

Taimikoiden pituuskehityksen luotettavuus sovellettaessa MOTTI-ohjelmiston kangasmaiden ennustemalleja turvekankaille

Jouni Siipilehto, Markku Saarinen ja Hannu Hökkä

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18
01301 Vantaa
puh. 029 532 2111
faksi 029 532 2103
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 029 532 2111
faksi 029 532 2103
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät			
Siipilehto, Jouni, Saarinen, Markku & Hökkä, Hannu			
Nimeke			
Taimikoiden pituuskehityksen luotettavuus sovellettaessa MOTTI-ohjelmiston kangasmaiden ennustemalleja turvekankaille			
Vuosi	Sivumäärä	ISBN	ISSN
2014	25	978-951-40-2473-3 (PDF)	1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet			
VA // 3587 Metsikködynamiikan ennustaminen ja MOTTI-ohjelmiston kehittäminen; 35802 Varhaiskehityksen ennustaminen; 355102 Suometsien luntainen uudistaminen; 3484 Suometsien uudistaminen			
Hyväksynyt			
Jari Hynynen, erikoistutkija, 5.5.2014			
Tiivistelmä			
<p>Kangasmailta on laadittu useita malleja taimikoiden kehityksestä, joten alkukehitys tunnetaan melko hyvin. Turvemaiden osalta tilanne on toinen. Turvemaiden uudistaminen on tullut ajankohtaiseksi ja ojitusalueiden puustoja tulee vuosittain yhä enemmän uudistuskypsyteen. Toisen sukupolven turvemaiden puustoja on toistaiseksi vähän ja ne ovat pääasiassa liian nuoria mallien laadintaan. Toisaalta on selvää, että viljellen tai luontaisesti perustettava uusi puusukupolvi on rakenteeltaan tasaisempi, kuin ojitusajankohdan erirakenteinen ensimmäinen puusukupolvi. Puuston rakenteellisen tasoittumisen ja lisäksi turvekankaiden ja kangasmaiden kasvupaikkavastaavuuden vuoksi voitiin olettaa, että kangasmaiden puustotunnusmallit olisivat käyttökelpoisia kuvaamaan turvekankaiden uuden puusukupolven kehitystä.</p> <p>Tässä raportissa verrattiin turvekankaiden käytännön uudistusalojen testiaineiston avulla mänty- ja kuusitaimikoiden keski- ja valtapituuden kehitystä MOTTI-ohjelmiston ennustamaan kehitykseen. Istutetun kuusen kehitykselle on kaksi vaihtoehtoista malliperhettä. Toinen perustuu kangasmaiden INKA- ja TINKA-koealoihin, jotka on perustettu pääosin 80-luvulla (MOTTI 2.0) ja toinen perustuu 90-luvun lopulla kerättyyn aineistoon edustaen nykyaikaista metsänkäsittelyä, jossa kuusen paakkutaimet istutetaan muokattuun kangasmaahan (MOTTI 3.0). Edellinen osoittautui tarkemmaksi ruohoturvekankaiden ja jälkimmäinen mustikka- ja puolukkaturvekankaiden kuusen istutusaloilta. Turvekankailla tyypillisimpiä taimikoita olivat puolukkaturvekankaan männiköt ja mustikkaturvekankaan kuusikot, joilla saatiin myös luotettavimmat tulokset. Ruohoturvekankailla kuusen pituuskehitys tuli yliarvioitua, etenkin MOTTI 3.0 versioilla ja varputurvekankailla männiköiden pituuskehitys puolestaan aliarvioitiin. Saatua tulosta selittää se, että kasvupaikkojen välinen vaihtelu oli aineiston turvekankailla selvästi pienempää kuin niihin rinnastetuilla kangasmaiden kasvupaikoilla. Oletusten vastaisesti ruohoturvekankaiden valtapituuskehitys jäi jälkeen mustikka- ja puolukkaturvekankaan kehityksestä. Tämä saattoi johtua ruohoturvekankaiden pintakasvillisuuden aiheuttamasta voimakkaasta kilpailusta.</p> <p>Kasvupaikkaluokan lisäksi MOTTI-mallien ennustevirheeseen vaikutti maanmuokkaus. Männyn pituuskehitys yliarvioitiin muokkaamattomalla ja äestetyllä pinnalla ja aliarvioitiin laikutus- ja mätätysmenetelmillä. Kuusen keskipituuden harhassa havaittiin trendi mutta valtapituudessa ei havaittu samanlaista systemaattista virhettä muokkauksen suhteen. Pituuden ennustevirheeseen ei vaikuttanut turpeen paksuus, taimikon kokonaistiheys tai maantieteellinen sijainti. MOTTI-ohjelmisto ennustaa uudistusaloille syntyvän sekapuuston määrän kasvupaikan, pääpuulajin ja muokkausmenetelmän mukaan. Ennusteet sekapuuston määrästä vastasivat aineiston keskimääräisiä tiheyksiä muokatuilla uudistusaloilla, mutta muokkaamattomille aloille ennusteet olivat n. 3 500 ha⁻¹ pienempiä kuin aineistossa. Kuusen menestyminen oli epävarmaa pintamuokatuilla uudistusaloilla, joilla viljelytaimia oli keskimäärin alle 1 400 ha⁻¹.</p>			
Asiasanat			
ennustaminen, mallit, metsänuudistus, turvemaat			
Julkaisun verkko-osoite			
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp294.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot			
Jouni Siipilehto, Jokiniemenkuja, 01301 Vantaa. Sähköposti jouni.siipilehto@metla.fi			
Muita tietoja			
taitto Anne Siika/Metla			

Sisältö

1 Johdanto	5
2 Aineisto ja menetelmät	6
2.1 Turvekankaiden aineisto	6
2.2 Kangasmaiden puustotunnusmallit.....	8
2.3 Nykykäytännön mukaisesti istutetun kuusikon pituuskasvu	10
2.4 MOTTI-mallien luotettavuuden arviointi	11
3 Tulokset	12
3.1 Valtapituuden kehitys turvekankailla ja MOTTI-mallien nnustamana.....	12
3.2 Pituuden luotettavuus MOTTI-malleja turvekankaille sovellettaessa.....	13
3.2.1 Luotettavuus syntytaivoittain	13
3.2.2 Luotettavuus kasvupaikoittain	14
3.2.3 Muokkauksen ja turpeen paksuuden vaikutus luotettavuuteen	16
3.2.4 Ennustevirheet lämpösumman ja sekapuuston osuuden suhteen	18
3 Tulosten tarkastelua	19
Kirjallisuus	22
Liite	25

1 Johdanto

Taimikoiden alkukehitys tunnetaan kohtalaisen hyvin kangasmailla, varsinkin männyn taimikoissa. Männyn taimikoiden rakennetta ja puuston alkukehitystä on tutkittu useasta eri näkökulmasta. Esimerkkejä ovat taimikon vakiintumisen seuranta (Saksa 1998), puustotunnusten iänmukainen kehitys (Varmola 1993, Huuskonen & Miina 2007, Siipilehto 2011), taimikon harvennuksen vaikutus ensiharvennuskertymään (Huuskonen & Hynynen 2006) ja männyn taimikon pituusjakauma (Siipilehto 2009). Kuusen taimikoista malleja on vähemmän. Valkonen (1997) julkaisi viljelykuusikon alkukehitystä kuvaavat mallit puustotunnuksille ja pituusjakaumalle. Siipilehto (2006) laati kuusikoiden puustotunnusmallit pienistä taimikoista aina uudistuskypsyysasteen asti. Saksa ym. (2005) julkaisivat mallit nyky menetelmin perustettujen viljelykuusikoiden keskipituuden alkukehityksestä. Taimikoiden alkutilaa on tarkasteltu noin neljävuotisten taimikoiden alkutiheyden ja keskipituuden malleilla männiköiden ja kuusikoiden laajoista inventointiaineistoista (Miina & Saksa 2008, 2013). Turvemaille ei ole tehty vastaavia valtakunnallisesti yleistettäviä metsikkötason puustotunnusmalleja, mutta puutason malleja on olemassa ojituksen jälkeisen ensimmäisen puusukupolven puiden kehityksen ennustamiseksi (esim. Hökkä 1997a, 1997b, Hökkä ym. 1997, Hynynen ym. 2002). Turvemaille on laadittu metsikkötason malleja rajoitetusti esim. tiettyihin kuusivaltaisten ojitusalueiden harvennuskokeisiin (Repola ym. 2006) ja keskisuomalaisten varttuneiden rämemänniköiden hydrologiaan liittyviin koekenttiin perustuen (Hökkä ym. 2008).

Metsäntutkimuslaitoksen metsiköiden kasvu- ja tuotossimulaattorissa, MOTTI-ohjelmistossa käytettävät puustotunnusmallit perustuvat kangasmaiden 70–80 -luvulla perustetuilta kokeilta laadittuihin malleihin kuuselle (Siipilehto 2006) ja saman sukupolven vastaaviin julkaisemattomiin malleihin männylle ja koivulle. MOTTI-päivityksen myötä kuusen malleihin on tullut muutoksia. MOTTI 2.0 (1.1.2006) mallit kuusikoille perustuvat edelleen em. aineistoon, mutta päivitetty istutuskuusikoiden mallit MOTTI 3.0 versiossa (27.11.2012) ovat paremmin nykyisten muokkausmenetelmien ja kuusen paakkutaimien kehitystä vastaavia kangasmailla (ks. Saksa ym. 2005, Siipilehto ym. 2014). MOTTI-ohjelmistossa ojitettujen soiden metsiköt ovat puutason malleihin (Hökkä 1997b, Hökkä ym. 1997) perustuen edustettuina vain ”riukuvaiheen” varttuneista taimikoista eteenpäin.

Metsämaan muokkauksella pyritään luomaan suotuisat olosuhteet taimen alkukehitykselle. Muokkausjäljessä siemenen itäminen on varmempaa ja taimien alkukehitys nopeampaa kuin muokkaamattomassa pinnassa (ks. Luoranen ym. 2007). Muokkausmenetelmä vaikuttaa paitsi viljeltävään pääpuulajiin, myös kilpailevan sekapuuston tiheyden luontaisen taimettumisen ja vesottumisen kautta. Luorasan ym. (2007) mukaan äestys rikkoo maanpintaa noin 27 %, laikutus 10–12 % ja mätätysmenetelmistä navero- ja ojitusmätätys 13–16 %, laikkumätätys 19–24 % ja kääntömätätys 10–12 %. Nykyisessä MOTTI 3.0 versiossa rikotun maanpinnan osuus vaikuttaa syntyvän sekapuuston määrään.

Turvemaiden ojitusalueiden uudistuskypsyttä lähestyvien metsiköiden määrä kasvaa kiihtyvällä vauhdilla vuosittain. Suurin osa näistä on mäntyvaltaisia metsiköitä (Saarinen 2013, Hökkä ym. 2012). Tällä hetkellä MOTTI-ohjelmisto ei tue vaihtoehtoisten uudistusmenetelmien tarkastelua turvemaille, koska turvemaiden puuston alkukehityksen kuvaukseen ei ole olemassa malleja. Ainoat varhaiskehitykseen vaikuttavat turvemaiden MOTTI-mallit ennustavat turvemaiden uudistusaloille syntyvän sekapuuston määrän ja puulajisuhteet (Siipilehto ym. 2014). Sekapuuston kilpailu vaikuttaa pituuskehitykseen. Siksi pituustunnusten lisäksi MOTTI-mallien ennustamaa sekapuuston määrää verrattiin turvekankaiden testiaineistossa havaittuun sekapuuston määrään. Tutkimuksen pääasiallisena tarkoituksena oli testata sitä, miten hyvin jo olemassa olevat kangasmaiden taimikoiden puustotunnusmallit soveltuvat kuvaamaan ojitettujen turvekankaiden toisen puusukupolven keski- ja valtapituuden alkukehitystä käytännön uudistusaloilla.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Turvekankaiden aineisto

Turvekankailta kerätty aineisto on satunnaisotos ojitusalueiden toisen sukupolven kuusikoista sekä männiköistä. Otos poimittiin kahdesta eri perusjoukosta, joista toinen edusti yksityismaiden ja toinen valtionmaiden metsänuudistusaloja. Ensin mainittu perusjoukko käsitti kaikki Lounais-Suomen, Etelä-Pohjanmaan, Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan metsäkeskusten metsänkäyttöilmoitusten mukaiset turvemaiden uudistusalat, joiden uudistamistoimenpiteet oli toteutettu vuosina 1997–2001. Inventointihetkellä aika uudistamistoimenpiteestä oli 5–10 vuotta. Toinen perusjoukko käsitti kaikki Metsähallituksen hoidossa olevat valtionmaan uudistusalat turvemailla Lapin lääniä lukuun ottamatta siten, että aika uudistamistoimenpiteistä oli 5–13 vuotta.

