksi (Laki pellon käytön rajoittamisesta 216/1969). Vuodesta 1995 alkaen Euroopan unionin maatalouspolitiikka on ohjannut viljelysmaan käyttöä. Pellonmetsitystä perusteltiin 1990-luvulla maatalouden ylituotannon ohella puuntuotannon lisäämisellä ja ilmastomuutoksen hillitsemisellä (ETY 2080/1992). 2000-luvulla pellonmetsitykset nähtiin myös keinona edistää luonnon monimuotoisuutta (EY 1698/2005). Vuosina 1969–2014 Suomessa metsitettiin yhteensä lähes 270 000 peltohehtaaria (Luonnonvarakeskus 2023).

Maankäyttösektorista (LULUCF) tuli Suomessa ensimmäistä kertaa kasvihuonekaasupäästöjen lähde vuonna 2021. Maatalousmaa oli suurin maankäyttösektorin päästölähde 68 %:n osuudella (Luonnonvarakeskus 2022). Maatalouskäytöstä poistettujen peltojen ja muiden joutoalueiden, lähinnä turvetuotannosta vapautuneiden suonpohjien, metsittämistä alettiin tukea valtion varoista vuonna 2021 (Laki metsityksen määräämisestä tukemisesta 1114/2020). Metsitystuen tavoitteena oli lisätä metsäpinta-alaa ja hiilinieluja sekä vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä. Erityisesti turvepeltojen metsitystä on pidetty tärkeänä suurten kasvihuonekaasupäästöjen vuoksi (HE 150/2020). Metsitystuella valmisteltiin jatkoa, mutta se jätettiin pois viimeisimmästä hallitusohjelmasta osana valtion menojen säästöohjelmaa (Valtioneuvosto 2023).

Vuonna 2020 maatalouskäytöstä poistuneiden peltojen pinta-alaksi arvioitiin noin 88 000 ha, josta turvemaan osuus oli 22 000 ha (Isoniemi 2020). Lisäksi osa pelloista on laajaperäisessä viljelyssä, jossa käytetään vähän tuotantopanoksia eikä tähdätä suuriin satoihin. Kekkonen ym. (2019) arvioivat, että tällaisessa käytössä oli vuonna 2016 noin 242 000 ha turvepeltoja, joista suurin osa (73 %) oli paksuturpeisia (turvekerroksen paksuus vähintään 60 cm). He pitivät vettämistä tehokkaimpana keinona hillitä paksuturpeisten peltojen kasvihuonekaasupäästöjä, mutta se ei sovi maaston korkeussuhteiden vuoksi kaikille alueille. Kasvihuonekaasutaseen perusteella ohutturpeiset pellot sopisivat parhaiten metsitettäväksi (Kekkonen ym. 2019).

Peltoja metsitettiin 1970- ja 1980-luvuilla enimmäkseen männyllä (Hynönen ja Hytönen 1998), mutta kuusesta on myöhemmin tullut valtalaji. Sen osuus on 2000-luvulla ollut 69–73 % metsityspinta-alasta. Koivun osuus on vaihdellut 20 %:n ja 30 %:n välillä (Luonnonvarakeskus 2023). Pellonmetsitys on riskialttiimpaa kuin normaali metsänuudistaminen. Sen ongelmia ovat pintakasvillisuuden aiheuttama voimakas kilpailu, suuri tuhoriski ja ravinteiden epätasapaino (Hynönen ja Hytönen 1998). Sarkaojien tukkeuduttua myös maan liiallinen kosteus voi heikentää metsitystulosta (Kinnunen 1995; Wall 2005). Männyn, kuusen ja rauduskoivun taimet ovat menestyneet turvemaapelloilla huomattavasti heikommin kuin kivennäismaapelloilla (Valtanen 1991; Rossi ym. 1993; Kinnunen ja Aro 1996; Hynönen 1997; Hynönen ja Saksa 1997; Hytönen 1999; Hynönen 2000). Hynönen (2000) arvioi kasvatuskelpoisten taimien lukumäärän perusteella, että pellonmetsitys oli epäonnistunut Itä-Suomessa turvemailla männyllä kahdessa kolmasosassa ja kuusella joka kolmannessa tapauksessa. Kivennäismailla joka kolmas metsitys männyllä ja joka kymmenes kuusella oli epäonnistunut. Rauduskoivulla enimmillään joka toinen metsitys oli epäonnistunut. Keski-Pohjanmaalla tehdyssä inventoinnissa (Hytönen 1999) puulajien menestymisestä on saatu samansuuntaisia tuloksia.

Pellonmetsityskohteilla tuotetun puun teknistä laatua pidetään heikkona. Peltomailla kasvanut rauduskoivu on osoittautunut heikkolaatuisemmaksi kuin metsämaalla kasvanut (Niemistö ym. 1997; Niemistö ja Hallikainen 2021). Päätehakkuukäisen pellolla kasvaneen rauduskoivun tukkivähennys oli Niemistön ja Hallikaisen (2021) tutkimuksessa 38–80 % puun koosta ja harvennustavasta riippuen. Hytösen ym. (2013) tutkimuksessa yli 90 %:lla pelloilla kasvaneista raudus- ja hieskoivuista oli ulkoisia laatuviikoja. Hynösen (2000) tutkimuksessa Itä-Suomen peltokuusikoissa viallisten runkojen osuus (30–50 %) oli pienempi kuin männiköissä ja koivikoissa (60–80 ja 60 %),

ja turvemaapelloille istutetuissa puissa vikoja oli hieman enemmän kuin kivennäismaapelloille istutetuissa.

Aarnio ja Rantala (1994) sekä Niskanen (1999) arvioivat rauduskoivun yksityistaloudellisesti kannattavimmaksi puulajiksi pellonmetsityksessä. Aarnion ja Rantalan (1994) aineistona oli 150 vuosina 1968–1978 istutettua käytännön pellonmetsitystä, joilla puustot olivat mittausajankohtana keskimäärin 17-vuotiaita (vaihteluväli 9–27 v). Kivennäismailla 91 % metsityksistä arvioitiin onnistuneiksi, turvemailla 59 %. Kivennäismaapeltojen metsitys oli selvästi kannattavampaa kuin turvemaiden. Rauduskoivu oli onnistuneissa metsityksissä kannattavin puulaji sekä kivennäis- että turvemailla. Kuusen istutuksen kannattavuus oli lähes yhtä hyvä kuin rauduskoivun, ja männyn kannattavuus oli huonoin suuren epäonnistumisriskin vuoksi. Erityisesti karujen turvepeltojen metsitys oli kannattamatonta suuren taimikuolleisuuden vuoksi, ja kannattavuus heikkeni yleisesti etelästä pohjoiseen mentäessä. Niskasen (1999) tutkimuksessa paljaan maan arvo puuntuotoskyvyltään toisiaan vastaavilla kasvupaikoilla oli rauduskoivulla esimerkiksi kolmen prosentin korkokannalla 21–29 % korkeampi kuin kuusella ja 16–27 % korkeampi kuin männyllä.

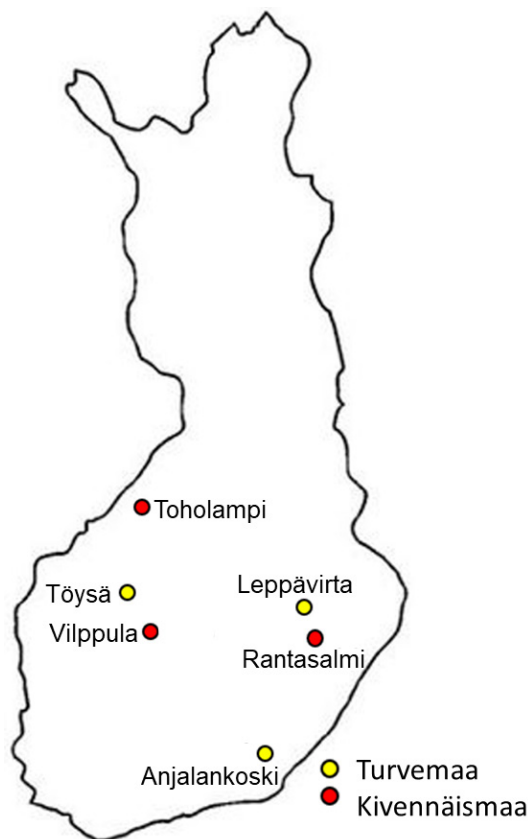
Edellä mainitut metsityksen kannattavuuteen liittyvät tutkimukset perustuvat pääosin lyhyehköihin seuranta-aikoihin. Aarnio ja Rantala (1999) käyttivät koealatasen puustotietoja ja ennustivat hieskoivun tuotoksen männyn kasvumalleilla. Niskasen (1999) tutkimuksen empiirisenä aineistona oli Metsäntutkimuslaitoksen seitsemän vuotta seuratut pellonmetsityskokeet (Ferm ym. 1993), joiden taimikuolleisuusennusteisiin laskelmat perustuivat.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää 29–30 vuotta seurattujen pellonmetsityskokeiden perusteella puuntuotosta ja puuston hiilensidontaa pääpuulajeilla (mänty, kuusi, raudus- ja hieskoivu) kivennäis- ja turvemaapelloilla sekä arvioida pellonmetsityksen kannattavuutta ja vuosien 2021–2023 lainsäädännön mukaisen joutoalueiden metsitystuen vaikutusta siihen. Lisäksi arvioitiin metsitystuen tehokkuutta hiilensidonnan edistämiseksi. Tutkimuksessa käytettiin puutason mittaustietoa ja kannattavuuslaskelmat tehtiin suurelta osin toteutuneiden metsitysketjujen mukaan.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Metsitysketjut

Aineisto kerättiin kuudelta pellonmetsityskokeelta, jotka kuuluvat 1990-luvun alussa perustettuun Metsäntutkimuslaitoksen koesarjaan (Ferm ym. 1993). Kokeiden valinnan perusteena oli hyvä metsitystulos ensiharvennusvaiheessa kaikilla tai lähes kaikilla kokeelle istutetuilla puulajeilla. Mitatuista kokeista kolme sijaitsi kivennäismaalla ja kolme turvemaalla (Kuva 1). Vertailtavat puulajit olivat mänty, kuusi, rauduskoivu ja hieskoivu, mutta kivennäismaalle hieskoivua oli istutettu ainoastaan yhdelle kokeelle (Rantasalmi). Kutakin puulajikäsittelyä oli toistettu lohkoittain 2–4 kertaa.



Kuva 1. Pellonmetsityskokeiden sijainti. Ilmatieteen laitoksen hila-aineistosta interpoloidut keskimääräiset tehoisan lämpötilan summat vuosina 1981–2010 olivat kokeittain seuraavat: Anjalankoski 1 379, Rantasalmi 1 276, Leppävirta 1 264, Vilppula 1 195, Töysä 1 099 ja Toholampi 1 097 °Cvrk (Venäläinen ym. 2005).

Kivennäismaiden kokeilla metsitystoimenpiteet oli aloitettu heti peltoviljelyn lopettamisen jälkeen. Vilppulassa ja Toholammilla oli kasvatettu viimeksi viljaa, Rantasalmen pelto oli ollut nurmella. Turvemaaan kokeista myös Anjalankoskella ja Töysässä pintakasvillisuuden ennakkotorjunta tai maanmuokkaus oli tehty heti viimeistä peltokasvien satokautta seuraavana vuonna. Anjalankoskella oli kasvatettu viimeksi heinää, Töysässä viljaa. Leppävirralla pelto oli ollut viljelemättä 17 metsitystä edeltänyttä vuotta, ja siellä männyn istutus jouduttiin uusimaan. Pintakasvillisuuden ennakkotorjunta tehtiin kolmella kokeella glyfosaattiruiskutuksena ennen maanmuokkausta. Erilaisia maanmuokkauskäsittelyjä (kyntö, jyrä, karhinta) oli tehty 1–3 kertaa, ja kahdella turve- maapellolla oli lisäksi kunnostettu tai täydennetty ojastoa. Pääsin maanomistajien itsensä tekemän tai teettämän istutuksen tavoiteteiheyksellä oli 3 000 tainta hehtaarilla. Kemiallinen pintakasvillisuuden torjunta oli tehty 1–3 kertaa erilaisilla maa- ja lehtivaikutteisilla torjunta-aineilla ja mekaaninen torjunta kolme kertaa. Leppävirran kuusikoealoilla pintakasvillisuuden torjuntaa ei tehty lainkaan istutuksen jälkeen. Kannattavuuslaskelmiin sisällytetyt metsitystoimenpiteet ja niiden ajoittuminen kokeittain ja puolajeyttain on kuvattu Taulukossa 1.

Taulukko 1. Kannattavuuslaskelmiin sisältyvien metsitystoimenpiteiden ajoittuminen kokeittain ja puulajeittain (Ferm ym. 1993). Istutusvuotta (1990 tai 1991) käytettiin nollavuotena. Mä = mänty, ku = kuusi, hk = hieskoivu, rk = rauduskoivu.

	Ojaston kunnostus	Ennakkoto- rjunta	Maan- muokkaus	Istutus	Pintakasvillisuuden torjunta		Täydennys- istutus	Uusinta- istutus
					Mekaaninen	Kemiallinen		
Toimenpiteen toteutusvuosi								
Kivennäismaat								
Vilppula								
mä, ku, rk	-	-	0	0	-	0	-	-
Rantasalmi								
mä	-	-1	-1	0	0, 1, 2	-	2 ^a	-
ku	-	-1	-1	0	0, 1, 2	-	-	-
rk	-	-1	-1	0	0, 1, 2	-	2 ^a	-
hk	-	-1	-1	0	0, 1, 2	-	2 ^a	-
Toholampi								
mä, ku, rk	-	-	0	0	-	0, 1	-	-
Turvemaat								
Anjalankoski								
mä, ku, rk, hk	-	-1	-1	0	-	0	-	-
Leppävirta								
mä	-1	-1	-1	0	0, 1, 2	-	-	1
ku	-1	-1	-1	0	-	-	-	-
rk, hk	-1	-1	-1	0	-	0	-	-
Töysä								
mä	-1	-	-1	0	-	0	-	-
ku	-1	-	-1	0	-	0	5 ^b	-
rk, hk	-1	-	-1	0	-	0	-	-

^a Täydennysistutus kuusella; ^b täydennysistutus männyllä.