Maastotyöt tehtiin yksityismailla vuonna 2006 ja 2007 ja valtionmailla vuonna 2008 ja 2009. Yhteensä aineisto käsitti 87 taimikkoa yksityismailla ja 105 taimikkoa valtionmailta. Valtaosa uudistusaloista oli männyn istutusta, mutta myös luontaisten mäntytaimikoiden osuus oli suuri. Tarkempi taimikoiden jakaantuminen pääpuulajin, syntyvän ja kasvupaikan mukaan on esitetty taulukossa 1. Uudistusala oli muokattu äestämällä (26 kpl), laikuttamalla (20 kpl) tai mätästämällä (111 kpl). Äestys ja laikutus ovat ns. pintamuokkausmenetelmiä. Mätästys oli pääasiassa ojitusmätästystä, joskin vähäisessä määrin myös navero-, laikku- ja kääntömätästystä. Muokkaamattomia uudistusaloja oli 18 ja muokkauksesta ei ollut tietoa 22 uudistusosalalla.

Taimikot inventoitiin ympyräkoaloilta. Ensimmäinen koela sijoitettiin puolen koelavälin päähän uudistusalan reunasta. Ensimmäisen koelan sijainti suunniteltiin ennalta metsänkäyttöilmoituksessa tai kartassa olevalle kuviolle. Kaikki koelat sijoitettiin systemaattisesti ojien suhteen poikkisuuntaisiin linjoihin tai, jos se ei ollut mahdollista, päähänsuuntiin valitun koelavälin mukaisesti. Mikäli koela osui kiveen tai ojaan, siirrettiin koelaa linjalla 5 m eteenpäin tai taaksepäin. Koelan kokona käytettiin 10 neliömetrin ympyräalaa (säde 1,78 m). Koelaväli valittiin kuvion koon mukaan siten, että 0,5–1,5 hehtaarin laajuisilla uudistusaloilla koeloa oli viisi, 1,5–2,5 hehtaarin uudistusaloilla kymmenen ja 2,5–5 hehtaarin aloilla viisitoista.

Jokaiselta koelalta luettiin ositteittain (syntytyyppi ja puulaji) yli 10 cm pituisten taimien lukumäärä ja mitattiin valtapituus, keskipituus, keskiläpimitta ja ikä. Edellisten taimikkotunnusten lisäksi määritettiin kasvatettavan puuston runkoluku. Kasvatettavien puiden runkolukuun laskettiin kaikki kehityskelpoiset havupuut, jotka kuuluivat vallitsevaan puujaksoon. Vesasyntyisistä koivuista laskettiin mukaan vain valtavesa, eli yhdestä tuppaa otettiin vain pisin mukaan ja jätettiin muut laskematta. Kehityskelpoisena kasvatettavana puustona huomioitiin myös uudistettavasta puulajista poikkeava puulaji, jos uudistettavan puulajin taimia ei näytealalla esiintynyt.

Taimikon valtapituus määritettiin hehtaaria kohden sadan pisimmän puun keskiarvona, jotta se vastaisi mahdollisimman hyvin MOTTI-mallien valtapituustunnusta. Tässä aineistossa rinnakorkeudelta 100 paksuimman puun keskiarvoa ei voitu käyttää, koska pituus oli usein alle rinnakorkeuden ja rinnakorkeusläpimittaa ei siten ollut. Kun 10 m^2 :n koelajien lukumäärä oli 10, niin pisin puu yksinään edusti 100 puuta hehtaarilla. Kun koeloa oli 15, valtapituus laskettiin pisimmän ja toiseksi pisimmän puun avulla painottaen pisintä puuta kahdella. Jos koeloa oli 5, pisin puu edusti 200 puuta hehtaarilla. Aineistosta estimoitiin malli korjauskertoimeksi, jolla otoskoon pienuudesta (koelaja < 10) johtuva valtapituuden laskeva trendi poistettiin: Korjauskerroin = $1 - 0,18 \times \ln(\text{koelaja}/10)$. Kun koelaja oli 5, havaittua pisimmän puun pituutta korotettiin 12 %, ja saatua pituutta käytettiin taimikon valtapituuden estimaattina.

Taulukko 1. Turvekankaiden keskitunnuksia pääpuulajin, syntyvän ja kasvupaikan mukaan luokiteltuna.

Puulaji	Osite	Taimikoita	<i>T</i> , v	<i>N</i> , ha ⁻¹	<i>H</i> , m	<i>Hdom</i> , m	<i>Nt</i> , ha ⁻¹
Mänty	Luontainen	52	8,0	4 462	0,9	2,0	11 095
	Kylvö	19	7,3	5 385	0,9	1,8	14 640
	Istutus	61	8,1	2 074	1,4	2,2	17 595
Kuusi	Luontainen	9	8,6	3 268	0,8	2,2	13 670
	Kylvö	1	9,0	1 400	0,6	1,6	4 405
	Istutus	50	9,2	1 976	1,1	1,8	16 045
Mänty	Mtkg	14	7,9	1 776	1,0	1,7	18 910
	Ptkg	100	8,2	3 234	1,2	2,3	15 825
	Vatkg	18	8,0	4 042	1,1	2,2	8 960
Kuusi	Rhtkg	13	10,4	2 067	1,1	1,9	13 200
	Mtkg	35	8,8	2 135	1,0	1,9	15 935
	Ptkg	12	8,7	2 200	1,1	1,8	17 805
Kuusi ^a	Rhtkg	13	10,9	1 900	1,2	1,9	13 395
	Mtkg	26	8,7	2 002	1,1	1,9	17 270
	Ptkg	9	9,0	2 080	1,2	2,0	18 570

^a Tässä ositteessa laskennassa oli mukana vain muokkausjälkeen istutetut kuuset, joiden pituuskehitys ennustettiin kahdella vaihtoehdoisella menetelmällä

T = pääpuulajiositteen keskimääräinen kokonaisikä, vuotta

N = pääpuulajiositteen runkoluku, ha⁻¹

H = pääpuulajiositteen aritmeettinen keskipituus, m

Hdom = pääpuulajiositteen valtapituus (hehtaaria kohti 100 pisimmän puun keskipituus), m

Nt = kokonaisrunkoluku, jossa kaikki puusto-ositteet ovat mukana, ha⁻¹

Taulukosta 1 nähdään, että turvekankaiden taimikot olivat vielä nuoria, keskimäärin alle 10-vuotiaita. Keskimäärin taimikoiden keskipituus oli noin 1 m ja valtapituus noin 2 m. Viljelymetsissä valtapituudet olivat suurimmillaankin alle 5 m ja luontaisesti syntyneissä alle 8 m (ks. kuva 3). Pääpuulajin tiheys oli pääsääntöisesti uudistumisen kannalta riittävä (> 1 900 ha⁻¹). Pienimmät tiheydet pääpuulajin osalta tavattiin kuusen kylvössä (1 400 ha⁻¹, vain yksi taimikko) ja männyllä mustikkaturvekankailla (1 776 ha⁻¹).

Pääosaltaan hieskoivusta muodostunut sekapuusto oli hyvin runsasta. Kasvatuskelpoisten (> 10 cm) taimien kokonaisrunkoluku (*Nt*) oli keskimäärin jopa kuusinkertainen istutetun pääpuulajin tiheyteen verrattuna (taulukko 1). Hieskoivua tavattiin sekapuuna lähes jokaisesta taimikosta. Sen keskipituus oli 1,7 m ja valtapituus 2,6 m ja sen keskimääräinen tiheys oli 11 010 runkoa hehtaarilla. Muuta lehtipuuta, joka oli tyypillisesti pajua, tavattiin 48 taimikosta ja sen keskipituus oli 1,7 m ja keskimääräinen tiheys 1 257 runkoa hehtaarilla näissä taimikoissa. Koko aineiston yli lasketut keskiarvot (ja keskihajonnat) olivat *T*: 8,4 (2,2) v; *N*: 2 854 (2 045) ha⁻¹; *H*: 1,1 (0,5) m; *Hdom* 2,1 (1,0) m ja *Nt*: 15 390 (8 080) ha⁻¹. Keskimääräinen lämpösumma oli 1 123 vuorokausiastetta ja se vaihteli välillä 853–1 307 °Cvrk.

2.2 Kangasmaiden puustotunnusmallit

MOTTI -ohjelmiston puustotunnusmallit perustuvat 70– ja 80-luvulla valtakunnan metsien setsemännän ja kahdeksannen inventoinnin (VMI7, VMI8) koealaverkkoon perustettuihin kangasmaiden talousmetsien INKA- ja TINKA-kokeisiin (Gustavsen ym. 1988). INKA-kokeissa kaikki kangasmaiden kasvupaikat ovat edustettuina niiden suhteellisen pinta-alaosuuden mukaan. Sen sijaan taimikoiden TINKA-kokeet on perustettu vain tyypillisimmille kasvupaikoille eli männyn taimikot olivat tuoreilla, kuivahkoilla ja kuivilla kankailla ja kuusen taimikot lehtomaisilla ja tuoreilla kankailla. MOTTI-mallien laadinnassa käytettiin INKA-aineiston ensimmäistä ja TINKA-aineiston toista mittauskertaa (Siipilehto 2006). Männiköitä oli 611 ja kuusikoita 229. Koska INKA-aineistossa oli vain 26 koivikkoa, niin koivun mallien laadintaan otettiin lisäksi sekapuuna kasvaneen koivun puustotunnukset männyn ja kuusen INKA- ja TINKA-kokeilta. Näin saatiin 176 metsikön aineisto koivulle.

Puustotunnusmallit oletettiin tulomuotoisiksi ($Y = ax_1^{a_1}x_2^{a_2}\dots x_n^{a_n}$) ja ne linearisoitiin logaritmi-muunnoksen avulla. Aineistoon sovitettujen linearisoitujen puustotunnusmallien yleinen muoto oli:

$$\ln(Y) = a_0 + a_1 \ln(T) + a_2 T^k + a_3 \ln(LS) + a_4 ST \times T^k + a_j KP_j + \varepsilon, \quad (1)$$

jossa puustotunnus (Y) ennustetaan metsikön kokonaisuuden (T), lämpösumman (LS), kasvupaikka-tyypin (KP) ja metsikön syntytyypin (ST) avulla. Eksponentti k oli joko -0,5 tai -1.

Ennustettavia puustotunnuksia olivat puuston pohjapinta-ala (G , m^2ha^{-1}), runkoluku (N , ha^{-1}), aritmeettinen keskiläpimitta (D , cm) ja -pituus (H , m), pohjapinta-alan mediaaniläpimitta (dgM , cm) ja -pituus (hgM , m) sekä valtaläpimitta ($Ddom$, cm) ja -pituus ($Hdom$, m). Lämpösumma ($^{\circ}Cvrk$) kuvasi metsikön maantieteellistä sijaintia. Kasvupaikka ja syntytyyppi kuvattiin ns. valemuuttujana (dummy), joka sai arvon yksi, kun kyseinen vaikutus oli tosi ja arvon nolla, kun vaikutus oli epätosinen. Siten esimerkiksi istutuksen vaikutusta kuvaava valemuuttuja, istutus = 1, kun syntytyyppi oli istutus ja istutus = 0, kun syntytyyppi oli kylvä tai luontainen.

Puustotunnusmallit on laadittu erikseen männylle, kuuselle ja koivulle. Näistä malleista vain kuusen mallit on julkaistu (Siipilehto 2006). Kuusen ja koivun malleissa perustaso (valemuuttujat nolli) oli tuore kangas ja männyn malleissa kuivahko kangas syntytyyvoiltään luontaisissa metsiköissä. Rauduskoivu ja hieskoivu mallitettiin yhtäaikaaisesti, mutta lajien erot kuvattiin hieskoivu valemuuttujan avulla.

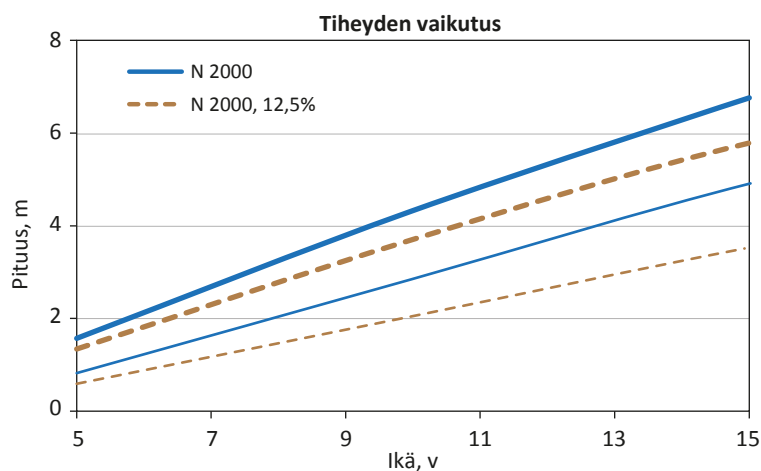
Puustotunnukset estimoitiin yhtäaikaaisesti (näennäisesti riippumaton regressio eli seemingly unrelated regression, SUR) ja ne olivat kalibroituissa lineaarisen ennustamisen teorian mukaisesti (ks. Lappi 1993, s. 74). Puustotunnusmallien virheiden (ε) välille laskettiin kovarianssimatriisi, jonka avulla malleja kalibroitiin, kun jokin puustotunnuksista tunnettiin ja sen ennustevirhe voitiin laskea. Kalibroitu odotusarvo on ns. paras lineaarinen harhaton ennustin (best linear unbiased predictor, BLUP). Perusmallin kalibrointi tunnetulla puustotunnuksella tarkoittaa ennusteita ja pienentää virhevarianssia. Siksi mallia kalibroitaessa laskettiin myös varianssin kalibroitu estimaatti, jota käytettiin logaritmisien mallien harhan korjaamiseksi takaisinmuunnoksen yhteydessä (ks. Lappi 1993, s. 75).

Puustotunnusmalleja sovelletaan puusto-ositteille, jotka muodostetaan puulajin, syntytyypin ja puujakson mukaan. Summatunnusten (G ja N) ennusteita korjataan tarkasteltavan ositteen osuudella metsikön kokonaispohjapinta-alasta tai kokonaisrunkoluvusta (ks. Siipilehto 2006). Tämä

korjaus vaikuttaa kalibroinnin yhteydessä myös dimensioihin (läpimitta ja pituus), koska ositteen osuus kokonaispuustosta kuvaa ositteen kilpailuasemaa.

Siipilehdon (2006) mukaan keski- ja valtapituuden keskivirheet perusmallilla (yhtälö 1) ovat kuusella 20 % ja 17 % ja vastaavissa julkaisemattomissa männyn ja koivun malleissa keskivirheet ovat samaa suuruusluokkaa kangasmaiden laadinta-aineistossa. Tyypillisessä metsän uudistamisen sovellustilanteessa puustotunnusmalleja kalibroidiin runkoluvulla. Pelkkä runkolukutieto ei Siipilehdon (2006) mallin mukaan vaikuta juurikaan pituustunnusten keskivirheisiin. Runkoluvulla kalibroidun keskipituuden keskivirheen estimaatti on 19 % ja valtapituuden keskivirhe 16 %. Tyypillisen taimikkokuviotiedon avulla malleja kalibroidaan sekä runkoluvun että keskipituuden ja varttuneemmassa taimikossa myös keskiläpimitan avulla. Tällaisessa tapauksessa valtapituuden keskivirheen kalibroitu estimaatti laskee 11 %:iin (ks. Siipilehto 2006, taulukko 4).

Vaikka runkolukutieto ei lineaarisen ennustamisen teorian mukaan juuri pienennä pituuden keskivirheen estimaattia, on tiheydellä selvä vaikutus vasteeseen. On aivan eri asia, onko puulajin runkoluku $2\ 000\ ha^{-1}$ puhtaassa taimikossa, vai $2\ 000\ ha^{-1}$ sekapuustoisessa taimikossa, jonka kokonaisrunkoluku on vaikka $16\ 000\ ha^{-1}$. Kuvan 1 esimerkki (MT, Etelä-Suomi) havainnollistaa sekapuuston vaikutusta $2\ 000\ ha^{-1}$ tiheyteen istutetun männyn keski- ja valtapituuden kehitykseen. Kun kokonaisrunkoluku on $16\ 000\ ha^{-1}$, niin viljellyn männyn osuus on vain 12,5 % kokonaisrunkoluvusta. Tämä oli tyypillinen tiheys turvekankaiden taimikoissa (ks. Taulukko 1). Tällä metsikön tiheydellä MOTTI-ohjelmalla ennustettu keskipituus on 1,4 m ja valtapituus 1,0 m pienempi kuin vastaavat pituudet puhtaassa, $2\ 000\ ha^{-1}$ tiheydellä kasvaneissa männyn taimikoissa 15 vuoden iällä (kuva 1). MOTTI-ohjelmiston puustotunnusmallien mukaan dimensioiden kehityksen kannalta on kuitenkin sama, jos pääpuulajiositteen tiheys on $2\ 000\ ha^{-1}$ puhtaassa taimikossa, tai sen tiheys on $1\ 000\ ha^{-1}$ sekapuustoisessa taimikossa, jonka kokonaisrunkoluku on $2\ 000\ ha^{-1}$. Tällöin oletetaan, että sekapuusto kuuluu samaan taimijaksoon pääpuulajin kanssa. Esimerkiksi varhaisperkauksen jälkeen MOTTI-mallit tuottavat toisen taimijakson, jonka runkoluvusta osa tulee vaiheittain ensimmäisen taimijakson kilpailijaksi (ks. Siipilehto ym. 2014, s. 21).



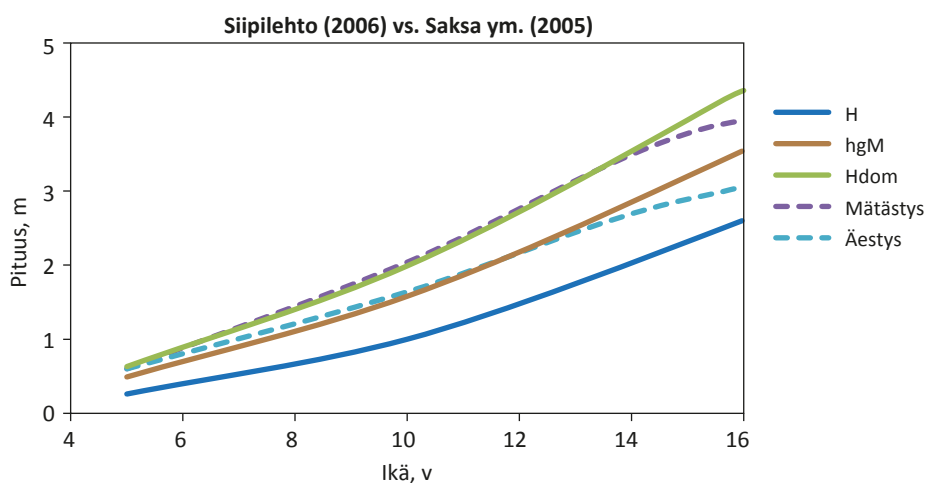
Kuva 1. Istutusmännikön keskipituus (kaksi alinta käyrää) ja valtapituus (ylimmät paksummat kuvaajat) iän suhteen, kun istutustiheys on $2\ 000\ ha^{-1}$ ja taimikossa ei ollut sekapuuta (—) tai männyn osuus oli 12,5 % taimikon $16\ 000\ ha^{-1}$ kokonaisrunkoluvusta (---). Esimerkki edustaa mustikkatyyppiä eteläisessä Suomessa ($1\ 200\ ^\circ Cvrk$).

Voidaan myös ajatella tilannetta, jossa taimikosta on mitattu kuviotietoja. Tyypillisen taimikon kuviotiedon kohdalla puustotunnusmalleja kalibroidaan runkoluvun lisäksi myös keskipituudella ja varttuneemmissa taimikoissa lisäksi keskiläpimitalla. Puuston läpimitta- ja pituustunnusten väliset korrelaatiokertoimet ovat positiivisia ja huomattavan korkeita, 0,63–0,93 (ks. Siipilehto 2006, taulukko 3). Siten keskipituuskalibrointi muuttaa valtapituuden estimaattia keskipituuden ennustevirheen suuntaisesti, eli keskipituuden yliarvio kasvattaa ja aliarvio pienentää valtapituusestimaattia. Jos keskipituusennuste on virheetön, se ei vaikuta valtapituusestimaattiin.

2.3 Nykykäytännön mukaisesti istutetun kuusikon pituuskasvu

Saksan ym. (2005) keskipituuden kasvumalli kuvaa nykykäytännön mukaisten istutuskuusikoiden alkukehitystä nykyisillä taimimateriaaleilla (1- ja 2-vuotinen kuusen paakkutaimi) ja muokausmenetelmillä (äestys ja mätästys) mustikkatyyppin kankailla Etelä-Suomessa. Malleissa keskipituuden kasvu on kuvattu taimikon perustamisesta kuluneen ajan funktiona. Saksan ym. (2005) keskipituuden kehitystä tarkasteltaessa lisättiin kasvumalliin kuusen alkupituus, joka tässä vertailussa oli 30 cm 2-vuotisille ja 20 cm 1-vuotisille paakkutaimille. Kasvumallin mukainen keskipituuden kehitys nuorissa istutuskuusikoissa vastasi äestetyllä alalla Siipilehdon (2006) pohjapinta-alan mediaanipuun pituuden (hgM) odotusarvoa ja mätästyksessä valtapituuden (H_{dom}) odotusarvoa (kuva 2). Mallitusaineiston ulkopuolella, noin 12 vuoden ikävaiheessa alkoi epärealistinen pituuskasvun hidastuminen, joka johtui iän toisen asteen termistä keskipituuden kasvumallissa (Saksa ym. 2005). Kuvan 2 simuloinnissa käytetty lämpösumma oli 1 230 °Cvrk, mikä vastasi kasvumalliaineiston Mikkelin ja Valkealan koealueiden keskiarvoa.

MOTTI-ohjelmistossa taimikoiden kehitystä ennustetaan metsikkötason puustotunnusmalleilla kunnes pääpuulaji saavuttaa 8 m valtapituuden, jolloin luodaan metsikköä edustavat kuvauspuut. Koska Saksan ym. (2005) mallitusaineistosta saatiin kuusen keskipituuden alkukehitys vain noin 10 vuoden ikään ($H_{dom} < 4$ m), niitä ei voitu sellaisenaan soveltaa koko taimikkovaiheen kuvaukseen MOTTI-ohjelmistossa. Kuvan 2 mukainen MOTTI 2.0 ohjelmiston pituustunnusten (Siipilehto 2006) ja keskipituuden kasvumallien (Saksa ym. 2005) välinen riippuvuus tarjosi kuitenkin ratkaisun tähän ongelmaan lineaarisen ennustamisen teoriaa soveltamalla. Kun istutuskuu-



Kuva 2. Kuusen keskipituus (H), pohjapinta-alan mediaanipituus (hgM) ja valtapituus (H_{dom}) Siipilehdon (2006) MOTTI 2.0 puustotunnusmalleilla (—) ja keskipituuden alkukehitys nykyisillä mätästetyillä tai äestetyillä kuusen istutusaloilla Saksan ym. (2005) mallin mukaan (---) tuoreella kankaalla Etelä-Suomessa.

sikko oli mätästetty, niin puustotunnusmalleilla ennustettu valtapituus (*H_{dom}*) asetettiin keskipituudeksi (*H*) ja muut puustotunnukset ennustettiin uudelleen, siten että *H_{dom}*-muuttujasta saatu uusi *H* ja tunnettu *N* olivat kalibrointimuuttujina. Äestetylle alalle tehtiin vastaavasti niin, että MOTTI-mallin *hgM* asetettiin keskipituudeksi ja puuttuvat puustotunnukset ennustettiin uudelleen. Tämän menetelmän etuna oli puuston tiheyden huomioiminen kalibroinnissa, jolloin metsiköiden välistä tiheysvaihtelua käytettiin hyväksi ennusteen tarkentamisessa. Lisäksi MOTTI-ohjelmiston puustotunnusmallit kattoivat kaikki tärkeimmät kasvupaikat ja maantieteellisesti koko Suomen, kun taas Saksan ym. (2005) mallit edustivat mustikkatyyppejä eteläisessä Suomessa.