2.2 Mittaukset

Puustot mitattiin syksyllä 2019, jolloin istutuksesta oli kulunut 29 tai 30 kasvukautta. Kultakin kokeelta mitattiin jokaiselta puulajilta toistojen lukumäärän mukaan 2–4 kpl 100 m²:n ympyräkoaloja (säde 5,64 m). Jos puustoa oli harvennettu, koeala sijoitettiin niin, että ajouran osuus koealan pinta-alasta vastasi sen osuutta koko koeruudulla. Turvemaan kokeilla mitattiin lisäksi turvekerroksen paksuus ympyräkoalojen keskipisteistä. Metsätaloudessa käytetyn määritelmän mukaan valtaosa turvepeltojen koealoista sijoittui paksaturpeisille kohdille (turvekerroksen paksuus yli 30 cm; Wall 2005) (Taulukko 2). Maalajiksi oli kivennäismaan kokeita perustettaessa määritetty Vilppulassa hiekka, Rantasalmella savi ja Toholammilla hiesu Elosen (1971) kuvaamalla menetelmällä.

Taulukko 2. Koealojen (kpl) sijoittuminen turvepaksuusluokkiin turvemaaksi luokitelluilla pellonmetsityskokeilla.

	Koealojen lukumäärä (kpl) turvekerroksen paksuusluokittain					Kaikki
	< 30 cm	30–49 cm	50–79 cm	80–99 cm	≥ 100 cm	
Anjalankoski	0	1	5	1	1	8
Leppävirta	0	11	1	0	0	12
Töysä	1	1	2	2	10	16

Kaikista ympyräkoealan elävistä ja kuolleista puista määritettiin puulaji, syntytapa ja rinnankorkeusläpimitta sekä arvioitiin silmävaraisesti elinvoimaisuus (terve, lievä tuho, heikentynyt, kituva tai kuollut). Luontaisesti syntyneet puut kirjattiin vain, jos niiden rinnankorkeusläpimitta oli yli 45 mm. Mikäli harvennuksia oli tehty, läpimitaltaan yli 60 mm:n kantojen läpimitta mitattiin. Koepuina mitattiin puulajeittain kultakin kokeelta yhteensä vähintään 20 elävää puuta. Niistä mitattiin pituudet ja lisäksi kantoläpimitat harvennetuilta kokeilta. Koekohtaisesti selvitettiin ennen mittausta tehtyjen harvennusten ajankohdat.

2.3 Puuston kehityksen simulointi

Koalojen puustojen jatkokehitys mittaushetkestä päätehakkuuseen asti ennustettiin Luonnonvarakeskuksen Motti-ohjelmistolla (Hynynen ym. 2002, 2005; Salminen ym. 2005; Hynynen ym. 2014), jota käytetään laajasti Suomessa sekä metsikkö- että aluetason laskelmissa. Laskenta-aineisto muodostettiin yhdistämällä kunkin kokeen saman puulajin koealat yhdeksi alkutilanteeksi. Kasvuolosuhteina määritettiin kokeittain sijainti, lämpösumma ja kasvupaikkatyypit. Motti-ohjelmistolla ennustetaan puuston kehitystä metsämaan kasvupaikoilla, joten simuloinnissa puuston kehitys entisellä pellolla arvioitiin metsämaan kasvupaikkaa vastaavan puuston kehityksenä. Kivennäismaapeltojen oletettiin vastaavan viljavuudeltaan OMT-kasvupaikkaa ja turvemaapeltojen ruohoturvekankaita. Turvemaiden rauduskoivulle ei ole kasvumallia, joten sen kehitystä puustomittauksesta eteenpäin ei ennustettu. Puustot simuloinnin alussa kuvattiin käyttämällä vuoden 2019 puutason mittaustietoja, ja niiden jatkokehitys ennustettiin puutason malleilla. Harvennuksissa poistettujen puiden rinnankorkeusläpimitat johdettiin kantoläpimitoista kokeittain ja puulajeittain laadituilla lineaarisilla regressiomalleilla (R^2 : 0,643–0,986), jotka perustuivat koepuiden mittaustietoihin. Lukupuiden ja poistettujen puiden pituudet estimoitiin kokeittain ja puulajeittain laadituilla regressioyhtälöillä (R^2 : 0,805–0,982), joiden pohjana oli Näslundin (1936) pituusmalli. Tällä tavalla voitiin laskea poistetun puuston tilavuudet ja ainespuukertymät.

Ennen mittauksia hakattu ainespuumäärä laskettiin syöttämällä harvennetut puut Motti-ohjelmistoon ja teettämällä niille päätehakkuu heti. Elävän puuston jatkokehitys simuloitiin noudattamalla Metsänhoidon suosituksia (Äijälä ym. 2019). Harvennukset simuloitiin harvennusmallien mukaisesti kullekin puulajille. Suurin sallittu poistuma harvennushakkuissa oli männiköissä ja hieskoivikoissa 35 %, rauduskoivikoissa ja kuusikoissa 50 %. Päätehakkuukriteerinä oli ensisijaisesti pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, joka oli kullekin sijainnille, kasvupaikalle ja puulajille metsänhoidon suosituksissa esitetyn vaihteluvälin (Äijälä ym. 2019) keskiarvo. Päätehakkuussa jätettiin viisi säästöpuuta hehtaarille. Biomassatuotokset laskettiin Repolan (2008, 2009) malleilla puiden maanpäällisille osille ja paksujuurille. Yli 2 mm:n hienojuurten biomassat ennustettiin lehtibiomassan ja metsikön iän perusteella (Vanninen ym. 1996). Biomassan hiilipitoisuudeksi oletettiin 50 % (Thomas ja Martin 2012), ja sidotun hiilen massa muunnettiin hiilidioksidiksi hiilen ja hapen atomimassojen (de Laeter ym. 2003) avulla.

Simuloinnissa kuitupuupölkyn vähimmäispituus oli 3,0 m. Mänty- ja koivukuitupuun kuori-päällinen vähimmäisläpimitta oli 6 cm ja kuusikuitupuun 7 cm. Tukkien vähimmäisläpimitat kuoren päältä olivat seuraavat: mänty 15 cm, kuusi 16 cm ja koivu 20 cm. Entisillä pelloilla kasvavan puuston teknistä laatua ei tunneta riittävän tarkasti puulajikohtaisten tukkivähennysten määrittämiseksi. Siksi kannattavuuslaskennassa tehtiin herkkyysoanalyysi vähentämällä tukkiosuuksia 30, 40 ja 50 %:lla ja hinnoittelemalla em. osuudet hakkuukertymistä kuitupuuna.

2.4 Kannattavuuslaskenta

2.4.1 Kustannukset ja tuotot

Metsityksen kustannukset laskettiin erikseen kullekin kokeelle pääosin toteutuneiden metsitysketjujen mukaan (Taulukko 1). Kustannukset vastaavat kokeiden perustamisajankohdan metsityskäytäntöjä ja kustannustasoa niiltä osin kuin tietoa oli saatavilla. Joillakin kohteilla oli tehty tarpeettoman perusteellinen maanmuokkaus, joka sisälsi enimmillään jopa kolme muokkauskäsittelyä maataloustraktorilla. Laskelmissa oletettiin ainoastaan yksi käsittely (kyntö) maataloustraktorilla.

Vilppulan ja Toholammin kokeiden alkuperäisenä tarkoituksena oli selvittää pintakasvillisuuden torjuntamenetelmän vaikutusta metsitystulokseen. Käsittelykoealat olivat pieniä, joten ympyräkoealat eivät mahtuneet kokonaan yhden torjuntakäsittelyruudun sisälle. Näiltä kokeilta peräisin olleiden tutkimustulosten (Hytönen ja Jylhä 2005, 2008, 2011, 2013; Jylhä ja Hytönen 2006) ja 1990-luvulla metsityksessä käytettyjen torjunta-aineiden käyttösuositusten (Kostamo ym. 1993) perusteella istutuksen jälkeiseksi kemialliseksi torjuntamenetelmäksi valittiin kannattavuuslaskentaan havupuille Vilppulassa käytetyistä vaihtoehdoista glyfosaatti (Roundup + kiinnite) ja muualla terbutylatsiini (Gardoprim). Koivuille kemiallinen heinäntorjunta tehtiin diklobeniilillä (Casoron).

Pellonmetsityskokeissa oli käytetty isokokoisia paljasjuuri- tai kennotaimia, joten taimilajiksi valittiin Metsäkeskus Tapion hinnastosta (Kostamo ym. 1993) suurimmat avojuuritaimet. Rantasalmen ja Töysän kohteilla oli tehty täydennysistutusta, ja Leppävirralla mäntyruudut oli istutettu kokonaan uudelleen pintakasvillisuuden aiheuttamien tuhojen vuoksi (Ferm ym. 1993). Täydennystaimien määrä selvitettiin vuoden 2019 mittauksessa, ja uusintaistutuksen tiheydeksi oletettiin sama kuin alkuperäisen istutuksen.

Laskelmissa istutustiheytenä käytettiin ensimmäisenä istutuksen jälkeisenä syksynä mitattujen koeruutukohtaisten tiheyksien keskiarvoa (Taulukko 3). Istutustiheydet olivat pääsääntöisesti huomattavasti suurempia kuin 1990-luvulla suositellut pellonmetsityksen vähimmäistiheydet (mänty 2 500 kpl ha⁻¹, kuusi 2 000 kpl ha⁻¹ ja koivu 1 600 kpl ha⁻¹; Hynönen ja Hytönen 1998), joihin myös Kostamon ym. (1993) kokoamat ohjeelliset pellonmetsityskustannukset perustuivat (Vierula 2023). Kokeittain vaihdellut istutustiheys vaikutti hehtaarikohtaisiin metsityskustannuksiin. Se otettiin tarvittaessa huomioon laskemalla taimikohtaiset yksikkökustannukset ohjeellisten torjunta-aineiden ja työajan menekkien (Kostamo ym. 1993) sekä niiden määrittämisessä käytettyjen vähimmäistiheyksien perusteella.

Taulukko 3. Alkuperäiset istutustiheydet ja vuoden 2019 mittauksen perusteella arvioidut täydennysistutuksen tiheydet.

	Mänty, kpl ha ⁻¹		Kuusi, kpl ha ⁻¹		Rauduskoivu, kpl ha ⁻¹		Hieskoivu, kpl ha ⁻¹	
	Alkup. istutus	Täydennys	Alkup. istutus	Täydennys	Alkup. istutus	Täydennys	Alkup. istutus	Täydennys
Kivennäismaat								
Vilppula	2 117		2 150		2 133			
Rantasalmi	3 300	67	3 067		2 967	133	3 233	200
Toholampi	3 356		3 289					
Turvemaat								
Anjalankoski	3 000		2 800		2 700		2 650	
Leppävirta	3 200	(3 200) ¹	3 033		2 933		3 167	
Töysä	3 100		3 350	175	3 550		3 950	

¹ Laskelmissa oletettu uusintaistutuksen tiheys.

Taulukossa 4 on esitetty hehtaarikohtaiset arvonlisäverottomat metsityskustannukset kokeittain ja puulajeittain. Kustannusten laskennassa täydennys- ja uusintaistutuksen ajanmenekki oletettiin kaksinkertaiseksi alkuperäiseen istutukseen verrattuna (Vierula 2023). Glyfosaatin (Roundup) menekiksi ennakkotorjunnassa oletettiin 4 l ha⁻¹ (Kostamo ym. 1993), ellei koe kohtaista tietoa ollut saatavilla. Havupuilla glyfosaatin ja kiinnitteen taimikohtaiset menekit johdettiin koko pinta-alan käsittelyyn suositelluista käyttömääristä (Kostamo ym. 1993) olettaen laikun kooksi 1 m² (Hynönen ja Hytönen 1998). Koivuilla diklobeniilin menekin perusteena oli laikkukäsittelyyn suositellut käyttömäärät (kivennäismaat 8 kg ha⁻¹, turvemaat 15 kg ha⁻¹; Kostamo ym. 1993). Myös maanmuokkauksen ja pintakasvillisuuden kemiallisen ennakkotorjunnan sekä taimien ja torjunta-aineiden kustannukset saatiin Metsäkeskus Tapion ohjehinnastosta (Kostamo ym. 1993), jossa esitetyt kustannukset deflatoitiin vuoden 2021 tasolle Tilastokeskuksen (2023a) rahanarvo-muuntimen avulla. Kunnostus- ja täydennysojituksen kustannus saatiin Tapio Oy:n selvityksestä (Koistinen 2020). Istutus- ja heinäntorjuntatyön kustannukseksi määritettiin eri lähteiden perusteella 35 € h⁻¹ (Metsäalan työehtosopimus 2020; Strandström 2023; Tähkänä 2023). Istutuksen ja heinäntorjunnan kustannuksiin sisällytettiin kilometrikorvaus (0,44 € km⁻¹, Verohallinto 2020). Myös matkakustannuksen laskennassa otettiin huomioon istutustiheyden vaikutus työn ajanmenekkiin. Yhdensuuntaisen matkan pituudeksi oletettiin 20 km, työmaan pinta-alaksi 2 ha (Suomen metsäkeskus 2020, 2023) ja työpäivän pituudeksi 8 h (Metsäalan työehtosopimus 2020). Lisäksi

Taulukko 4. Kannattavuuslaskelmissa käytetyt vuoden 2021 tasolle deflatoidut laskennalliset metsityskustannukset kokeittain ja puulajeittain (ALV 0 %).