2.4 MOTTI-mallien luotettavuuden arviointi

Koska emme voineet etukäteen tietää, kuvaako nykyisen uudistamiskäytännön mukainen kuusikoiden nopeampi alkukehitys turvemaiden kuusen taimikoiden kehitystä paremmin kuin Siipilehdon (2006) mallin mukainen hitaampi kehitys, tarkasteltiin tässä työssä molempia vaihtoehtoja. **Menetelmä A:** perusmenetelmä, jossa istutetun kuusen alkukehitys vastasi Siipilehdon (2006) mallien mukaista kehitystä ja MOTTI 2.0 (1.1.2006) version puustotunnusmalleja. **Menetelmä B:** istutetun kuusen alkukehitys vastasi Saksan ym. (2005) mallien mukaan korjattua pituuskehitystä ja päivitettyä MOTTI 3.0 (27.11.2012) versiota.

Luontainen tai kylvetty kuusikko tai muokkaamaton istutuskuusikko ennustetaan MOTTI 2.0 ja 3.0 versioissa Siipilehdon (2006) puustotunnusmalleilla (*menetelmä A*). Samoin MOTTI 2.0 ja 3.0 ovat identtiset männyn ja koivun puustotunnusten osalta (*menetelmä A*). Koivun pituuskehitystä ei tässä raportissa tarkasteltu, koska hieskoivusekapuuston ikä oli vaikea arvioida. Lisäksi osa koivusta on vesasyntyistä eikä MOTTI sisällä vesasyntyisten lehtipuiden kasvumalleja. Taulukossa 1 on kuusen tunnuksien laskettu erikseen sekä kaikkien kuusen pääpuulajiositteiden osalta (*menetelmät A ja B* yhdessä) että vain muokkausjälkeen istutetun kuusen osalta, jota *menetelmä B* koski.

Koska turvekankaiden taimikot olivat nuoria ja koeloittaiset pituustunnukset yleisesti alle 1,3 m rinnankorkeuden, tarkastellaan tässä työssä puustotunnuksista vain keski- ja valtapituuden luotettavuutta. Tunnuksien luotettavuutta tarkastellaan kunkin metsikön pääpuulajin ositteiden osalta (puulajin ja syntyvän mukainen osite). Tämä tehdään siitä syystä, että viljelyssä taimikoissa saman puulajin luontainen aines saattaa käyttäytyä eri tavalla kuin viljelymateriaali ja siten se vaikuttaisi luotettavuustunnuksiin (esim. pienentää harhaa, jos istutetun kuusen pituuskehitys yliarvioidaan ja täydentävän luontaisen kuusen pituuskehitys aliarvioidaan). Toisaalta myös pääpuulajiositteiden ikä on aineistossa luotettavampi tunnus kuin luontaisesti syntyneen sekapuuston ikä.

Koska pääpuulajin lisäksi uudistusalalle syntyvän sekapuuston määrä vaikuttaa taimikon kehitykseen, tarkasteltiin tässä raportissa lyhyesti myös MOTTI-mallien tuottamaa sekapuuston määrää tyypillisillä uudistusalueilla turvekankaiden aineistossa havaittuun sekapuuston tiheyteen. Uudistusaloille syntyvän sekapuuston määrä perustuu MOTTI-malleissa alun perin VMI7 aineistoista laadittuihin taulukoihin (Hynynen ym. 2002, taulukot 15–17) ja myöhemmin VMI8 ja VMI9 aineistoista päivitettyihin taulukoihin pääpuulajin, syntyvän ja kasvupaikan mukaan (Siipilehto ym. 2014, liite 1). Kangasmaille ja turvemaille on laadittu omat taulukot. MOTTI-malleilla turvemaille syntyy pääsääntöisesti suurempia tiheyksiä kuin kasvupaikaltaan vastaaville kangasmaille. Nykyisessä Motti 3.0 versiossa taimikkoon syntyvään sekapuuston määrään vaikuttaa edellä mainittujen tunnuksien lisäksi myös maantieteellinen sijainti (lämpösumma) ja muokkauksessa rikkoutuneen maanpinnan osuus (ks. Siipilehto ym. 2014).

MOTTI-ohjelmistossa puustotunnusten iänmukainen kehitys on kuvattu käyttäen malleissa Cajanderin (1925) kangasmaiden metsätyyppejä. Vasanderin ja Laineen (2008) mukaan turvekankaat voidaan rinnastaa kangasmaiden kasvupaikkoihin. Ruohoturvekangas (Rhtkg) rinnastetaan kangasmaiden käenkaali-mustikkatyyppiin (OMT), mustikkaturvekangas (Mtkg) mustikkatyyppiin (MT), puolukkaturvekangas (Ptkg) puolukkatyyppiin (VT), varputurvekangas (Vtkg) kanervatyyppiin (CT) ja jäkäläturvekangas (Jtkg) jäkälätyyppiin (CIT) Etelä-Suomen metsätyyppejä käyttäen. Liitteessä 1 on esimerkkejä kangasmaiden kasvupaikkojen valtapituuden kehityksestä männyn kylvön ja kuusen istutuksen yhteydessä MOTTI-ohjelmiston puustotunnusmalleilla ennustettuna.

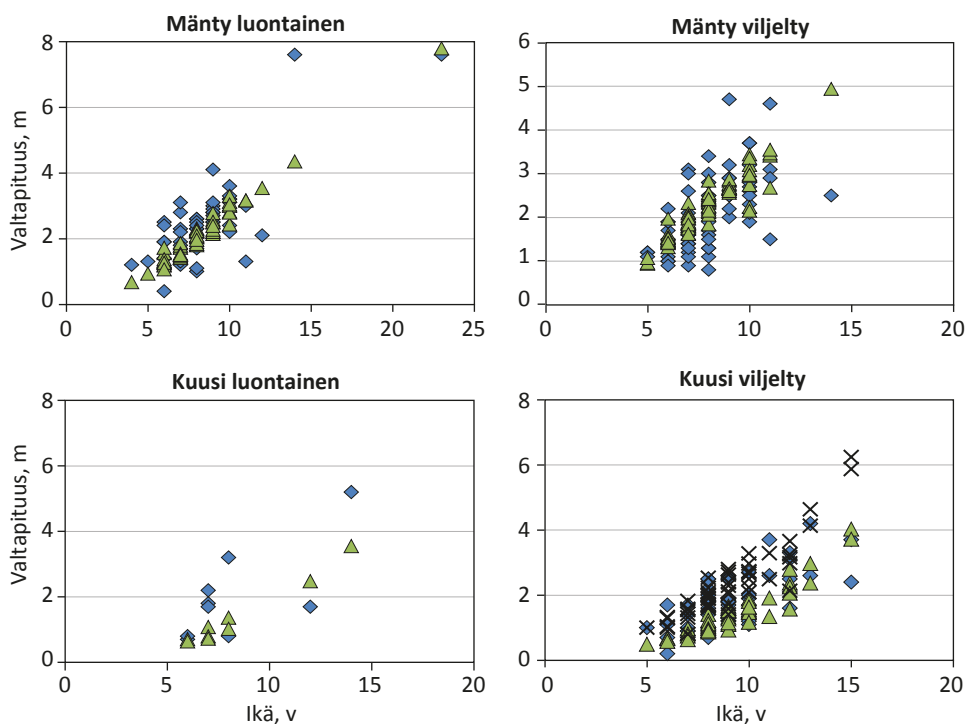
Turvekankailta mitattua pituuskehitystä verrattiin MOTTI-ohjelmiston vastaaviin ennusteisiin. Pituustunnuksia tarkasteltaessa taimikon todellista tiheyttä (pääpuulajin ja koko puuston runkolukua) käytettiin mallien kalibroinnissa. Sen lisäksi testasimme esimerkinomaisesti MOTTI-mallien tuottamia sekapuuston runkolukuja lämpösummalla 1200 °Cvrk (Orivesi) testiaineiston tyyppillisillä uudistusaloilla, eli mustikkaturvekankaalla kuusen istutuksen ja puolukkaturvekankaalla männyn istutuksen yhteydessä erilaisilla muokkaustavoilla.

Ennustevirheet laskettiin mitatun ja ennustetun tunnuksen erotuksena, jolloin negatiiviset arvot merkitsivät ennusteen yliarviota ja positiiviset arvot aliarviota. Virheistä laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat (taulukossa lyhyesti hajonta). Virheen keskiarvo on ns. harha. Harha on tilastollisesti merkitsevä, kun $\text{harha} \pm 2 \times \text{virheen keskihajonta}$ on kokonaisuudessaan nollatason ylä- tai alapuolella.

3 Tulokset

3.1 Valtapituuden kehitys turvekankailta ja MOTTI-mallien ennustamana

Kuvasta 3 nähdään, että havupuutaimikoiden valtapituuksissa oli melko suurta vaihtelua iän suhteen. Männyn viljelyssä muutama havaittu valtapituus oli ikään kuin liian hitaasti kehittynyt, varsinkin, kun ne olivat istutettuja eikä kylvettyjä. Toisaalta jo 8 vuoden iässä valtapituuskehityksissä oli huomattavan suuri vaihteluväli (1,1 m–3,4 m). Luontaisesti uudistuneiden kuusikoiden kohdalla muutamat suuret valtapituudet kiinnittivät huomiota. Esimerkiksi 8 vuoden kohdalla istutuskuusikon valtapituus oli alle 2 metriä, kun taas luontaisesti syntyneessä kuusen taimikossa valtapituus oli 3,2 metriä. Toinen tapaus on 14-vuotias luontainen kuusikko, jonka valtapituus oli 5,2 m, kun istutuskuusikoissa sekä aineiston että ennusteen mukainen valtapituus oli noin 2,5–4 m. Myös luontainen männyn taimikko oli 14 vuoden iällä saavutetulla 7,6 m valtapituudella selvästi edellä saman ikäistä istutustaimikkoa (mitattu valtapituus 2,5 m ja ennuste 4,9 m). Syynä oli luontaisesti syntyneiden metsiköiden sisäinen ikävaihtelu ja jo ennen uudistamishetkeä syntyneen eri-ikäisen taimiaineuksen esiintyminen. Ojitusalueille on ominaista, että varsinkin suon kuivatushistorian rakkasammalvaltaisessa alkuvaiheessa niille ilmaantuu herkästi eri-ikäiseksi kehittyvää kuusialikasvosta. Viljellyn männyn ja viljellyn kuusen kohdalla vaihtelu oli huomattavasti pienempää ja puustotunnusmallien ennusteet näyttivät osuvan samaan pisteparveen havaittujen kanssa, etenkin männyllä. Kuusen ennusteet *menetelmällä A* osuivat selvästi havaittujen valtapituuksien alareunaan. Toisaalta *menetelmällä B* istutuskuusikon ennusteet osuivat pääsääntöisesti havaittujen valtapituuksien yläreunaan (kuva 3).



Kuva 3. Havaitut valtapituudet (◆) sekä MOTTI-ohjelmiston runkoluvun avulla kalibroidut valtapituuden ennusteet iän suhteen *menetelmällä A* (▲) ja vaihtoehtoisella *menetelmällä B* muokatuilla kuusen istutusaloilla (×).

3.2 Pituuden luotettavuus MOTTI-malleja turvekankailla sovellettaessa

3.2.1 Luotettavuus syntytaivoittain

Taulukossa 2 on esitetty pituustunnusten keskimääräistä virhettä eli harhaa ja virheen keskihajontaa pääpuulajin ja syntytaivan mukaan. Aineistossa oli vain yksi kylvetty kuusikko ja sen pituustunnukset ennustettiin kohtalaisen hyvin, etenkin keskipituus. Kun tarkastellaan muita aineiston ositteita, niin pienimmät harhat saatiin luontaisen männyn keski- ja valtapituudessa, nimittäin 3 ja 15 cm aliarviot. Suurimpia keskipituuden harhoja olivat luontaisen ja istutetun kuusen 31 cm

Taulukko 2. Keski- (H) ja valtapituuden (H_{dom}) luotettavuus pääpuulajin ja syntytaivan mukaan.

Puulaji	Synty	H		H_{dom}	
		Harha (cm)	Hajonta	Harha (cm)	Hajonta
Mänty	Luontainen	3,3	41,2	15,1	80,8
	Kylvö	-8,6	23,1	-26,2	37,8
	Istutus	18,7	55,1	-14,3	78,3
Kuusi	Luontainen	31,0	30,3	91,0	95,4
	Kylvö	-3,0		22,0	
	Istutus	44,5	45,6	39,1	75,0
	Istutus B ^a	-24,1	61,2	-55,4	90,7

^a Tässä ositteessa laskennassa oli mukana vain muokausjälkeen istutetut kuuset, joiden pituuskehitys ennustettiin *menetelmällä B*.

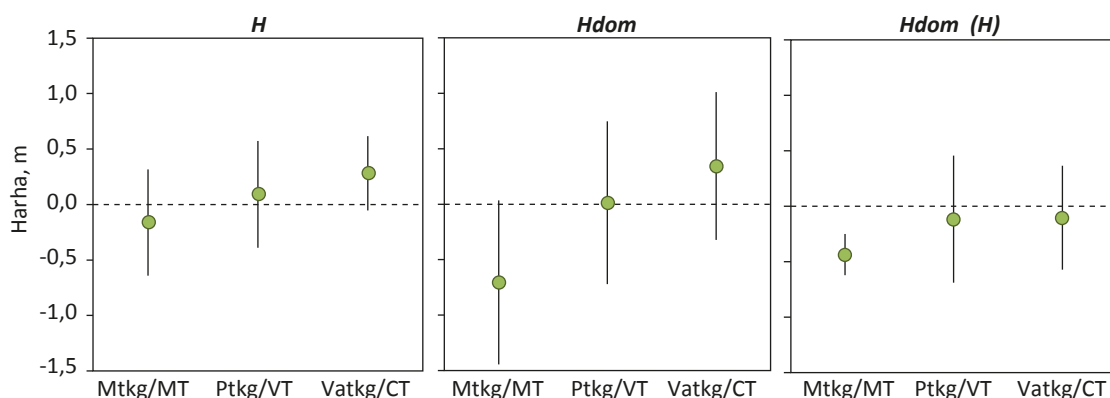
ja 45 cm aliarviot *menetelmällä A*. Samoissa ositteissa valtapituus aliarvioitiin 91 cm ja 39 cm. Pituustunnukset tulivat yliarvioitua 24–55 cm muokatuilla kuusen istutusaloilla *menetelmällä B*. Yllättäen istutusmetsiköissä keskipituuden virhevaihtelun hajonta oli suurempi kuin luontaisesti syntyneissä metsiköissä. Männyn kylvötaimikoissa virhevaihtelun hajonta oli selvästi pienin sekä keski- että valtapituudessa.

3.2.2 Luotettavuus kasvupaikoittain

Männyn pituustunnusten harhoissa oli selvästi havaittavat trendit kasvupaikan viljavuuden suhteen (kuva 4). Mustikkaturvekankaalla keskipituus yliarvioitiin 16 cm ja varputurvekankaalla aliarvioitiin 28 cm. Keskipituuden harhan trendi oli selvästi loivempi kuin valtapituuden, jossa mustikkaturvekankaan 70 cm yliarviosta päädyttiin varputurvekankaan 34 cm aliarvioon (kuva 4). Puolukkaturvekankaalla ennusteet olivat melko luotettavia – keskipituuden aliarvio oli 9 cm ja valtapituus oli harhaton. Keskipituuskalibroinnin yhteydessä männyn valtapituuden yliarvio pieneni mustikkaturvekankaalla 43 cm:iin ja huonommilla kasvupaikoilla saatiin lievät, 10–12 cm yliarviot. Samalla valtapituuden harhan trendi viljavuuden suhteen lähes hävisi ja virhevaihtelun hajonta pieneni (kuva 4). Koska mustikkaturvekankaalla virhevaihtelu pieneni 74 cm:stä 19 cm:iin, niin 43 cm yliarvio tuli tilastollisesti merkitseväksi.

Myös kuusen pituustunnusten harhoissa näkyy selvä trendi kasvupaikan viljavuuden suhteen (kuva 5). Ruohoturvekankaiden kuusikoissa *menetelmällä A* saatiin pienimmät harhat, jotka olivat 8 cm keski- ja 24 cm valtapituuden ennusteissa. Huonommilla kasvupaikoilla *menetelmä A* tuotti 46–83 cm:n aliarviot (kuva 5). Kalibrointi tunnetun keskipituuden avulla korjasi valtapituusennusteita huomattavasti mustikka- ja puolukkaturvekankailla systemaattisen virheen laskiessa 8–9 cm:iin. Koska keskipituus oli ruohoturvekankailla lähes harhaton, sen vaikutus valtapituuden kalibroinnissa oli vähäinen.

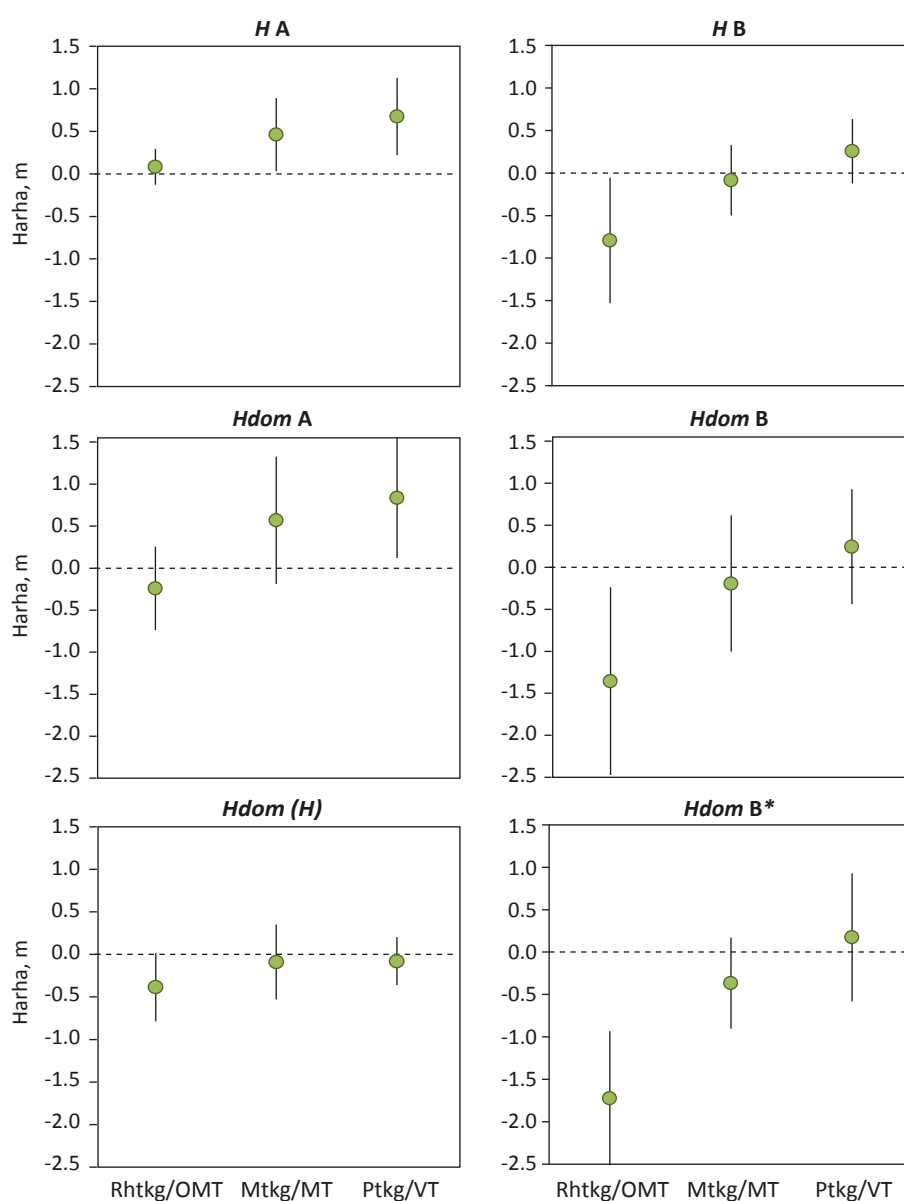
Menetelmä B sovellettaessa ruohoturvekankaan keski- ja valtapituus tuli huomattavasti yliarvioitua (79–135 cm). Sitä vastoin mustikka- ja puolukkaturvekankaan taimikoiden ennusteet saatiin *menetelmällä B* tarkemmin kuin *menetelmällä A* harhan vaihteluvälin ollessa 8–25 cm keskipituudessa ja 19–25 cm valtapituudessa (kuva 5: *H B* ja *Hdom B*). Kun *menetelmällä B* tarkasteltiin pelkästään muokkausjälkeen istutettuja kuusia, niin trendi edelleen voimistui ja hajonnat pienenivät, koska luontaisen kuusen aliarviot eivät olleet tasoittamassa istutuskuusen yliarviota. Puolukkaturvekan-



Kuva 4. Männyn keskipituuden (*H*) ja valtapituuden (*Hdom*) luotettavuus (harha ± keskihajonta) runkolu- vulla kalibroituna ja lisäksi valtapituus keskipituuskalibroinnin jälkeen (*Hdom (H)*).

kaan valtapituuden aliarvio laski hieman, eli 25 cm:stä 17 cm:iin. Sen sijaan mustikkaturvekankaalla yliarvio kasvoi 36 cm:iin ja ruohoturvekankaalla jopa 172 cm:iin (kuva 5, *Hdom B**). Tässä samassa ositteessa *menetelmä A* olisi yliarvioinut istutetun kuusen valtapituutta ruohoturvekankaalla 38 cm ja aliarvioinut sitä mustikkaturvekankaalla 57 cm ja puolukkaturvekankaalla jopa 96 cm.

Valtapituuden virhevaihtelun hajonta oli keskipituuden hajontaan verrattuna noin 30 cm suurempi. Valtapituuden keskipituuskalibrointi pienensi valtapituuden virhevaihtelun hajontaa kuusella enimmillään 72 cm:stä 28 cm:iin. *Menetelmä B* pienensi hieman keskipituuden virhevaihtelun hajontaa mustikka- ja puolukkaturvekankailla (38–41 cm) verrattuna *menetelmän A* hajontaan (43–45 cm), mutta samalla hajonta kasvoi ruohoturvekankaiden istutuskuusikoissa 21 cm:stä jopa 74 cm:iin.



Kuva 5. Kuusen keskipituuden (*H*) ja valtapituuden (*Hdom*) luotettavuus (harha \pm keskihajonta) runkolu-
vulla kalibroituina *menetelmällä A* ja *B* ja valtapituus keskipituuskalibroinnin jälkeen (*Hdom (H)*). *Hdom B**
kuvassa vain istutetut kuuset muokkaussaloilta on mukana laskennassa *menetelmällä B*.