	Pintakasvillisuuden ennakkotorjunta	Maan- muokkaus	Ojien kunnostus, täydennysojitus	Istutus	Täydennys- ja uusintaistutus	Kemiallinen pintakasv. torjunta	Manuaalinen pintakasv. torjunta
	€ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	€ ha ⁻¹	€ ha ^{-1a}	€ ha ^{-1a}	€ ha ^{-1b}	€ ha ^{-1c}
Vilppula							
Mänty		67		1 476		308	
Kuusi		67		1 748		312	
Rauduskoivu		67		2 175		460	
Rantasalmi							
Mänty	181	67		2 301	97		3 × 497
Kuusi	181	67		2 486			3 × 465
Rauduskoivu	181	67		3 029	193		3 × 442
Hieskoivu	181	67		3 308	282		3 × 488
Toholampi							
Mänty		67		2 339		2 × 516	
Kuusi		67		2 667		2 × 507	
Rauduskoivu		67		3 224		2 × 681	
Anjalankoski							
Mänty	204	67		2 092		467	
Kuusi	204	67		2 270		440	
Hieskoivu	204	67		2 709		783	
Leppävirta							
Mänty	204	67	434	2 234	3 756		3 × 483
Kuusi	204	67	434	2 459			
Hieskoivu	204	67	434	3 235		925	
Töysä							
Mänty		67	434	2 159		481	
Kuusi		67	434	2 723	213	516	
Hieskoivu		67	434	4 039		1 159	

^a Taimet, istutustyö ja matkat; ^b ruiskutustyö, torjunta-aine ja matkat; ^c heinästyö ja matkat.

Taulukko 5. Vuoden 2021 tasolle deflatoidut vuosien 2012–2021 keskimääräiset valtakunnalliset kantohinnat hakkuutavoittain (Luonnonvarakeskus 2023; Tilastokeskus 2023b).

Hakkuutapa	Puulaji	Deflatoitu kantohinta, € m ⁻³	
		Kuitupuu	Tukkipuu
Ensiharvennus	Mänty	12,92	
	Kuusi	12,74	43,42
	Koivu	12,63	
Harvennus	Mänty	16,38	51,22
	Kuusi	16,83	52,10
	Koivu	15,76	39,52
Uudistushakkuu	Mänty	19,41	60,49
	Kuusi	20,78	61,87
	Koivu	18,80	46,53

metsitystuen sisältävässä laskentavaihtoehdossa oletettiin, että tuen saamiseksi vaadittavan suunnitelman kustannus on 179 € ha⁻¹ (Koistinen 2020; Tilastokeskus 2023a).

Puunmyyntituloina käytettiin vuosien 2012–2021 keskimääräisiä valtakunnallisia hakkuutavoittaisia (ensiharvennus, muu harvennus ja päätehakkuu) kantohintoja (Luonnonvarakeskus 2023), jotka deflatoitiin vuoden 2021 tasolle elinkustannusindeksin avulla (Tilastokeskus 2023b) (Taulukko 5). Metsitystuen sisältävässä laskentavaihtoehdossa metsityspalkkioksi oletettiin kivennäismailla 1 500 € ha⁻¹ ja turvemaidella 2 000 € ha⁻¹, jotka maksettiin istutusvuonna. Hoitopalkkio oli 900 € ha⁻¹, joka maksettiin kahdessa erässä kahden ja kahdeksan vuoden kuluttua istutuksesta (Valtioneuvoston asetus metsityksen määräaikaisesta tukemisesta 103/2021).

2.4.2 Paljaan maan arvon laskenta

Ennen puustomittauksia tehtyjen toimenpiteiden kustannukset ja hakkuutulot sekä mittaushetkestä eteenpäin simuloidun puuston jatkokehityksen mukaiset hakkuutulot ja mahdolliset metsitystuet sisällytettiin kannattavuuslaskentaan, jossa kullekin kasvatusvaihtoehdolle turvemaiden rauduskoivikoita lukuun ottamatta määriteltiin paljaan maan arvo (PMA). PMA kuvaa diskontattua taloudellista ylijäämää valitusta lähtöhetkestä ikuisuuteen (Faustmann 1849). Siten PMA:n avulla voidaan vertailla harhattomasti kiertoajaltaan eripituisten puuntuotantovaihtoehtojen kannattavuutta (esim. Amacher ym. 2009). Tässä tutkimuksessa PMA (€ ha⁻¹) määritettiin seuraavalla kaavalla:

$$PMA = \left[\sum_{t>21}^T b^t \sum_{p=1}^P HK_{pt} + S_{M+H} - \sum_{s=-1}^k b^s \sum_{i=1}^n w_{it_s} \right] \times (1 - b^{t_r})^{-1}, \quad (1)$$

jossa HK kuvaa hakkuutulota (kantorahana, € ha⁻¹) vuonna t , ja HK_1 on ensiharvennus aikaisintaan vuonna 22 (varhaisin puustomittauksessa määritetty ensiharvennuksen ajankohta), HK_p päätehakkuu vuonna t_T , S_{M+H} on diskontattu metsitystuen ja hoitopalkkion summa (€ ha⁻¹; absoluuttiset lukuarvot, ks. luku 2.4.1) ja w on metsitystoimenpiteen $i = 1, \dots, n$ kustannus (Taulukko 4; € ha⁻¹) vuonna t_s . Metsitystoimenpiteiden ajoittuminen kalenterivuosille on esitetty Taulukossa 1, jonka mukaan samalle vuodelle saattoi ajoittua useampia toimenpiteitä. t_{-1} kuvastaa kokeita, joissa pintakasvillisuuden ennakkotorjunta ja/tai maanmuokkaus tehtiin istutusta edeltävänä vuonna. Diskonttaustekijä $b = 1/(1+r)$, jossa r on laskentakorko (%). Lähtökohtaisesti $t_s < t_r$, koska kaikki

metsitystoimenpiteiden kustannukset ajoittuvat kaikissa käsittelyvaihtoehdoissa ennen ensimmäisiä hakkuutuloja. PMA laskettiin kokeittain ja kasvatusketjuittain tilanteissa, joissa $S_{M+H} = 0$ tai $S_{M+H} > 0$.

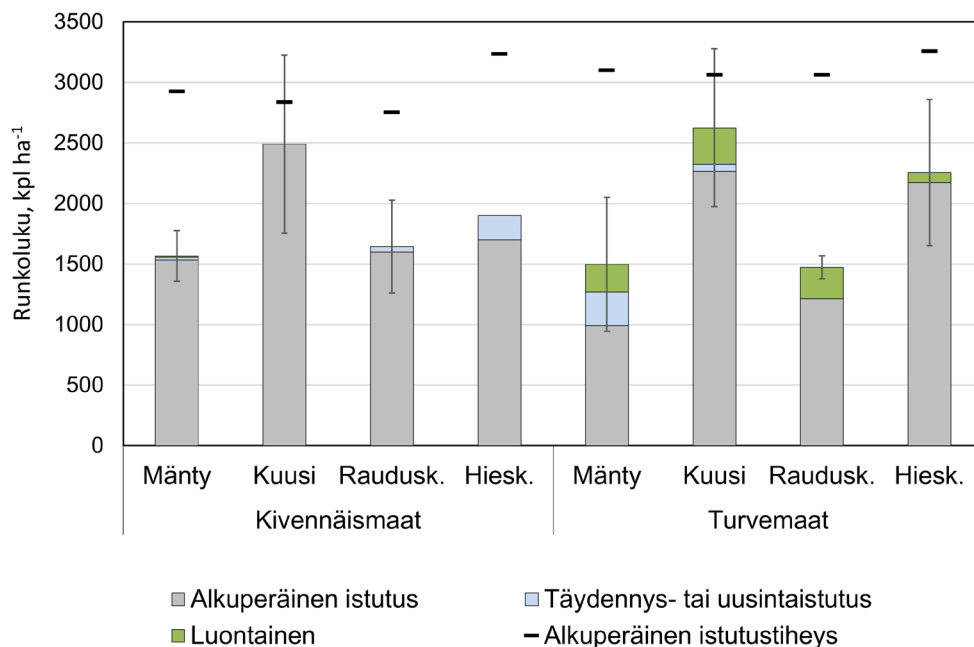
2.5 Hiilensidonnan kustannus

Metsitystuen tehokkuutta hiilensidonnan edistäjänä arvioitiin jakamalla 1–5 %:n korkokannalla diskontatut metsitystuet (metsitystuki ja hoitopalkkio, € ha⁻¹) puuston keskimääräisellä kiertojen hiilensidonnalla (t CO₂ ha⁻¹) turvemaiden rauduskoivikoita lukuun ottamatta. Tuloksena saatiin sidottua hiilidioksiditonnia kohti käytetty metsitystuki (€ t⁻¹ CO₂⁻¹).

3 Tulokset

3.1 Puuston kehitys

Istutettujen puiden (sis. myös mitatut kuolleet ja kantomittausten perusteella selvitettyt hakkuussa poistetut puut) osuus alkuperäisestä istutustiheydestä oli 29–30 vuoden kuluttua metsityksestä keskimäärin 40–88 % (Kuva 2). Kivennäismailla kuusien runkoluku oli keskimäärin 88 % ja turvemaiden 76 % alkuperäisestä istutustiheydestä. Turvemaiden männiköiden ja rauduskoivikoiden mitatut tiheydet olivat ainoastaan noin 40 % alkuperäisestä istutustiheydestä. Turvemaiden taimikot olivat täydentyneet luontaisella taimiaineksella, mutta kokonaistiheydet jäivät silti tuntuvasti alkuperäisiä istutustiheyksiä pienemmiksi.



Kuva 2. Vuoden 2019 maastomittausten perusteella lasketut keskimääräiset puuston runkoluvut (kaikki puulajit, sis. myös mitatut kuolleet ja kantomittausten perusteella selvitettyt hakkuussa poistetut puut) jaoteltuna istutettuihin ja luontaisesti syntyneisiin puihin, kokonaisrunkolukujen keskihajonnat sekä alkuperäiset istutustiheydet kivennäis- ja turvemaapelloilla puulajikäsittelyittäin.

Taulukko 6. Elävän puuston tunnuksat simuloinnin alussa.

	Koe	Ikä, a	Runkoluku, kpl ha ⁻¹	Pohjapinta-ala, m ² ha ⁻¹	Keskiläpimitta ^a , cm	Valtapituus ^b , m
Kivennäismaat						
Mänty	Vilppula ^c	29	700	17,6	18,6	15,6
	Rantasalmi ^c	30	800	19,1	19,2	15,5
	Toholampi	30	1 433	27,8	17,1	15,4
Kuusi	Vilppula ^c	29	1 833	31,7	16,4	15,4
	Rantasalmi ^c	30	900	26,1	20,6	15,6
	Toholampi	30	2 267	38,9	16,8	15,0
Rauduskoivu	Vilppula ^c	29	1 000	16,6	15,5	18,9
	Rantasalmi ^c	30	800	19,8	19,3	19,8
	Toholampi	30	2 000	32,1	15,3	19,0
Hieskoivu	Rantasalmi ^c	30	867	14,2	15,9	18,0
Turvemaat						
Mänty	Anjalankoski	30	1 450	25,7	15,9	15,9
	Leppävirta ^c	30	600	14,7	18,7	13,0
	Töysä ^c	30	1 050	28,5	19,2	15,9
Kuusi	Anjalankoski	30	3 000	38,2	14,9	14,4
	Leppävirta ^c	30	1 000	24,8	21,2	17,5
	Töysä ^c	30	1 575	27,1	16,7	13,4
Rauduskoivu	Anjalankoski	30	1 550	25,5	18,3	19,5
	Leppävirta ^c	30	600	14,7	20,3	20,0
	Töysä ^c	30	700	16,6	18,8	18,6
Hieskoivu	Anjalankoski	30	2 700	32,8	13,7	17,0
	Leppävirta ^c	30	567	12,5	16,9	18,1
	Töysä ^c	30	800	13,7	15,4	18,2

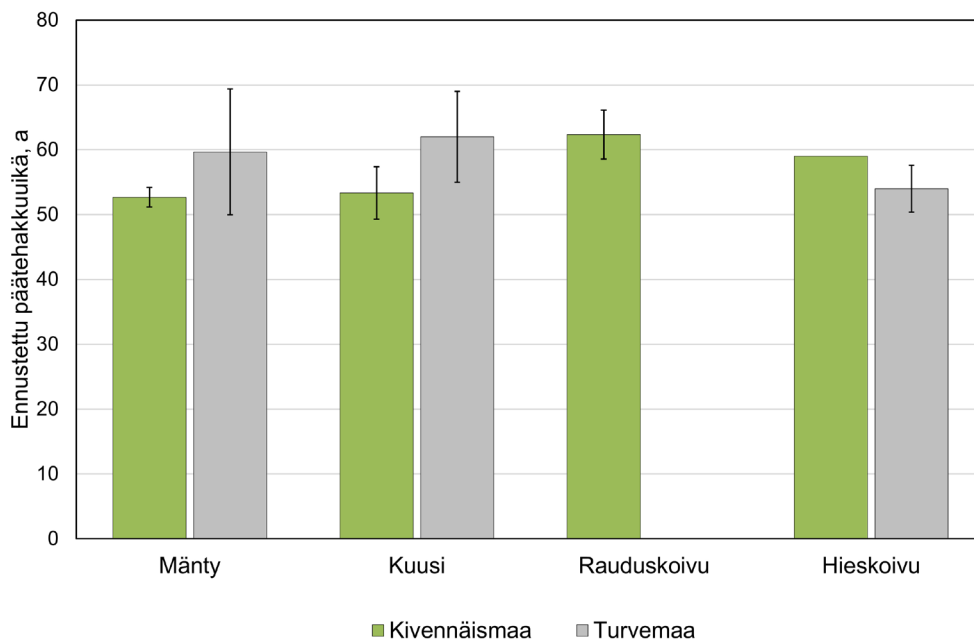
^a Pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta; ^b hehtaarilta mitattujen 100 paksuimman puun keskipituus; ^c koe harvennettu ennen puustomittauksia.