3.2.3 Muokkauksen ja turpeen paksuuden vaikutus luotettavuuteen

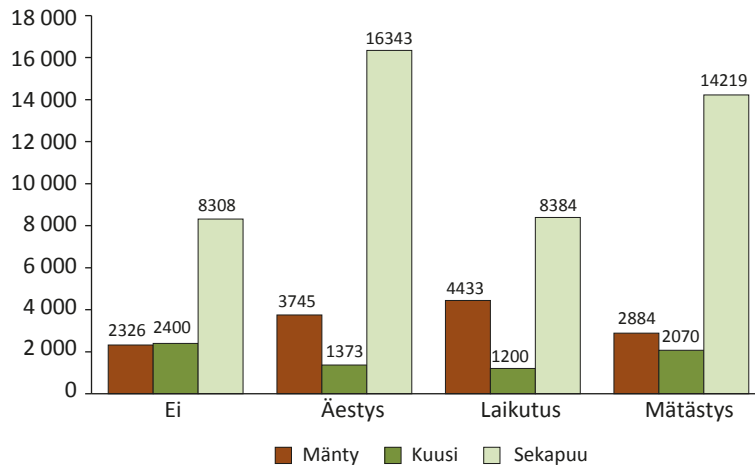
Viljellyn tai luontaisen mäntypääpuulajin tiheys oli riittävä ja se vaihteli muokkaamattoman uudistusalan keskimääräisestä 2 326 ha⁻¹ runkoluvusta laikutetun uudistusalan 4 433 ha⁻¹ runkolukuun (kuva 6). Kuusen taimikoissa pienimmät kuusen runkoluvut tavattiin pintamuokkausaloilla: laikutuksessa keskimääräinen runkoluku oli 1 200 ha⁻¹ ja äestyksessä 1 373 ha⁻¹. Muokkaamattomilla aloilla kuusta oli keskimäärin 1 867 ha⁻¹ ja mätästetyillä aloilla 2 070 ha⁻¹ (kuva 6).

Kuvassa 6 on pääpuulajien lisäksi esitetty uudistusaloille syntyneen sekapuuston keskimääräiset runkoluvut muokkaustavoittain. Syntyneen sekapuuston määrä oli turvekankaiden testiaineistossa selvästi riippuvainen muokkauksessa rikkoutuneen maanpinnan osuudesta. Eniten pintaa rikkovan äestysmenetelmän yhteydessä sekapuustoa syntyi jopa yli 16 000 runkoa hehtaarille. Laikutetun ja muokkaamattoman uudistusalan keskimääräiset sekapuuston tiheydet olivat lähes samat, noin 8000 runkoa hehtaarilla (kuva 6). Sekä pääpuulajin että sekapuuston runkoluvun vaihtelu oli huomattavan suurta uudistusalojen välillä, sillä keskihajonta oli n. 50 % keskitiheydestä.

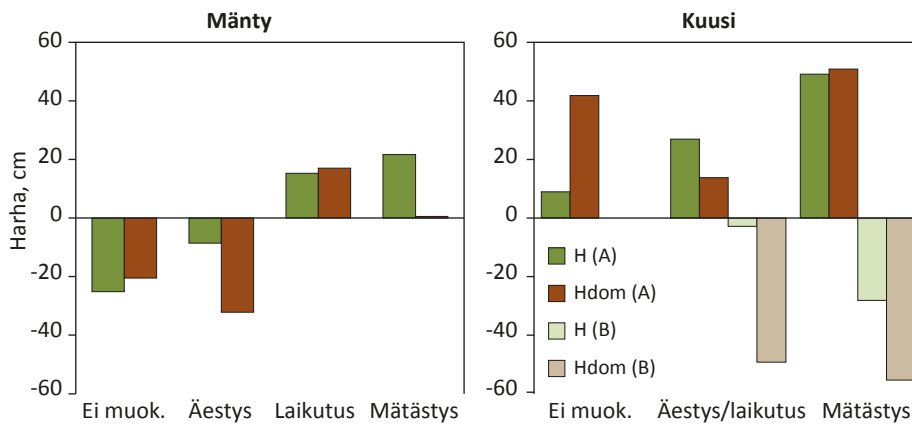
MOTTI-malleilla turvemaille ennustettu luontaisen sekapuuston hehtaarikohtainen runkoluku vaihteli muokkaamattomalla pinnalla 4 460–5 125, laikutuksen yhteydessä 6 900–7 840, äestysyhteydessä 15 780–17 670 ja mätästetyksen yhteydessä 12 810–14 390 ha⁻¹. Testiaineiston mukaan muokkaamattomille uudistusaloille syntyi siten keskimäärin noin 3 500 runkoa enemmän luontaista sekapuustoa kuin MOTTI-malleilla, mutta muokatuilla aloilla sekapuuston tiheydet olivat testiaineistossa (kuva 6) ja MOTTI-malleilla samaa suuruusluokkaa eri muokkausmenetelmillä.

Muokattujen männiköiden keski- ja valtapituuden ennustevirheessä oli havaittavissa muokkauksen voimakkuuden mukaista trendiä. Muokkaamattomilla uudistusaloilla keski- ja valtapituus yliarvioitiin noin 20 cm (kuva 7). Keskipituudessa yliarviot sekä muokkaamattomalla että äestetyillä uudistusaloilla kääntyvät 15–22 cm aliarvioiksi laikutetuilla ja mätästetyillä uudistusaloilla. Sen sijaan mätästetyillä uudistusaloilla männyn valtapituus oli käytännössä harhaton, 0,5 cm. Kuusella vastaavaa trendiä muokkaustavan suhteen on selvästi havaittavissa vain keskipituuden ennustevirheen osalta (kuva 7). Silti niin muokkaamattomilla kuin muokatuilla kohteilla kuusen valtapituuksien tulivat 9–50 cm aliarvioiksi *menetelmällä A*. Vaihtoehtoinen *menetelmä B* tuotti lähes harhattoman (-3 cm) keskipituuden pintamuokkausaloilla, mutta samalla valtapituus yliarvioitiin 49 cm. Mätästetyksen 49 ja 51 cm aliarviot keski- ja valtapituudessa *menetelmällä A* muuttuivat 28 ja 55 cm yliarvioiksi *menetelmällä B*. Muistutettakoon, että *menetelmällä B* muokkausmenetelmä (pintamuokkaus vs. mätästys) vaikuttaa pituuseennusteisiin (ks. kuva 2), kun taas *menetelmän A* puustotunnusmallit eivät sisällä maanmuokkauksen vaikutusta.

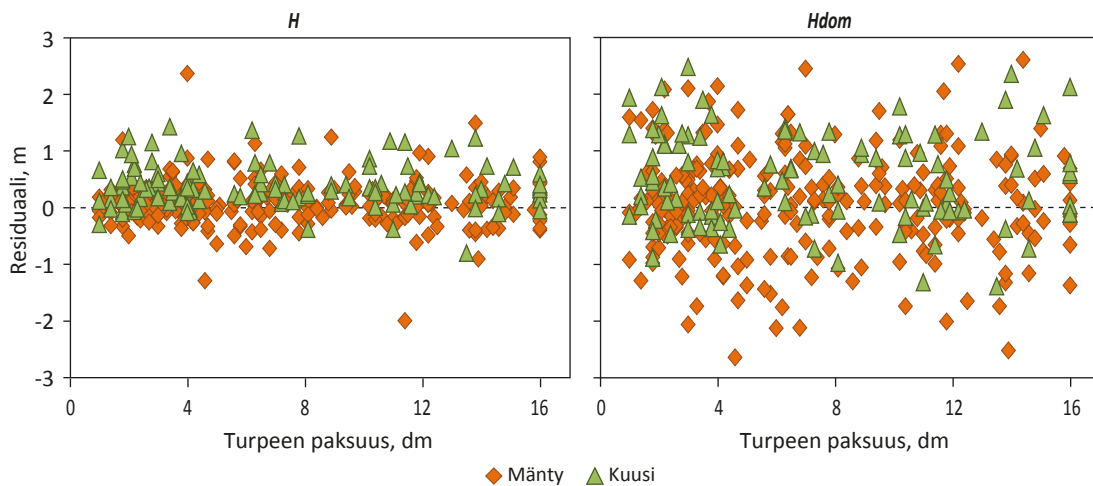
Kasvupaikan paksuturpeisuus voi vaikuttaa kasvuun mahdollisen ravinne-epätasapainon kautta (Moilanen ym. 2010). Testiaineistossa ei havaittu trendinomaista vaikutusta turpeen paksuuden ja ennustevirheen välillä (kuva 8). Virhevaihtelun hajonta ei myöskään näytä muuttuvan ohutturpeisten ja paksuturpeisten soiden välillä. Osa uudistusaloista oli hyvinkin ohutturpeisiä. Tällaiset kohteet olivat tyypillisesti yksityismaiden uudistusaloja, jossa kangasmaan uudistamisen yhteydessä uudistettiin myös ojitusalueiden reunaosia. Alkuperäisinä suotyyppeinä nämä olivat kangasmaan ja turvemaan rajapintojen kangasrämeitä ja -korpia.



Kuva 6. Muokkausmenetelmän vaikutus mänty- ja kuusipääpuulajin runkolukuun ja uudistusalan taimetumiseen sekapuuston runkolukuna (kpl ha⁻¹).



Kuva 7. Runkoluvulla kalibroidun keskipituuden (H) ja valtapituuden (H_{dom}) harhat (cm) muokkaustavoitain *menetelmällä A* ja Saksan ym. (2005) kuusen pituuskasvua mukaillen *menetelmällä B*.

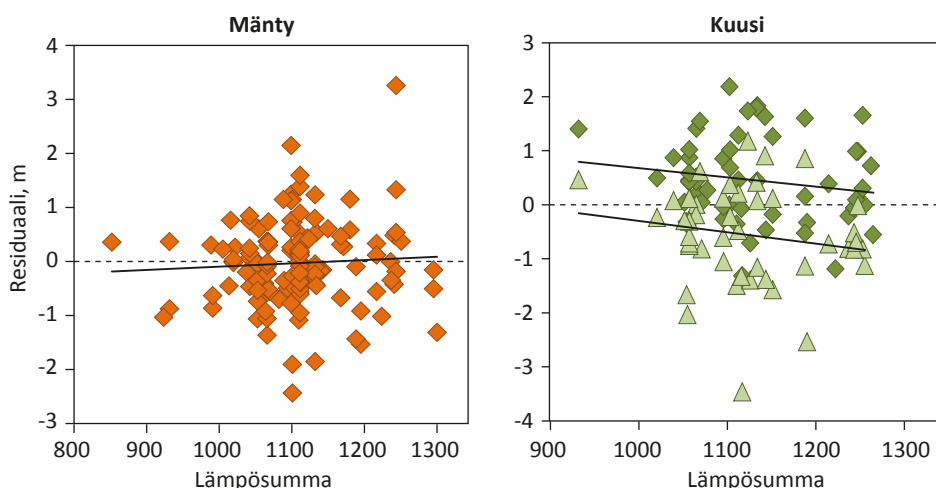


Kuva 8. Keskipituuden (H) ja valtapituuden (H_{dom}) ennustevirhe turpeen paksuuden suhteen (*menetelmä A*).