Osa metsiköistä oli harvennettu ennen mittauksia, joten simuloinnin lähtötilanteen puustotunnuksissa oli paljon vaihtelua. Elävän puuston runkoluku oli 567–3 000 kpl ha⁻¹, pohjapinta-ala 12,5–38,9 m² ha⁻¹, pohjanpinta-alalla painotettu keskiläpimitta 13,7–21,2 cm ja valtapituus 13,0–20,0 m (Taulukko 6).

Puusto arvioitiin kivennäismailla elinvoimaisemmaksi kuin turvemilla (Taulukko 7). Sekä kivennäis- että turvemilla terveiden puiden osuus oli männyillä pienin, ja turvemilla 8 % mita- tuista männyistä oli kuolleita.

Taulukko 7. Mitattujen puiden jakaantuminen tuholuokkiin syksyn 2019 mittauksessa.

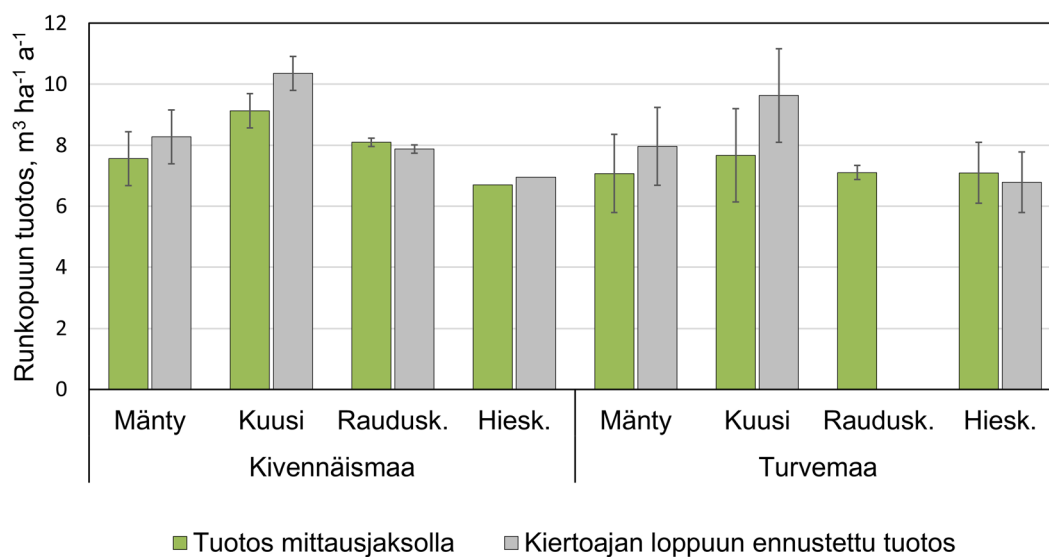
	Terve	Lievä tuho	Heikentynyt	Kuollut	Kituva	Yhteensä
Kivennäismaat						
Mänty	95 %	2 %	0 %	3 %	0 %	100 %
Kuusi	96 %	0 %	0 %	4 %	0 %	100 %
Rauduskoivu	98 %	1 %	0 %	1 %	0 %	100 %
Hieskoivu	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
Turvemaat						
Mänty	81 %	6 %	5 %	8 %	0 %	100 %
Kuusi	89 %	7 %	1 %	3 %	0 %	100 %
Rauduskoivu	94 %	6 %	0 %	0 %	0 %	100 %
Hieskoivu	95 %	3 %	0 %	3 %	0 %	100 %



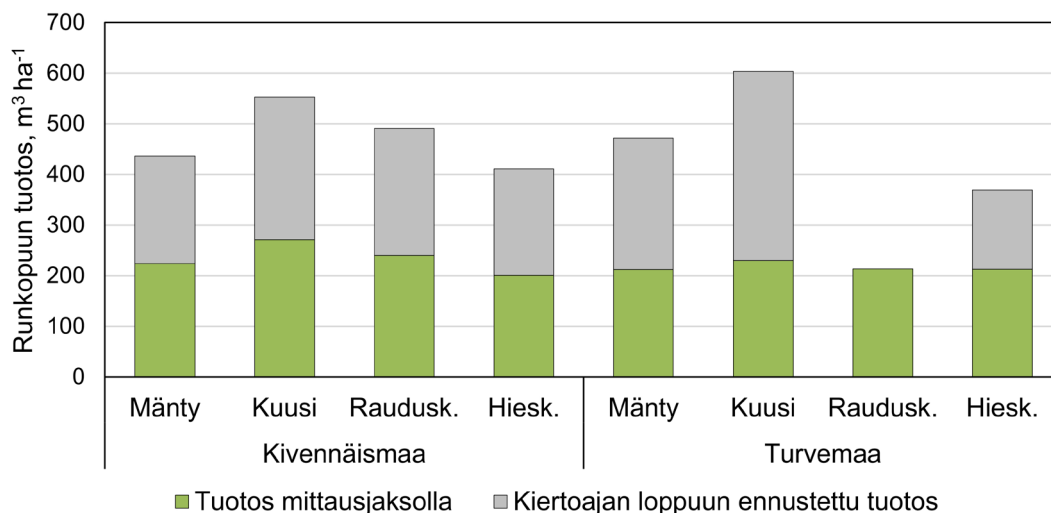
Kuva 3. Keskimääräiset ennustetut päätehakkuiät (kiertoajat) ja niiden keskihajonnat kivennäis- ja turvemaileda puulajeittain.

Männylle ja kuuselle ennustettiin turvemaileda pidempi kiertoaika kuin kivennäismaileda (Kuva 3). Kivennäismaileda sekä männyn että kuusen ennustettu keskimääräinen päätehakkuiä oli noin 53 vuotta, turvemaileda niiden kiertoajat olivat 7–9 vuotta pidempiä. Kuuselle ennustettiin yhteensä 2–3 harvennuskertaa ennen päätehakkua, männylle 1–2 harvennuskertaa (sis. myös ennen puustomittausta tehdyt harvennukset). Kivennäismaileda rauduskoivun keskimääräinen päätehakkuiä oli 62 vuotta, ja toteutettuja ja ennustettuja harvennuskertoja oli yhteensä 2–3.

Puuntuotos oli mittausjaksolla (29–30 vuotta) kivennäismaileda suurempi kuin turvemaileda hieskoivua lukuun ottamatta (Kuva 4). Suurin puuntuotos mitattiin kuusella, jolla runkopuun vuotuinen tilavuuskasvu oli kivennäismaileda keskimäärin 9,1 ja turvemaileda 7,7 m³ ha⁻¹. Männyn keskimääräinen tilavuuskasvu mittausjaksolla oli 7,1–7,6 m³ ha⁻¹ a⁻¹, rauduskoivun 7,1–8,1 m³ ha⁻¹ a⁻¹



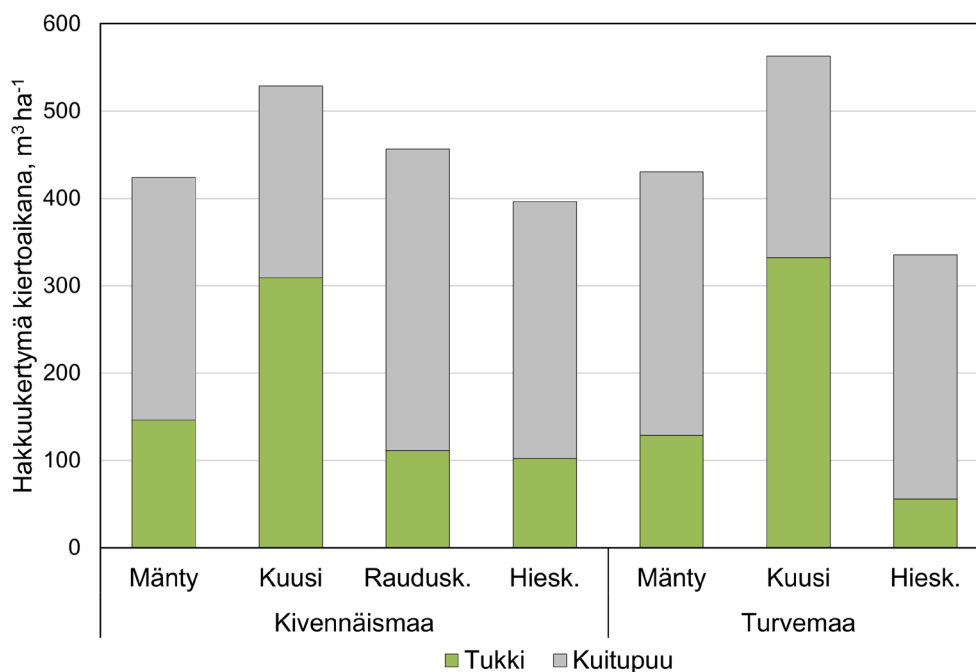
Kuva 4. Keskimääräinen vuotuinen runkopuun tuotos mittausjaksolla ja koko kiertoajalle ennustettu tuotos sekä niiden keskihajonnat (m³ ha⁻¹ a⁻¹).



Kuva 5. Mitattu keskimääräinen runkopuun kokonaistuotos ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) metsityksestä 29–30 vuoden ikään asti sekä mittauksesta koko kiertoaajan loppuun ennustettu tuotos. Turvemaiden rauduskoivun kehitystä puuston mittauksesta kiertoaajan loppuun ei ennustettu.

ja hieskoivun $6,7\text{--}7,1 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Koko kiertoaajan tuotosennuste (Kuva 4) oli kuusella kivennäismaalla keskimäärin $10,4 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ja turvemalla $9,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Männyin vuotuisen tuotoksen ennustettiin olevan kivennäismaalla keskimäärin $8,3$ ja turvemalla $8,0 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Kivennäismailla rauduskoivun tuotos oli noin 13 % hieskoivua suurempi ($7,9$ vs. $7,0 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Koko kiertoajalle ennustetut runkopuun tuotokset olivat männyllä ja kuusella turvemalla 8–9 % suuremmat kuin kivennäismailla pidempien kiertoaikojen vuoksi (kuva 5). Hieskoivulle ennustettiin kivennäismailla turvemaita noin 11 % suurempi kokonaistuotos.

Koko kiertoaajan ainespuukertymät olivat havupuilla turvemalla 2–6 % suuremmat kuin kivennäismailla (Kuva 6). Hieskoivun ainespuukertymä oli kivennäismailla 18 % suurempi kuin



Kuva 6. Toteutunut ja ennustettu keskimääräinen hakkuukertymä kiertoaikana kivennäis- ja turvemilla.

turvemailla. Kuusen ennustettu tukkiosuus oli huomattavasti suurempi kuin muiden puulajien (58–59 % vs. 17–35 %). Männyllä tukkiosuus oli 30–35 %, kivennäismaiden rauduskoivulla 24 % ja hieskoivulla 17–26 %. Näissä laskelmissa ei otettu huomioon puutavaran laadun vaikutusta tukki- ja kuitupuun jakaumiin.

3.2 Biomassatuotos ja hiilensidonta

Puuston koko kiertoajan ennustettu biomassatuotos (kuivamassa, sis. maanpäälliset osat ja yli 2 mm juuriston) metsityskokeilla oli keskimäärin 241–383 t ha⁻¹ (Taulukko 8). Keskimääräinen vuotuinen biomassatuotos oli 4,5–6,4 t ha⁻¹, ja biomassaan sitoutui vuodessa 8,3–11,7 t hiilidioksidia (Taulukko 8). Kuusen vuotuinen biomassatuotos ja hiilensidonta olivat suurimmat sekä kivennäis- että turvemailla, kivennäismaiden rauduskoivun seuraavaksi suurimmat. Vuotuinen biomassatuotos ja hiilensidonta olivat pienimmät männyllä molemmilla maalajeilla.

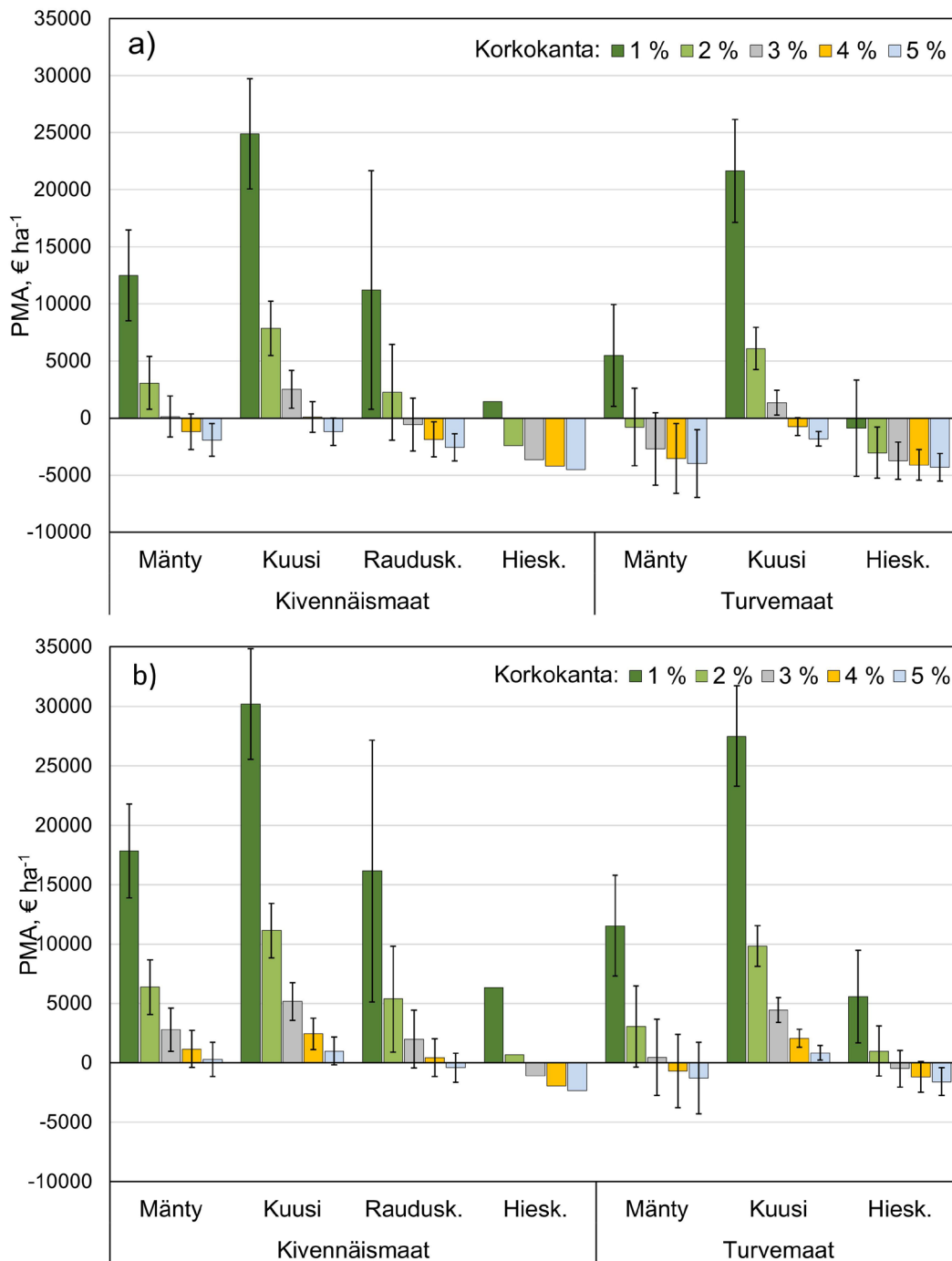
3.3 Metsityksen kannattavuus

Pellonmetsitys oli kannattavinta kuusella sekä kivennäis- että turvemailla (Kuva 7 a). Kivennäismailla metsitys kuusella oli kannattavaa ilman tukea 1–4 %:n ja turvemailla 1–3 %:n korkokannalla. Esimerkiksi 3 %:n korkokannalla keskimääräinen PMA oli kuusella ilman tukea kivennäismailla 2 520 € ha⁻¹ ja turvemailla 1 344 € ha⁻¹. Mänty oli toiseksi kannattavin puulaji pellonmetsityksessä, mutta 3 %:n korkokannalla PMA oli ilman metsitystukea kivennäismailla enää 136 € ha⁻¹. Rauduskoivulla PMA oli kivennäismailla positiivinen 1–2 %:n korkokannalla ja hieskoivulla ainoastaan 1 %:n korkokannalla. Turvemaapeltojen metsitys hieskoivulla oli kannattamatonta ilman metsitystukea kaikilla käytetyillä korkokannoilla, ja männylläkin PMA oli positiivinen ainoastaan 1 %:n korkokannalla.

Metsitystuki paransi kannattavuutta olennaisesti. 3 %:n korkokannalla PMA oli kuusella kivennäismailla 5 170 € ha⁻¹ ja turvemailla 4 444 € ha⁻¹ (Kuva 7 b). Kivennäismailla metsitystuki nosti männyn ja rauduskoivun kasvatuksen kannattavaksi. PMA oli tällöin 3 %:n korkokannalla männyllä noin 2 800 € ha⁻¹ ja rauduskoivulla noin 2 000 € ha⁻¹. Turvemailla hieskoivun kasvatus oli kannattamatonta tuesta huolimatta jo 3 %:n korkokannalla, jolla männylläkin keskimääräinen PMA oli vain 460 € ha⁻¹.

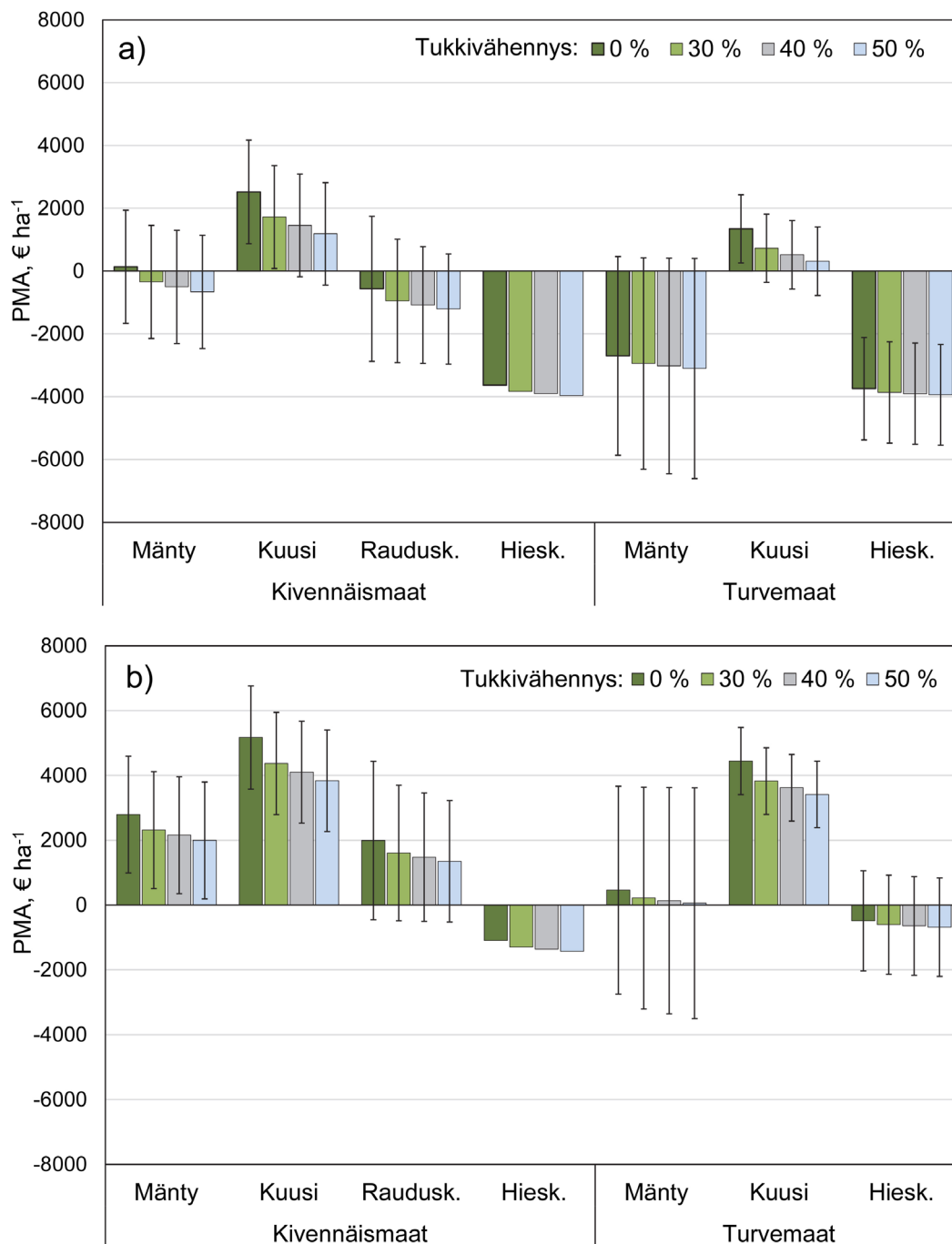
Taulukko 8. Puuston keskimääräinen biomassatuotos (t ha⁻¹, kuiva-ainetta) ja hiilensidonta (t CO₂ ha⁻¹) kiertoaikana sekä vuotuinen keskimääräinen biomassatuotos (t ha⁻¹ a⁻¹) ja hiilensidonta (t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹) kivennäis- ja turvemailla.

	Biomassatuotos		Hiilensidonta	
	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹ a ⁻¹	t CO ₂ ha ⁻¹	t CO ₂ ha ⁻¹ a ⁻¹
Kivennäismaat				
Mänty	241	4,6	443	8,4
Kuusi	340	6,4	624	11,7
Rauduskoivu	337	5,4	619	9,9
Hieskoivu	297	5,0	545	9,2
Turvemaat				
Mänty	270	4,5	495	8,3
Kuusi	383	6,1	703	11,2
Hieskoivu	263	4,8	482	8,9



Kuva 7. Keskimääräiset paljaan maan arvot (PMA) ja niiden keskihajonnat kivennäismaa- ja turvepelloilla ilman tukea (a) ja joutoalueiden metsitystuen mukaisella tuella (b), kun korkokanta on 1–5 %.

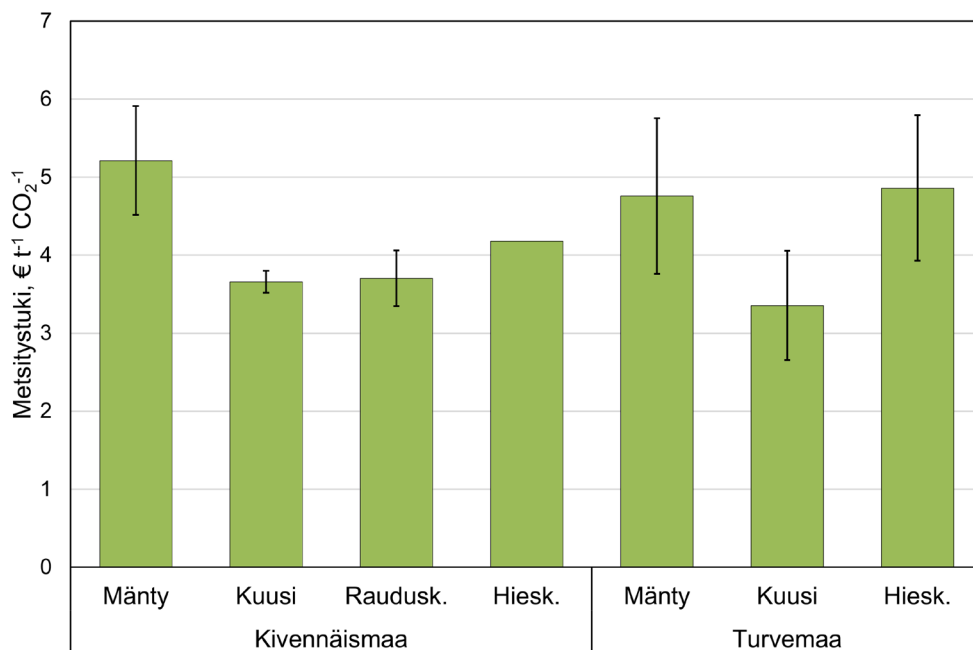
Simuloinnissa oletettiin, että rungoissa ei ole tukkisaantoa alentavia laatuviikoja, joten kaikista tukkipuun mitat täyttävistä rungoista tehtiin tukkeja. Kun korkokanta oli 3 % eikä metsitystukea sisällytetty laskelmiin, jo 30 %:n tukkivähennys alensi esimerkiksi kuusella PMA:ta kivennäismailla keskimäärin 32 % ja turvamailla 46 % (Kuva 8).



Kuva 8. Keskimääräiset paljaan maan arvot (PMA) ja niiden keskihajonnat kivennäismaa- ja turvepelloilla ilman tukea (a) ja joutoalueiden metsitystuella (b), kun tukkivähennys on 0, 30, 40 tai 50 % ja laskentakorko 3 %.

3.4 Metsitystuen tehokkuus hiilensidonnassa

Yhtä sidottua hiilidioksiditonta kohden esimerkiksi 3 %:n korkokannalla käytettiin metsitystukea kivennäismailla 3,7–4,2 € ja turvemailla 3,4–4,9 € (Kuva 9). Metsitystuen käyttö hiilensidonnassa oli tehokkainta, kun turvemaapelto metsitettiin kuusella. Tällöin kiertoaikana sidottua hiilidioksiditonta kohti käytettiin metsitystukea 3,4 €. Kivennäismailla metsitystuen käyttö oli kuusella ja koivulla likimain yhtä tehokasta (noin 3,7 € t⁻¹ CO₂⁻¹). Männyllä laskennallinen metsitystuki sidottua hiilidioksiditonta kohti sekä kivennäis- että turvemailla oli noin 30 % suurempi kuin kuusella.



Kuva 9. Kolmen prosentin korkokannalla diskontattu keskimääräinen metsitystuki kiertoaikana sidottua hiilidioksiditonnia kohti ($\text{€ t}^{-1} \text{CO}_2^{-1}$, \pm keskihajonta) puulajeittain kivennäis- ja turvemilla.

4 Tarkastelu

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää puulajin ja kasvupaikan vaikutusta puuntuotokseen ja metsityksen kannattavuuteen. Käytännön pellonmetsityksille perustetuille satunnaistetuille lohkokokeille oli kaikissa tapauksissa istutettu mäntyä, kuusta ja rauduskoivua; hieskoivua neljälle yhteensä kuudesta kokeesta. Koepeltojen välisen maalajin vaihtelun ansiosta voidaan tarkastella eri puulajien soveltuvuutta kohteiden metsitykseen. Kokeet oli mitattu alussa vuosittain, joten puuston alkukehitys ja tehdyt toimenpiteet tunnetaan hyvin. Myös pitkä seuranta-aika, 29–30 vuotta, on vahvuus verrattuna aikaisempiin pellonmetsitystutkimuksiin, joissa puuston kehityssennusteet perustuvat lyhimmillään vain muutaman vuoden seurantaan.