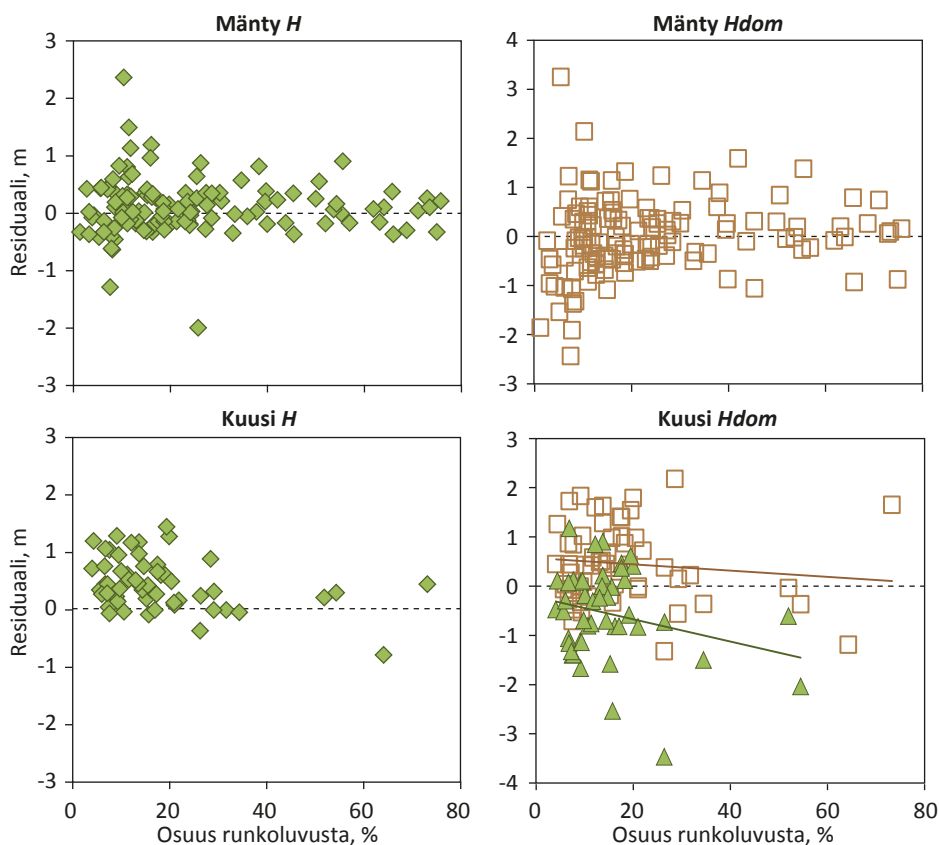
3.2.4 Ennustevirheet lämpösunnan ja sekapuuston osuuden suhteen

Maantieteellinen sijainti on puustotunnusmalleissa mukana lämpösunnan avulla kuvattuna. Lämpösunnan merkitys valtapituuteen on huomattava. Esimerkiksi 10-vuotiaan istutetun männyn valtapituuden odotusarvo mustikkatyypillä on 4,6 m lämpösunnan ollessa 1 300 °Cvrk ja 3,2 m lämpösunnan ollessa 900 °Cvrk. Taimikon sijainnilla ei ollut selvää vaikutusta valtapituuden ennustevirheeseen, vaan ennustevirheet jakautuivat tasaisesti havaitulle lämpösunnan vaihtelualueelle, joka oli 853–1 307 °Cvrk (kuva 9). Kuvaan 9 liitetyt trendiviivat olivat loivia ja trendit olivat erisuuntaisia männyn ja kuusen osalta. Kuusen kohdalla kuvasta 9 erottui selvä taasoero *menetelmien A ja B* välillä.

Puulajiositteen runkoluku ja sen osuus kokonaisrunkoluvusta kuvaa kilpailuasemaa metsikössä ja se vaikuttaa puustotunnusten ennusteisiin. Jos ositteen runkoluku on vakio, mutta osuus kokonaisrunkoluvusta pienenee, niin puuston pituusennusteet pienenevät (ks. kuva 1). Koska kuusen ja männyn mallit on laadittu pääpuulajin mukaan, niin laadinta-aineistoissa puulajin osuus on yleensä yli 50 %. Turvekankaiden taimikoissa kasvatettavan pääpuulajin puusto-ositteen osuus saattoi olla hyvin pieni tiheään hieskoivusekapuuston vuoksi. Pienimmillään luontaisesti syntyneen havupuuositteen osuus oli vain yhden prosentin. Turvakankaiden taimikoiden suuresta pääpuulajin runkolukuosuuden vaihtelusta huolimatta virheessä ei esiintynyt selviä trendejä (kuva 10). Männystä oli paljon havaintoja runkolukuosuuden 1–80 % vaihtelualueella ja residuaali oli jakaantunut melko tasaisesti nollatason molemmiin puolin. Kuitenkin virhevaihtelun hajonta hie-man kasvoi pienillä, alle 20 % männyn runkoluvun osuuksilla. Kuusen kohdalla tulos ei ole aivan yhtä selvä kuin männyllä. Kuusen valtapituuden virheeseen liitettiin trendiviivat, joista nähdään, että trendi oli hyvin loiva *menetelmällä A*. Sen sijaan valtapituuden keskimääräinen yliarvio *menetelmällä B* selvästi pieneni, kun kuusen osuus kokonaisrunkoluvusta laski. Tämä johtui siitä, että kiristynyt kilpailu hidasti ennustettua kuusen valtapituuden kehitystä.



Kuva 9. Valtapituuden ennustevirheet (residuaali) lämpösunnan (°Cvrk) suhteen männyn ja kuusen turvekankaiden taimikoissa *menetelmällä A* (◆) ja *menetelmällä B* (▲).



Kuva 10. Keski- (◆) ja valtapituuden (□) ennustevirheet (residuaali, m) pääpuulajin runkolukuosuuden (1–80 %) funktiona. Valtapituuden virhe *menetelmällä A* (□) ja muokkaukseen istutetulle kuuselle *menetelmällä B* (▲).

3 Tulosten tarkastelua

Kangasmaiden talousmetsien aineistoihin perustuvissa MOTTI 2.0 ja 3.0 ohjelmistojen puustotunnusten ennusteissa havaittiin systemaattista virhettä, kun niitä sovellettiin turvekankaiden toisen sukupolven männyn ja kuusen uudistusaloille. Turvekankaat rinnastettiin viljavuustasoltaan vastaaviksi oletettuihin kangasmaiden kasvupaikkoihin Vasanderin ja Laineen (2008) mukaan. Testiaineiston perusteella turvekangasluokkien väliset erot olivat pienempiä kuin kangasmaiden kasvupaikkaluokkien väliset erot. Vastaavan suuntainen tulos oli nähtävissä valtakunnan metsien inventointien kasvuluvuissa (ks. Ihalainen 2011), joista esimerkkinä koko maan keskikasvut olivat OMT 8,0; MT 5,0; VT 3,6 ja CT 2,4 m³ha⁻¹ vuodessa ja vastaavasti turvekangastyypeillä Rhtkg 6,3; Mtkg 6,0; Ptkg 4,4 ja Vatkkg 3,2 m³ha⁻¹ vuodessa. Tästä kangasmaiden ja turvekankaiden rinnastamisesta johtuen MOTTI-ohjelmisto yliarvioi viljavimpien turvekankaiden ja aliarvioi karuimpien turvekankaiden pituuskehityksen.

Saatuihin tuloksiin on suhtauduttava hiukan varauksellisesti. Tarkasteltu turvekankaiden aineisto vastasi käytännön uudistusaloja ja näytti siltä, että kasvupaikan viljavuutta ei käytännön uudistamisessa onnistuttu hyödyntämään. Kuusen valtapituuskehitys ruohoturvekankaalla jäi jälkeen

mustikka- ja puolukkaturvekankaista. Taulukon 1 mukaan istutettu kuusi saavutti keskimäärin 1,9 m valtapituuden 11 vuodessa ruohoturvekankaalla, saman 1,9 m valtapituuden vajaassa 9 vuodessa mustikkaturvekankaalla ja 2,0 m valtapituuden 9 vuodessa puolukkaturvekankaalla (vrt. liite 1). Jos aineistosta lasketaan metsiköittäin kuusen keskimääräinen vuotuinen valtapituuden kasvu ($H_{dom}/ikä$), niin ruohoturvekankaalle saataisiin kasvuksi 18 cm vuodessa, kun se mustikkaturvekankaalla olisi 22 cm ja puolukkaturvekankaalla 21 cm vuodessa. Siinä missä puolukkaturvekankaasta voidaan pitää kasvupaikan typpivarojen perusteella kuuselle sopivana kasvupaikkana, niin puolukkatyypin kangas on kuusen kasvatukselle selvästi liian karu kasvupaikka. Turvekankaiden aineisto oli vielä hyvin nuorta, joten se edusti kasvupaikalle sopeutumisen kannalta vaikeinta alkuvaihetta. VMI10 tuloksista laskettuja turvekankaiden keskikasvulukuja kehitysluokittain tarkasteltaessa kävi ilmi, että ruoho- ja mustikkaturvekankaan kasvu taimikkovaiheessa ja nuorissa kasvatusmetsissä oli lähes sama, kun taas varttuneissa kasvatusmetsissä ruohoturvekankaan kasvu oli selvästi suurempi (n. $10 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{v}^{-1}$) kuin mustikkaturvekankaan I ja II tyypeillä (n. $7,5\text{--}8 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{v}^{-1}$) (ks. Laine ym. 2012).

Kuuselle laskettuja luotettavuustunnuksia heikentää jossain määrin luontainen kuusi, jonka ikä ei ollut tarkasti arvioitavissa. Osa luontaisista kuusikoista oli kehittynyt epärealistisen nopeasti, kuten 8 vuodessa 3 metrin valtapituuteen (ks. kuva 3). Valtapuiden on siten täytynyt syntyä ennen uudistamishakkuuta. Vielä on syytä muistuttaa, että metsikön valtapituus määräytyi tarkastellussa aineistossa joko yksin pisimmän tai korkeintaan kahden pisimmän puun mukaan, kun taas mallien laadinta-aineistossa valtapituus voitiin määrittää suuresta puujoukosta, jolloin se oli vakaampi tunnus.

Tulokset ovat silti jonkin verran huolestuttavia. Jos jatkossakin saadaan samansuuntaisia tuloksia, on parhaille turvemaiden kasvupaikoille laskettava korjauskertoimet harhan välttämiseksi tai mikäli mahdollista, laadittava turvekankaille omat mallit. On kuitenkin mahdollista, että vastaava tulos saataisiin myös kangasmaiden käytännön uudistusaloilta. Esimerkiksi Korhosen ym. (2010) mukaan taimikonhoitotöitä on rästissä ja eniten taimikonhoitotarvetta esiintyi nuorissa kuusen taimikoissa. Lehtosalo ym. (2010) eivät havainneet eroa kuusen pituuden alkukehityksessä OMT ja MT kasvupaikkojen välillä johtuen mm. pintakasvillisuuden ja lehtipuuvesojen ankarammasta kilpailusta paremmalla kasvupaikalla. Myös kangasmailla kasvupaikkojen väliset erot voivat tulla paremmin esiin varttuneemmissa metsiköissä puuston sulkeutumisen jälkeen.

Viljavilla kasvupaikoilla on vaarana, että koivu syrjäyttää viljellyn havupuun (esim. Niemistö 2000). On vaikea sanoa, missä määrin hieskoivun valta-asema vaikutti saatuun tulokseen viljavien turvekankaiden kasvupaikoilla. Turvekankailla taimikoiden tiheys oli erittäin suuri ja hieskoivusekapuusto oli tarkastellussa aineistossa keskimäärin 70 cm havupuuta edellä keskipituudessa. Sekapuustoa oli keskimäärin kuusinkertainen määrä kasvatettavan havupuun runkolukuun verrattuna. Suuren runkoluvun vaikutus kalibrintimuuttujana oli merkittävä, vaikkakin tiheyden vaikutus valtapituuteen oli selvästi pienempi kuin vaikutus keskipituuteen (ks. kuva 1). Suuri tiheys ei kuitenkaan ollut niinkään ruohoturvekankaiden riesa, vaan selvästi suurempia tiheyksiä havaittiin sekä mustikka- että puolukkaturvekankailla. Sekapuuston määrän ei myöskään havaittu aiheuttavan systemaattista virhettä pituusennusteisiin (kuva 9). Lisäksi on todettava, että MOTTI-mallit (Siipilehto ym. 2014) tuottivat hyvin realistisia sekapuuston tiheyksiä muokatuille uudistusaloille. Sen sijaan, jos uudistusala jätettiin muokkaamatta, MOTTI-mallit tuottivat liian vähän sekapuustoa. Käytännössä tämä johtui siitä, että MOTTI-mallit eivät huomioi metsäkoneiden telojen tai pyörien aiheuttamaa maanpinnan rikkoutumista, vaan korjauskertoimet perustuvat muokkausmenetelmän teoreettisesta rikutun maanpinnan osuudesta Luorasen ym. (2007) metsämaan muokkausoppaan mukaan. Käytännössä telojen osuus rikkoutuneen maanpinnan osuudes-

ta voi olla huomattavan suuri. Kubinin ym. (2013) mukaan telojen rikkoma maanpinnan osuus vaihteli vajaasta 10 %:sta jopa noin 40 %:iin kangasmaiden mätätetyillä uudistusaloilla riippuen koneiden koosta ja ajourien sijoittelusta.