Kuusi osoittautui viljelyvarmimmaksi ja kannattavimmaksi puulajiksi sekä kivennäis- että turvemilla. Sen mitattu runkopuun tuotos oli kivennäismaalla keskimäärin $9,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja turvemalla $7,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Koko kiertoajan tuotosennusteet olivat 14–24 % suuremmat kuin mittausjaksolla. Kuusen koko kiertoajan tuotosennuste ylittää Vuokilan ja Väliahon (1980) tutkimuksessa esitetyn lehtomaisten kankaiden (OMT) kuusikoiden keskimääräisen tilavuuskasvun ($7,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Rauduskoivun mitattu runkopuun tuotos oli tässä tutkimuksessa kivennäismaalla keskimäärin $8,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja männyn $7,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Turvemalla raudus- ja hieskoivun sekä männyn mitatut tuotokset olivat yhtä suuria ($7,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Maanviljelyn aikana toistuvasti muokattujen ja lannoitettujen peltomaiden ravinteisuus selittää suuret puuntuotokset. Turvepeltoilta useimpien ravinteiden pitoisuudet ovat olleet 25 vuotta viljelyn päättymisen jälkeen suurempia kuin viereisissä suometsissä (Wall ja Hytönen 1996; Hytönen ja Wall 1997). Metsitetyillä kivennäismaapelloilla maan ravinnepitoisuudet olivat Wallin ja Hytösen (2005) tutkimuksessa vielä 60–70 vuoden kuluttua metsityksestä suurempia kuin viereisillä vertailualoilla, jotka olivat olleet koko ajan metsinä. Peltomaan ravinnetalouden epätasapaino voi kuitenkin aiheuttaa kasvuhäiriöitä ja tuotostappioita (Hytönen ja Pietiläinen 1995; Hytönen ym. 2017).

Tässä tutkimuksessa mitattu koivun kasvu oli turvemalla yli kaksinkertainen verrattuna Hytösen ym. (2013) tutkimukseen, jonka aineisto oli kerätty Pohjois-Karjalassa sijaitsevalta turve-

maan pellonmetsityskokeelta 21 vuoden kuluttua istutuksesta. Siinä raudus- ja hieskoivun kasvu oli samaa tasoa; ainoastaan $3,3\text{--}3,4\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$. Suuri ero selittynee sillä, että tähän tutkimukseen oli valittu onnistuneita kokeita ja istutustiheydet olivat olleet suuria. Viljavilla metsämaan kankailla hieskoivu on ollut kasvu- ja tuotoskyvyltään selvästi rauduskoivua heikompi (Niemistö 2008). Tämän tutkimuksen aineistossa oli ainoastaan yksi kivennäismaapelloille perustettu hieskoivukoe, joten koivulajien välinen vertailu sen perusteella on epävarmaa.

Wall (2005) päätteli metsitettyjen peltomaiden ravinteisuuden perusteella, että useimmat hänen tutkimistaan kohteista vastaavat viljavuudeltaan OMT metsämaita tai ovat sitä parempia. Niemistön ym. (1997) tutkimuksessa 29-vuotiaiden kivennäismaan rauduskoivikoiden valtapituukissa ei ollut eroja pelto- ja metsämaiden välillä, mutta entisillä pelloilla valtapuiden keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta oli noin 1 cm suurempi kuin metsämailla. Motti-simulaattorissa ei ole peltomaille tarkoitettuja puuston kasvumalleja. Siksi puustojen kehitystä mittaushetkestä ennustettiin metsämaiden kasvumalleilla käyttäen kivennäismaapelloille lehtomaisen kankaan (OMT) kasvupaikkatyyppiä ja turvemaapelloille ruohoturvekankaan kasvupaikkatyyppiä. Rauduskoivun mitatut valtapituudet vastaavat valtapituusboniteettia 27–30 m 50 vuoden iällä (Lee ym. 2024), ja turvemaapelloilla rauduskoivujen valtapituus oli kivennäismaapeltojen kanssa samaa suuruusluokkaa. Tämä tukee simulointia varten tehtyjä arvioita kasvupaikkojen viljavuudesta.

Tämän tutkimuksen tulosten luotettavuutta parantaa se, että simuloinnin alkutilanteena oli mitattu puukohtainen tieto ensiharvennusvaiheen metsiköstä ja ennustejakso jäi verrattain lyhyeksi (12–40 vuotta). Koko kiertoajalle ennustetut tuotokset olivat samansuuntaiset kuin 29–30 vuoden mittausjaksolla. Kivennäismailla rauduskoivujen ennustettu kiertoaika oli suhteellisen pitkä kuuseen verrattuna. Rauduskoivujen kasvu hidastuu nuoremmalla iällä kuin kuusen (Huuskonen ym. 2023), mutta silti malliennusteet rauduskoivujen kasvusta voivat olla aliarvioita. Vasta pidemmän aikavälin seuranta näyttää, kuinka puustojen kehitys jatkuu pellonmetsityskohteilla kiertoajan lopulla.

Tulokset osoittavat, että pellonmetsitys voi olla kannattavaa jopa ilman tukea, jos puulaji sopii kasvupaikalle ja metsittäminen onnistuu. Kannattavuuslaskelmien oletukset poikkeavat kuitenkin joiltakin osin nykyisistä metsityskäytännöistä ja -kustannuksista, koska laskelmat pyrittiin tekemään mahdollisimman tarkasti toteutuneiden metsitysketjujen ja 1990-luvun alun kustannustason mukaisesti. Kokeissa käytetyt viljelytiheydet olivat suuria nykyisiin suosituksiin (mänty $2\ 400\text{ ha}^{-1}$, kuusi $2\ 000\text{ kpl ha}^{-1}$, raudus- ja hieskoivu $1\ 600\text{ kpl ha}^{-1}$; Metsänhoidon suositukset 2024) verrattuna, koska suuren tuhoriskin vuoksi pellonmetsityksiin suositeltiin 1990-luvulla normaalia korkeampia istutustiheyksiä (Hynönen ja Hytönen 1998). Alkuperäinen istutustiheys kokeissa oli männyllä keskimäärin 26 %, kuusella 47 %, rauduskoivulla 78 % ja hieskoivulla 103 % nykyisuuksia suurempi. Tutkimusaineiston perusteella ei kuitenkaan voida arvioida istutustiheyden vaikutusta kannattavuuteen, sillä puuston tiheys vaikuttaa metsiköiden kehitykseen.

Istutettujen (sis. täydennysistutetut ja hakkuussa poistetut puut) puiden runkoluvut olivat korkeista istutustiheyksistä huolimatta pääsääntöisesti laskeneet nykyisten suositusten alapuolelle. Siten suosituksia suuremmat istutustiheydet olivat perusteltuja. Kannattavuuslaskelmissa käytetty metsityskustannus oli kivennäismailla keskimäärin noin $3\ 700\text{ € ha}^{-1}$ ja turvemaidella $4\ 400\text{ € ha}^{-1}$ ilman metsitystukeen vaaditun suunnittelun kustannusta (Taulukko 4). Istutustiheysiin suhteutettuna laskennalliset metsityskustannukset vastaavat Haapaniemen (2020) esittämää arviota, jonka mukaan maanmuokkauksen, heinätorjunnan, taimien ja istutustyön kustannus on yhteensä noin $3\ 000\text{ € ha}^{-1}$. Maanmuokkaus oli tehty maatalouskoneilla. Nykyisin metsitettävälle pelloille suositellaan laikku- tai ojitusmätästystä (Metsänhoidon suositukset 2024). Siksi maanmuokkauksen oletettu kustannus (67 € ha^{-1}) oli alle kuudesosa vuoden 2021 keskimääräisestä mätästyskustannuksesta (412 € ha^{-1} ; Luonnonvarakeskus 2023).

Pintakasvillisuuden ennakkotorjunta oli metsityskokeilla tehty lehtivaikutteisella glyfoosaailla ennen maanmuokkausta. Maanmuokkaus nostaa pintaan peltomaassa olevia itämiskykyisiä

rikkakasvien siemeniä, joita voi olla kymmeniä tuhansia neliometrillä (Paatela ja Erviö 1971; Törmälä 1982; Kiirikki 1993). Siten glyfosaattikäsittelyn vaikutus oli vähäinen ja se todennäköisesti heikensi metsityksen kannattavuutta. Nykyisin pintakasvillisuuden kemiallinen torjunta suositellaan tehtäväksi vasta maamuokkauksen jälkeen, kun maan pinta on kasvittunut (Hytönen ja Hytönen 1998).

Mittauksessa todettujen runkolukujen perusteella taimikuolleisuus oli ollut huomattavaa. Tähän tutkimukseen sisältyneistä Vilppulan ja Toholammin pellonmetsityskokeista on julkaistu useita tutkimuksia, jotka käsittelevät pintakasvillisuuden torjunnan vaikutusta taimien kuolleisuuteen ja kasvuun. Kuolleisuus on ollut suurinta 2–3:n istutusta seuranneen vuoden aikana (Hytönen ja Jylhä 2011), mutta sitä on esiintynyt vielä seitsemännen vuoden jälkeenkin (Hytönen ja Jylhä 2008, 2013). Mekaanista heinätorjuntaa oli tämän tutkimuksen kokeilla jatkettu korkeintaan kolme istutusta seurannutta kasvukautta. Nykyisin suositellut, huomattavasti pienemmät istutus-tiheydet edellyttävät intensiivistä heinätorjuntaa, joka on toistettava useita kertoja. Erityisesti pitkään viljelemättömänä olleet pellot voivat olla työläitä metsitettäviä, sillä heinien ja ruohojen maanpäällinen ja -alainen biomassa on lisääntynyt huomattavasti (Törmälä 1982). Pintakasvillisuus tukahdutti männyn tämän tutkimuksen 17 vuotta viljelemättömänä olleella Leppävirran kokeella niin, että istutus jouduttiin uusimaan (Ferm ym. 1993).

Kokeiden perustamisajankohtana oli käytettävissä tehokkaita maavaikutteisia torjunta-aineita, joilla oli mahdollista saavuttaa hyvä torjuntateho jopa kertakäsittelyllä (Jylhä ja Hytönen 2006). Heinätorjunta maavaikutteisilla torjunta-aineilla oli kuitenkin kallista, koska suositellut käyttömäärät olivat suuria ja torjunta-aineet kalliita. Tällä hetkellä glyfosaatti on ainoa pellonmetsityksillä käytettävissä oleva kemiallinen torjunta-aine. Sen vaikutusaika kestää noin vuoden (Jylhä ja Hytönen 2006). Glyfosaatti soveltuu ainoastaan havupuille, jotka on syytä suojata vaurioiden välttämiseksi myös vuosikasvainten puutumisen jälkeen (Jylhä ja Hytönen 2006). Glyfosaattivalmisteet saattavat poistua markkinoilta lähivuosina (Tukes 2023), joten manuaalinen heinäys on jäljelle jäävistä pintakasvillisuuden torjuntamenetelmistä käyttökelpoisin. Se ei poista maanalaista juuristokilpailua, mutta parantaa taimien asemaa kilpailussa valosta ja estää heinää lakoutumasta syksyllä taimien päälle. Tehokkaalla heinätorjunnalla voidaan pienentää myyrätuhojen ja mahdollisesti myös hyönteisvioletuksista aiheutuvien sienitautien riskiä (Ferm ym. 1994). Kokemukset vaihtoehtoisista heinätorjuntamenetelmistä (katelevyt ja apila peitekasvina) ovat huonoja (Ferm ym. 1994; Jylhä ja Hytönen 2006).

Pellonmetsitys kuusella oli kannattavaa ilman metsitystukea 3 %:n korkokantaan saakka sekä kivennäis- että turvemailla, ja paljaan maan arvo (PMA) pysyi niukasti positiivisena jopa 50 %:n tukkivähennyksellä. PMA oli kuusella ilman metsitystukea ja tukkivähennystä esimerkiksi 3 %:n korkokannalla kivennäismailla noin 2 500 € ha⁻¹ ja turvemailla 1 300 € ha⁻¹. Muilla puulajeilla metsitys oli pääsääntöisesti kannattamatonta ilman metsitystukea, varsinkin turvemailla. Kuusen lisäksi PMA oli positiivinen ainoastaan kivennäismailla männyllä ja rauduskoivulla metsätalouden kannattavuuslaskelmissa yleisesti käytetyllä 3 %:n korkokannalla. Metsitystuki paransi puuntuotannon kannattavuutta olennaisesti. Esimerkiksi kuusella PMA yli kaksinkertaistui kivennäismailla, ja turvemailla metsitystuki paransi metsityksen kannattavuutta vielä enemmän. Turvemaapeltojen metsitys pysyi hieskoivulla 3 %:n korkokannalla metsitystuesta huolimatta kannattamattomana, eikä myöskään kivennäismaapelloille kannattanut istuttaa hieskoivua. Kivennäismailla rauduskoivun ainespuutuotos kiertoaikana oli hieman suurempi kuin männyn (528 vs. 424 m³ ha⁻¹), mutta rauduskoivun kasvatuksen kannattavuus oli kuitenkin heikompi pidemmän kiertoajan ja pienemmän tukkiosuuden vuoksi.

Kannattavuuslaskelmissa ei otettu huomioon korjuukustannuksia, koska hakkuutulot arvoitettiin kantorahana. Hakkuukertymä on yksi tärkeimmistä leimikon markkinakelpoisuuteen vaikuttavista tekijöistä (Kjellberg 2019). Pellonmetsityshankkeet ovat olleet pinta-alaltaan pieniä,

keskimäärin noin 2 ha (Suomen metsäkeskus 2020, 2023). Tavanomaisia leimikkoja pienemmät hakkuukertymät lisäävät korjuukustannuksia ja alentavat kantohintoja. Lisäksi entisellä maatalousmaalla kasvatetun puutavaran huono laatu voi heikentää metsityksen kannattavuutta ja leimikoiden markkinakelpoisuutta.

Kannattavuuslaskelmien oletuksena oli, että toteutuneet toimenpideketjut toistuvat samalaisina ensimmäisestä puusukupolvesta ikuisuuteen. Käytännössä uusi puusukupolvi ensimmäisestä uudistushakkuusta alkaen saadaan aikaan normaalilla metsänuudistamisella, jossa toimenpideketju poikkeaa pellonmetsityksestä. Lisäksi puulaji vaikuttaa kasvupaikan viljavuuteen. Puusukupolvesta toiseen toistuvalla kuusen viljelyllä voi olla kasvupaikkaa köyhdyttävä vaikutus, kun koivun vaikutus on päinvastainen (Smolander ja Priha 2003). Kauaksi tulevaisuuteen ajoittuvilla kustannuksilla ja tuotoilla on kannattavuuslaskelmissa kuitenkin diskonttauksen takia pieni vaikutus lähelle nykyhetkeä sijoituvuuteen verrattuna (rahan aikatekijä; Crundwell 2008), joten seuraavien puusukupolvien metsitysketjuihin liittyvillä oletuksilla ei ole ratkaisevaa vaikutusta kannattavuuteen liittyviin päätelmiin, varsinkin jos laskentakorkokanta on 3 % tai suurempi.

Niskanen (1999) arvioi, että metsitystuet olisivat kansantalouden näkökulmasta tehokkaimpia, jos ne suunnattaisiin heikkotuottoisille kohteille, joilla liiketaloudellinen kannattavuus jää yleensä heikoksi. Toisaalta heikkotuottoisimpien peltojen jättäminen metsittymään luontaisesti voisi olla kansantaloudellisesti kannattava vaihtoehto (Niskanen 1999). Aarnion ja Rantalan (1999) mukaan pellon luontainen metsittäminen hieskoivulla voisi olla yksityistaloudellisesti lähes yhtä kannattava vaihtoehto kuin tavanomainen metsitys. Tällöin maanmuokkaus olisi ainoa aktiivinen toimenpide. Hytösen (1995, 1998) tutkimuksissa lähes puolelle (43–45 %) yli 50 kivennäismaa- ja turvepellosta oli syntynyt luontaista taimiainesta, lähinnä hieskoivua, vähintään 2 000 kpl ha⁻¹ 5–7 vuoden kuluessa maanmuokkauksesta. Tämän tutkimuksen perusteella peltojen luontaisen metsittämisen edellytykset ovat heikot, taimikot eivät olleet juuri täydentyneet luontaisesti.

Niskasen (1999) mukaan puulajivalinta ei ollut metsänomistajan näkökulmasta ratkaiseva kannattavuustekijä 1990-luvulla, jolloin pellonmetsitystä tuettiin voimakkaasti. Tämän tutkimuksen metsiköt perustettiin 1990-luvun alkupuoliskolla metsitystuella. Silloin tuki kattoi taimien ja torjunta-aineiden kustannukset kokonaan. Lisäksi tukea myönnettiin jälkihoidon kustannuksiin, ja maanviljelijät saivat tulonmenetykskorvausta kymmenen vuoden ajan (Hynönen ja Hytönen 1998). Siten esimerkkikohteiden metsitys oli maanomistajille todennäköisesti hyvin kannattavaa. Niskasen (1999) mukaan pellonmetsitystuki olisi kansantalouden näkökulmasta kannattanut suunnata 1990-luvulla viljelyvarmojen puulajien, kuten kuusen kasvatukseen. Tässä tutkimuksessa kuusen kasvatusta olisi ollut kannattavaa ilman tukea kaikilla kasvupaikoilla, jopa turvemailla suurista istutustiheyksistä huolimatta. Muilla puulajeilla kannattava puuntuotanto edellytti tukea.

Puulajin valinnassa ei voida metsitysvaiheessa tukeutua metsätyypittelyyn, eikä pellon maalaji kuvaa hyvin kasvupaikan ominaisuuksia kalkituksen ja toistuvan lannoituksen ja maanmuokkauksen vuoksi. Pellot ovat harvoin niin karuja kasvupaikkoja, että kuusi kärsisi kuivuudesta. Rauduskoivulle huonosti soveltuvia hienojakoisia savimaita on noin viidesosa pelloista (Hynönen ja Hytönen 1998). Halla saattaa vioittaa kuusia erityisesti suopelloilla, mutta tavallisesti valtaosa taimista selviää hallavioituksista (Metsänhoidon suositukset 2024). Halla vaurioitti kuusentaimia useana vuonna Vilppulan ja Toholammin kokeilla (Jylhä ja Hytönen 2006; Hytönen ja Jylhä 2008), mutta siitä huolimatta kuusen puuntuotos oli suurin näillä kokeilla. Myös maisematekijät voivat ohjata puulajin valintaa (Metsänhoidon suositukset 2024).

Vuosina 2021–2023 saatavilla olleen joutoalueiden metsitystuen ensisijaisena tavoitteena oli edistää hiilensidontaa (Laki metsityksen määräaikaisesta tukemisesta 1114/2020). Metsitystuki kiertoaikana sidottua hiilidioksiditonnia kohti oli kuusella pienin sekä kivennäis- että turvemailla (3 %:n korkokannalla 3,7 ja 3,4 € t⁻¹ CO₂⁻¹), joten kuusen kasvatukseen suunnattu tuki oli tehokkaita hiilen-

sidonnan näkökulmasta. Kivennäismailla tuki oli rauduskoivulla ($3,7 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2^{-1}$) yhtä tehokasta, ja turvemaidella männyllä ja hieskoivulla tukea käytettiin lähes yhtä paljon ($4,8$ ja $4,9 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2^{-1}$). Metsitystuet hiilidioksiditonnia kohti ovat varsin pieniä verrattuna voimakkaasti nousseisiin hiilikompensaatioyksiköiden ja päästöoikeuksien hintoihin. Myytyjen hiilikompensaatioyksiköiden hinta oli Suomessa vuoden 2023 ensimmäisellä puoliskolla keskimäärin $37 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2^{-1}$ (PTT 2023), ja Suomen huutokauppaamien päästöoikeuksien keskihinta oli vuonna 2023 jo $83 \text{ € t}^{-1} \text{ CO}_2^{-1}$ (tilanne 18.12.2023; Energiavirasto 2024).

Rauduskoivun tehokkuus hiilen sitojana selittyy lähinnä sillä, että sen puuaineksen tiheys on huomattavasti suurempi kuin havupuilla (Hakkila 1989; Kärkkäinen 2007), ja myös vuosittain muodostuva uusi lehvästö lisää sidotun hiilen määrää. Laskelmissa ei kuitenkaan otettu huomioon maahan kertyvän orgaanisen aineksen (oksat, lehdet ja juuristo) hajoamista ja sen sisältämän hiilen vapautumista. Tässä tutkimuksessa kaikki turvepellot ovat paksaturpeisia myös Kekkosen ym. (2019) käyttämän luokituksen mukaan. Niillä puusto kasvoi hyvin ja satoi hiilidioksidia kiertoaikana keskimäärin $8,3\text{--}11,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Tulos osoittaa, että myös paksaturpeisilla suopelloilla metsityksellä voidaan pienentää selvästi niiden haitallisia ilmastovaikutuksia. Metsitys voi pienentää turvepeltojen hiilipäästöjä myös siksi, että toistuva maanmuokkaus ja lannoitukset loppuvat (Mäkiranta ym. 2007).

Joutoalueiden metsitystuen saannin ehtona oli, että metsitettävälle pellolle ei ollut haettu maataloustukia vuoden 2019 jälkeen (**Laki metsityksen määräaikaisesta tukemisesta 1114/2020**). Pellot olisi kuitenkin hyvä metsittää mahdollisimman pian viljelyn lopettamisen jälkeen, jolloin pintakasvillisuuden kilpailu olisi vähäisempää (Törmälä 1981) ja taimilla olisi paremmat selviytymismahdollisuudet. Tällöin istutustiheydet voitaisiin pitää kohtuullisina, mikä alentaisi metsityskustannuksia. Tyypillisesti täydentävää luontaista taimiainesta syntyy vain vähän pellonmetsityskohteille runsaan pintakasvillisuuskilpailun takia.

5 Päätelmät

Kuusen puuntuotos ja tukkiosuus olivat selvästi suuremmat kuin muilla puulajeilla tähän tutkimukseen sisältyneillä pellonmetsityskokeilla. Myös kuusen hiilensidonta oli tehokasta. Pellot kannattaakin metsittää kuusella, elleivät maan ominaisuudet tai maisematekijät rajoita puulajin valintaa. Kuusen kasvatusta osoittautui kannattavaksi ilman metsitystukeakin sekä kivennäismaa- että turvepelloilla, kun laskentakorko oli 3 %. Normaalista suurempi istutustiheys ja huolellinen pintakasvillisuuden torjunta varmistavat hyvän metsitystuloksen. Onnistuneella metsityksellä voidaan vähentää olennaisesti jopa paksaturpeisten suopeltojen haitallisia ilmastovaikutuksia, mutta niiden metsitykseen tarvitaan huomattavasti enemmän tukea kuin kivennäismaapeltojen. Kannattavaan puuntuotantoon vaadittava metsitystuki on kuitenkin varsin maltillinen sidottua hiilidioksiditonnia kohden.

Tutkimusdatan avoimuus

Aineisto on rajoitetusti saatavilla Tuotantjärjestelmät-yksikön johtajan päätöksellä, ja sen luovuttamisesta tehdään sopimus. Ohjeet aineiston pyytämiseen: <https://www.luke.fi/fi/tietoa-lukesta/asiakirjajulkisuus-ja-tietopyynnnot#tietopyynnnon-toimittaminen-ja-kasittely>.

Kirjoittajien roolit

Kirjoittajat ovat yhdessä vastanneet tutkimuksen suunnittelusta ja tutkimusraportin laadinnasta. Hytönen oli perustamassa metsityskokeita sekä vastasi kokeiden seurannasta ja puustomittauksista. Huuskonen teki simuloinnit ja biomassalaskelmat sekä rakensi yhdessä Ahtikosken kanssa työkalun kannattavuuslaskentaan. Paljaan maan arvon laskenta perustuu Ahtikosken laatimaan kaavaan. Jylhä vastasi metsityskustannusten laskennasta, analysoi aineiston ja kirjoitti artikkelin ensimmäisen version, jota kaikki tutkimukseen osallistuneet henkilöt kommentoivat, täydensivät ja tekivät muita muutoksia. Kaikki kirjoittajat ovat hyväksyneet artikkelin ja vastaavat sen laadusta.

Kiitokset

Seppo Vihanta ja Eero Saari mittasivat tutkimuksen pellonmetsityskokeet. Seppo Vihanta kokosi laskenta-aineiston, jonka Simone Bianchi muokkasi Motti-laskentaan sopivaksi. Jouko Kostamo ja Jorma Vierula antoivat lisätietoja 1990-luvun metsitysketjujen kustannuserusteista.

Rahoitus

Vuonna 2019 tehdyt mittaukset tehtiin Peltoteitot ja suonpohjat metsittämällä hiilinieluiksi -hankkeessa, johon saatiin rahoitusta Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen kautta. Tutkimus viimeisteltiin Luonnonvarakeskuksen ja Suomen metsäkeskuksen yhteisessä Metsitystaito-hankkeessa, jota rahoitti Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelmasta (tukipäätös no. 179911). Päävastuun tämän rahoituksen hankinnasta kantoivat tutkimusprofessori Katri Kärkkäinen Luonnonvarakeskuksesta ja elinkeinopäällikkö Eeva-Liisa Repo Suomen metsäkeskuksesta.

Kirjallisuus

- Aarnio J, Rantala T (1994) Peltojen metsänistutuksen yksityistaloudellinen kannattavuus. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1/1994: 3–17. <https://doi.org/10.14214/ma.6043>.
- Aarnio J, Rantala T (1999) Peltojen luontaisen metsityksen yksityistaloudellinen kannattavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1999: 25–37. <https://doi.org/10.14214/ma.6437>.
- Amacher GS, Ollikainen M, Koskela E (2009) *Economics of forest resources*. The MIT Press, Cambridge.
- Crundwell FK (2008) *Finance for engineers. Evaluation and funding of capital projects*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-033-9>.
- Elonen P (1971) Particle-size analysis of soil. *Acta Agraria Fennica* 122.
- Energiavirasto (2024) Päästöoikeuksien huutokauppa. <https://energiavirasto.fi/huutokauppa>. Viitattu 2.1.2024.
- Faustmann M (1849) Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirthschaft besitzen. [Metsämaan ja puuston arvon laskenta metsätaloudessa]. *Allg Forst Jagdztg* 15: 441–455. (Englanniksi: Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *J For Econ* 1: 7–44).
- Ferm A, Hytönen J, Koski K, Vihanta S, Kohal O (1993) Peltojen metsitysmenetelmät. Kenttäkokeiden esittely ja metsitysten kehitys kolmen ensimmäisen vuoden aikana. *Metsäntutki-*

- muslaitoksen tiedonantoja 463. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1305-0>.
- Ferm A, Hytönen J, Lilja S, Jylhä P (1994) Effects of weed control on the early growth of *Betula pendula* seedlings established on an agricultural field. *Scand J For Res* 9: 347–359. <https://doi.org/10.1080/02827589409382851>.
- Haapaniemi A (2020) Kokemuksia pellonmetsityksestä. Metsitys kestävästi -projektin työpaja 6.3.2020. Tapio Oy. <https://tapio.fi/projektit/metsitys-kestavasti/>. Viitattu 24.5.2024.
- Hakkila P (1989) Utilization of residual forest biomass. Springer-Verlag, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74072-5>.
- Huuskonen S, Lahtinen T, Miina J, Uotila K, Bianchi S, Niemistö P (2023) Growth dynamics of young mixed Norway spruce and birch stands in Finland. *Forests* 14, article id 56. <https://doi.org/10.3390/f14010056>.
- Hynynen J, Ojansuu R, Hökkä, H, Siipilehto J, Salminen H, Haapala P (2002) Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1815-X>.
- Hynynen J, Ahtikoski A, Siitonen J, Sievänen R, Liski J (2005) Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and nontimber production. *Forest Ecol Manag* 207: 5–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.015>.
- Hynynen J, Salminen H, Ahtikoski A, Huuskonen S, Ojansuu R, Siipilehto J, Lehtonen M, Rumukainen A, Kojola S, Eerikäinen K (2014) Scenario analysis for the biomass supply potential and the future development of Finnish forest resources. *Metlan työraportteja* 302. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2487-0>.
- Hynönen T (1997) Turvemaapeltojen metsitystulos Pohjois-Savossa. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 2/1997: 181–199. <https://doi.org/10.14214/ma.6516>.
- Hynönen T (2000) Pellonmetsitysten onnistuminen Itä-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 765. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1725-0>.
- Hynönen T, Hytönen J (1998) Pellosta metsäksi. 2. painos. Metsälehti Kustannus, Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2018092036222>.
- Hynönen T, Saksa T (1997) 1970- ja 1980-luvuilla tehtyjen pellonmetsitysten onnistuminen Pohjois-Karjalassa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1997: 455–476. <https://doi.org/10.14214/ma.6233>.
- Hytönen J (1995) Taimien alkukehitys pellonmetsityskokeilla. Julkaisussa: Hytönen J, Polet K (toim) Metsäntutkimuspäivä Kälviällä 1994. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 540: 12–21. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1412-X>.
- Hytönen J (1998) Hieskoivu pellonmetsityksessä – luontaisesti, kylväen vai viljellen? Julkaisussa: Moilanen M, Murtovaara I (toim) Hieskoivun uudistamisvaihtoehdot ja alikasvosten hyödyntäminen. Metsäntutkimuspäivä Muhoksella 1997. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 717: 39–49. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1662-9>.
- Hytönen J (1999) Pellonmetsityksen onnistuminen Keski-Pohjanmaalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1999: 697–710. <https://doi.org/10.14214/ma.6272>.
- Hytönen J, Jylhä P (2005) Effects of competing vegetation and post-planting weed control on the mortality, growth and vole damages to *Betula pendula* planted on former agricultural land. *Silva Fenn* 39: 365–380. <https://doi.org/10.14214/sf.374>.
- Hytönen J, Jylhä P (2008) Fifteen-year response of weed control intensity and seedling type on Norway spruce survival and growth on arable land. *Silva Fenn* 42: 355–368. <https://doi.org/10.14214/sf.242>.
- Hytönen J, Jylhä P (2011) Long-term response of weed control intensity on Scots pine survival, and growth and nutrition on former arable land. *Eur J For Res* 130: 91–98. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0371-6>.
- Hytönen J, Jylhä P (2013) Long-term effect of weed control on survival and growth of silver birch

- planted on arable land. *Baltic For* 19: 170–178.
- Hytönen J, Pietiläinen P (1995) Turvepeltojen lannoitus ravinne-epätasapainon korjaamiseksi. Julkaisussa: Hytönen J, Polet K (toim) Peltojen metsitysmenetelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 581: 149–164. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1488-X>.
- Hytönen J, Wall A (1997) Metsitettyjen turvepeltojen ja viereisten suometsien ravinne- ja hiilidioksidipitoisuudet. *Suo – Mires and Peat* 48: 33–42.
- Hytönen J, Saramäki J, Niemistö P (2013) Growth, stem quality and nutritional status of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in pure stands and mixtures. *Scand J For Res* 29: 1–11. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.838300>.
- Hytönen J, Jylhä P, Little K (2017) Positive effects of wood ash fertilization and weed control on the growth of Scots pine on former peat-based agricultural land – a 21-year study. *Silva Fenn* 51, article id 1734. <https://doi.org/10.14214/sf.1734>.
- Isoniemi M (2020) Potentiaalisten metsityskohteiden kartoitus suonpohjilla ja peltoheitoilla. Suonpohjat ja peltoheito metsittämällä hiilinieluiksi -hanke, 15.1.2020. <https://www.slideshare.net/Metsakeskus/potentiaalisten-metsityskohteiden-kartoitus-suonpohjilla-ja-peltoheitoilla>. Viitattu 15.9.2023.
- Jylhä P, Hytönen J (2006) Effect of vegetation control on the survival and growth of Scots pine and Norway spruce planted on former agricultural land. *Can J For Res* 36: 2400–2411. <https://doi.org/10.1139/x06-053>.
- Kekkonen H, Ojanen H, Haakana M, Latukka A, Regina K (2019) Mapping of cultivated organic soils for targeting greenhouse gas mitigation. *Carbon Manag* 10: 115–126. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1557990>.
- Kiirikki M (1993) Seed bank and vegetation succession in abandoned fields in Karkali Nature Reserve, southern Finland. *Ann Bot Fenn* 30: 139–152.
- Kinnunen K (1995) Käytännön pellonmetsitysten onnistuminen ja tuotos. Julkaisussa: Hytönen J, Polet K (toim) Peltojen metsitysmenetelmät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 581: 53–62. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1488-X>.
- Kinnunen K, Aro L (1996) Vanhojen pellonmetsitysten tila Länsi-Suomessa. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 2/1996: 101–111. <https://doi.org/10.14214/ma.5799>.
- Kjellberg L (2019) Mikä takaa leimikon kysynnän? Tieyhteys ja leimikon riittävä koko ovat valttia puukaupassa. *Metsälehti* 2.1.2019. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/mika-takaa-leimikon-kysynnän/>. Viitattu 20.12.2023.
- Koistinen A (2020) Metsitystoimenpiteiden kustannukset teetettynä (€/ha) sisältäen työnjohdon ilman ALV:tä, oletuksena alueen koko 2 ha. Julkaisematon aineisto. 1.12.2020. Tapio Oy.
- Kostamo J, Niemelä H, Joensuu S, Vierula J (1993). *Hankesysteemi, käyttäjän opas, osa 2*. 12.3.1993. Metsäkeskus Tapio.
- Kärkkäinen M (2007) Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus Oy, Helsinki.
- de Laeter JR, Böhlke JK, De Bièvre P, Hidaka H, Peiser HS, Rosman KJR, Taylor PDP (2003) Atomic weights of the elements. Review 2000 (IUPAC Technical Report). *Pure Appl Chem* 75: 683–800. <https://doi.org/10.1351/pac200375060683>.
- Lee D, Siipilehto J, Miina J, Niemistö P, Haapanen M, Hynynen J, Huuskonen S (2024) Site index and stand characteristic models for silver birch plantations in southern and central Finland. *Forest Ecol Manag* 563, article id 121998. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121998>.
- Luonnonvarakeskus (2022) Kasvihuonekaasuinventaarion ennakkotiedot vahvistavat: maankäyttösektori päästölähde vuonna 2021, metsät pysyivät edelleen nettonieluna. *Seurantajulkistus* 14.12.2022. <https://www.luke.fi/fi/seurannat/maatalous-ja-lulucfsektorin-kasvihuonekaasuinventaarion-ennakkotiedot-vahvistavat-maankayttosektori-paastolahde-vuonna-2021-metsat-pysyivat-edelleen-nettonieluna>. Viitattu 31.1.2023.

- Luonnonvarakeskus (2023) Tilastopalvelut. <https://www.luke.fi/fi/tilastot>. Viitattu 31.1.2023.
- Metsäalan työehtosopimus 1.2.2020–31.1.2022. Maaseudun Työnantajaliitto, Metsähallitus, Yksityismetsätalouden Työnantajat, Teollisuusliitto.
- Metsänhoidon suositukset (2024) Tapio. <https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi>. Viitattu 23.5.2024.
- Mäkiranta P, Hytönen J, Aro L, Maljanen M, Pihlatie M, Potila H, Shurpali NJ, Laine J, Lohila A, Martikainen P, Minkkinen K (2007) Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Env Res* 12: 159–175.
- Niemistö P (2008) Raudus- ja hieskoivun erot kasvukyvystä. Julkaisussa: Niemistö P, Viherä-Aarnio A, Velling P, Heräjärvi H, Verkasalo E (toim) Koivun kasvatus ja käyttö. Metsäkustannus Oy, s. 126–127.
- Niemistö P, Hallikainen V (2021) Puutason mallit tukin ja ainespuun osuuksille istutettujen rauduskoivujen päätehakuussa. *Metsätieteen aikakauskirja*, artikkelitunnus 10538. <https://doi.org/10.14214/ma.10538>.
- Niemistö P, Hukki P, Verkasalo E (1997) Kasvupaikan ja puuston tiheyden vaikutus rauduskoivun ulkoiseen laatuun 30-vuotiaissa istutuskoivikoissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1997: 349–374. <https://doi.org/10.14214/ma.6476>.
- Niskanen A (1999) The financial and economic profitability of field afforestation in Finland. *Silva Fenn* 33: 145–157. <https://doi.org/10.14214/sf.664>.
- Näslund M (1936) Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. Zusammenfassung: Die Durchforstungsversuche der forstlichen Versuchsanstalt Schwedenes in Kiefernwald. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 28.1.
- Paatela J, Erviö L-R (1971) Weed seeds in cultivated soils in Finland. *Ann Agr Fenn* 10: 144–152.
- PTT (2023) Hiilimarkkinoiden tilasto 2023, alkuvuosi: myytyjen yksiköiden määrä väheni verrattuna viime vuoteen. Tiedote 9.10.2023. <https://www.ptt.fi/hiilimarkkinoiden-tilasto-2023-alkuvuosi-myytyjen-yksikoiden-maara-vaheni-verrattuna-viime-vuoteen/>. Viitattu 2.1.2024.
- Repola J (2008) Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fenn* 42: 605–624. <https://doi.org/10.14214/sf.236>.
- Repola J (2009) Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fenn* 43: 625–647. <https://doi.org/10.14214/sf.184>.
- Rossi S, Varmola M, Hyppönen M (1993) Pellonmetsitysten onnistuminen Lapissa. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 807. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1302-6>.
- Salminen H, Lehtonen M, Hynynen J (2005) Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Comput Electron Agr* 49: 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.02.005>.
- Smolander A, Priha O (2003) Puulajin merkitys metsämaan viljavuuden hoidossa. Julkaisussa: Mälkönen E (toim) Metsämaa ja sen hoito. Metsäntutkimuslaitos & Metsälehti Kustannus, s. 155–158. ISBN 952-5118-57-6.
- Strandström M (2023) Metsäteho Oy. Arvio varhaisperkauksen, taimikonhoidon ja ennakkoraivauksen keskimääräisestä tuntikustannuksesta. Sähköpostiviesti 17.3.2023.
- Suomen metsäkeskus (2020) Valtion tuella rahoitettujen pellonmetsitysten toteutusmäärä vuosina 2010–2019. Julkaisematon aineisto.
- Suomen metsäkeskus (2023) Joutoalueiden metsitystuki, 21.12.2023 mennessä hyväksytyjen pellonmetsityshankkeiden pinta-alat. Julkaisematon aineisto.
- Thomas SC, Martin AR (2012) Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests* 3: 332–352. <https://doi.org/10.3390/f3020332>.
- Tilastokeskus (2023a) Rahanarvomuunnin. <https://www.stat.fi/tup/laskurit/rahanarvonmuunnin.html>. Viitattu 30.6.2023.
- Tilastokeskus (2023b) Suomen virallinen tilasto (SVT): kuluttajahintaindeksi. <https://stat.fi/tilasto/>

- khi. Viitattu 31.1.2023.
- Tukes (2023) Glyfosaatin uudelleen hyväksymiselle ei saatu EU:n jäsenmaiden enemmistön tukea. Uutinen 13.10.2023. <https://tukes.fi/-/glyfosaatin-uudelleen-hyvaksymiselle-ei-saatu-eu-n-jasenmaiden-enemmiston-tukea>. Viitattu 18.12.2023.
- Tähkänen M (2023) Yksityismetsätalouden Työnantajat ry. Laskennallinen metsänhoitotöiden sivukuluprosentti vuonna 2021 ilman raivaussahaa tehdyissä metsänhoitotoissa. Suullinen tiedonanto 27.6.2023.
- Törmälä T (1982) Structure and dynamics of reserved field ecosystem in central Finland. Biological Research Reports from the University of Jyväskylä 8. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-9077-0>.
- Valtanen J (1991) Peltojen metsityksen onnistuminen Pohjois-Pohjanmaalla 1970-luvulla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 381. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1153-8>.
- Valtioneuvosto (2023) Vahva ja välittävä Suomi. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58.
- Vanninen P, Ylitalo H, Sievänen R, Mäkelä A (1996) Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees* 10: 231–238. <https://doi.org/10.1007/BF02185674>.
- Venäläinen A, Tuomenvirta H, Pirinen P, Drebs A (2005) A basic finnish climate data set 1961–2000 – description and illustrations. Raportteja 2005:5. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- Verohallinto (2020) Verohallinnon päätös verovapaista matkakustannusten korvauksista vuonna 2021. 24.11.2020. Dnro VH/7555/00.01.00/2020.
- Vierula J (2023) Suullinen tiedonanto 27.8.2023.
- Vuokila Y, Väliäho H (1980) Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 99.2: 1–27. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171129>.
- Wall A (2005) Soil water-retention characteristics and fertility of afforested arable land. Diss For 14. <https://doi.org/10.14214/df.14>.
- Wall A, Hytönen J (1996) Painomaan vaikutus metsitetyn turvepellon ravinnemääriin. *Suo – Mires and Peat* 47(3): 73–83.
- Wall A, Hytönen J (2005) Soil fertility of afforested arable land compared to continuously forested sites. *Plant Soil* 275: 247–260. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-1869-4>.
- Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Väisänen P (toim) (2019) Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja. Tapio Oy, Helsinki. ISBN 978-952-5632-75-0.

79 viitettä.