Ruohoturvekankaiden odotettua hitaampi pituuskehitys johtui todennäköisesti pintakasvillisuuden kilpailusta. Kun karummilla kasvupaikoilla pintakasvillisuus tulee varsin hitaasti muokkauksen jälkeen, varsinkin mätätetyille ja koostuu lähinnä sammalista (Rossi ym. 1993, Saarinen 2013), niin ruohoturvekankaiden uudistusaloille on ominaista kenttäkerroksen voimakas kehittyminen varjostavilla lajeilla, kuten vadelma, mesiangervo, korpikastikka ja maitohorsma (Moilanen ym. 1995, Holgén & Hånell 2000, Hannertz & Hånell 1997). Tässä tutkimuksessa kasvillisuuteen ei kiinnitetty erityistä huomiota, vaikka joidenkin tyypillisten lajien peittävyksiä arvioitiin maastossa. Viljavilla turvemaan kasvupaikoilla voi esiintyä myös ravinteiden epätasapainoa siinä määrin, että se alentaa tuotoskykyä (ks. Laine ym. 2012).

Nykyisten istutuskuusikoiden pituuden alkukehitys kangasmailla on nopeampaa kuin 70- ja 80-luvulta peräisin olevissa aineistoissa, joissa kuusen jurominen oli yleisesti hidastanut istutetun kuusen alkukehitystä. Nykykäytännön mukaiset kuusen istutukset onnistuvat paremmin sekä parantuneiden maanmuokkausmenetelmien että viljelymateriaalin ansiosta (ks. Heiskanen 2005, Luoranen & Kiljunen 2006, Saksa 2011). MOTTI-ohjelmiston 3.0 nykyaikaisten istutuskuusikoiden sovellus, *menetelmä B*, tuotti MOTTI 2.0 puustotunnusmalliin (Siipilehto 2006) verrattuna tarkempia ennusteita mustikka- ja puolukkaturvekankailla. Etenkin keskipituus saatiin ennustettua varsin tarkasti ja pienellä virhevaihtelun hajonnalla näillä turvekangastyypeillä (kuva 5). Sen sijaan istutuskuusikon nopea pituuden alkukehitys lehtomaisella kankaalla (ks. liite 1) yliarvioi huolestuttavan paljon siihen rinnastetun ruohoturvekankaan pituuskehitystä *menetelmällä B*. Oletettuun kuviotietoon perustuvalla keskipituuskalibroinnilla saatiin taimikoiden valtapituudet melko tarkasti parhaita turvekankaita lukuun ottamatta — männyn pituuskehitys mustikkaturvekankaalla ja kuusen pituuskehitys ruohoturvekankaalla yliarvioitui noin 40 cm keskipituuskalibroinnista huolimatta.

Muokkauksen vaikutus pituustunnusten ennustevirheeseen oli odotettavissa, sillä muokkaus ei ollut puustotunnuksia selittävänä tekijänä (*menetelmä A*), mutta muokkauksen voitiin olettaa nopeuttavan taimien alkukehitystä, vaikka Pearsonin ym. (2011) mukaan paksaturpeisilla uudistusaloilla muokkauksen vaikutus männyn alkukehitykseen on vaatimaton. Muokkauksen voimakkuus (muokkaamaton, pintamuokkaus, mätästys) aiheutti trendiä männyn ja kuusen keskipituuden ennustevirheeseen ja männyn valtapituuden ennustevirheeseen (ks. kuva 7). *Menetelmällä B* pintamuokkausaloilla (äestys tai laikutus) kuusen keskipituus oli lähes harhaton mutta muut pituustunnukset tulivat selvästi yliarvioitua.

Vaikka uudistettujen turvekankaiden alkuperäisiä taimitiheyksiä ei tunneta, voidaan kuusen istutusta pintamuokkaukseen pitää testiaineiston perusteella huolestuttavana menetelmänä. Kuusen tiheys oli keskimäärin vain 1 200–1 370 ha⁻¹ äestetyillä ja laikutetuilla aloilla. Pintamuokkaus, varsinkaan äestys, ei kuulu suositusten mukaisiin maanmuokkausmenetelmiin turvemailla. Näitä muokkausmenetelmiä on käytetty osittain siksi, että turvemaan uudistusala on sattunut samaan aikaan uudistettavan kangasmaan uudistusalan reunaan. Toisin sanoen kangasmaiden uudistamistapaa on laajennettu koskemaan myös ohutturpeisia turvekankaita. Tämä oli suhteellisen yleistä yksityismailta kerätyssä aineistossa.

Koska uudistettavien turvekankaiden määrä tulee moninkertaistumaan lähitulevaisuudessa (ks. Saarinen 2013, Hökkä ym. 2012), niin tuotosennusteiden luotettavuus turvekankaiden uuden

puusukupolven simuloimiseksi esim. MOTTI-ohjelmistossa saa jatkossa entistä suuremman painoarvon. Puustotunnusmalleja edelleen kehitettäessä MOTTI-ohjelmistoa varten tulee esim. maanmuokkauksen ja taimikonhoidon vaikutuksiin kiinnittää huomiota. Kun turvemaiden toisen puusukupolven aineistot karttavat, niistä voidaan laatia turvemaiden omat puustotunnusmallit. Sitä varten tulisi kerätä lisää aineistoa varttuneemmista uudistusaloista, esimerkiksi tässä työssä käytetyin aineiston uusintamittauksella. Saatavilla oleva päivitetty MOTTI-ohjelmisto 3.0 ei vielä tue turvemaiden uudistamista, mutta olemassa olevien turvemaiden puustoille on suositusten mukaiset kasvatuserämenetelmät (Ahtikoski ym. 2007, Ruotsalainen 2007). Tutkijoille suunnatulla ja jatkuvan kehitystyön alla olevalla TutkijaMOTTI-ohjelmistolla turvemaiden uudistamista voidaan tarkastella tässä raportissa esitettyjen luotettavuustunnusten mukaisin varauksin.

MOTTI-ohjelmiston soveltaminen turvekankaiden uudistamiseen on mahdollista maantieteellisesti koko Suomessa. Saatujen tulosten perusteella ennustevirheet jakautuivat tasaisesti koko aineiston maantieteelliselle alueelle. Tyypillisimmillä uudistusalojen kasvupaikoilla puuston kehityssennusteet olivat relevantteja, mutta varsinkin viljavimmilla kasvupaikoilla sekä viljelyn onnistumiseen käytännössä että puuston kehityssennusteisiin liittyy suurta epävarmuutta. Niin kauan kuin on hyvin vähän toisen sukupolven ojitusalue metsiköitä, niille ei voida aineiston puutteen vuoksi laatia yleistettäviä malleja. Vaikka kangasmaiden malleja voidaan metsikkörakenteen puolesta käyttää, niistä puuttuu kuitenkin suokasvupaikkojen kuivatustilanteen vaihtelun aiheuttama kasvun dynamiikka.

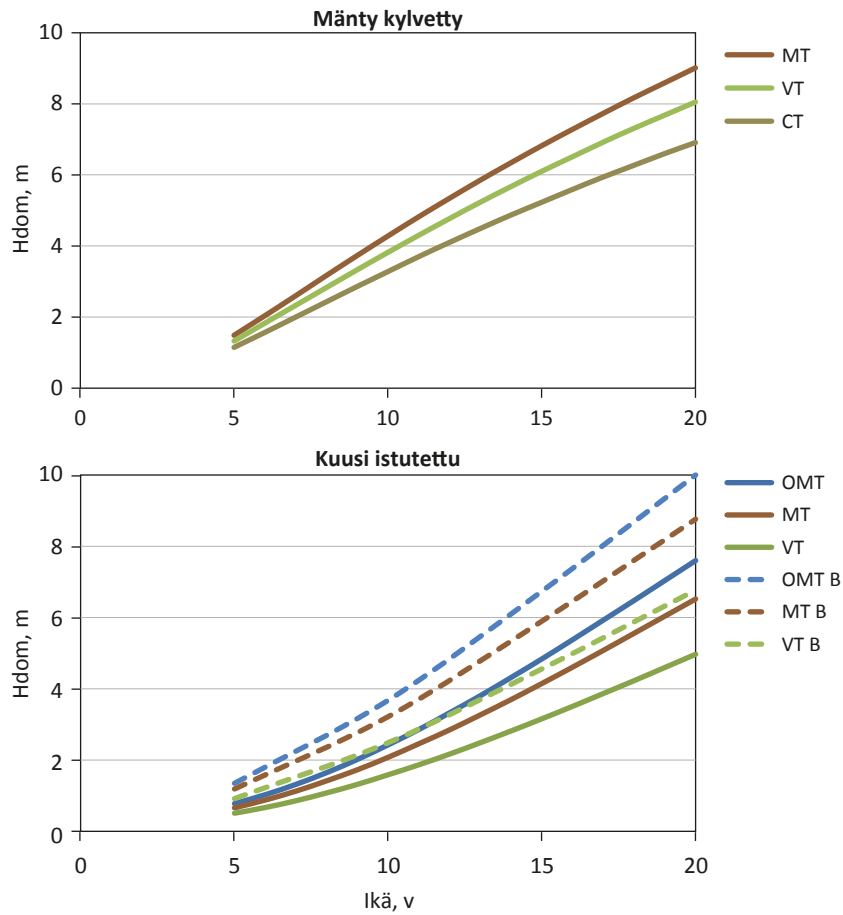
Kirjallisuus

- Ahtikoski, A., Hökkä, H., Joensuu, S., Kojola, S., Kuusela, M., Moilanen, M., Penttilä, T., Ruotsalainen, M. & Saarinen, M. 2007. Turvemaiden metsien käsittely- ja hoito. Laskelmia ja tutkimustietoa taustamateriaaliksi turvemaiden metsänhoitosuosituksen kehittämistä varten. Saatavissa: http://www.metsavastaa.net/turvemaiden_hoito. Päivitetty 21.02.08.
- Cajander, A.K. 1925. The theory of forest types. Acta Forestalia Fennica 29. 108 p.
- Gustavsen, H.G., Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. Suunnitelmat, mittausmenetelmät ja aineistojen rakenteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.
- Hannertz, M. & Hånell, B. 1997. Effects on the flora in Norway spruce forests following clearcutting and shelterwood cutting. Forest Ecology and Management 90: 29–49.
- Heiskanen, J. 2005. Jurovatko kuusentaimet? Taimiuutiset 4/2005. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki.
- Huuskonen, S & Hynynen, J. 2006. Timing and intensity of precommercial thinning and their effects on the first commercial thinning in Scots pine stands. Silva Fennica 40(4): 645–662.
- Huuskonen, S. ja Miina, J. 2007. Stand-level growth models for young Scots pine stands in Finland. Forest Ecology and Management 241: 49–61.
- Holgén, P. & Hånell, B. 2000. Performance of planted and naturally regenerated seedlings in *Picea abies*-dominated shelterwood stands and clearcuts in Sweden. Forest Ecology and Management 127: 129–138.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Finnish Forest Institute, Research Papers 835, Vantaan Research Center. 116 s.
- Hökkä, H. 1997a. Models for predicting growth and yield in drained peatland stands in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja 651. 45 s.
- Hökkä, H. 1997b. Height-diameter curves with random intercepts and slopes for trees growing on drained peatlands. Forest Ecology and Management 97: 63–72.

- Hökkä, H., Alenius, V. & Penttilä, T. 1997. Individual-tree basal area growth models for Scots pine, pubescent birch and Norway spruce on drained peatlands in Finland. *Silva Fennica* 31(2): 161–178.
- Hökkä, H., Repola, J. & Laine, J. 2008. Quantifying the interrelationship between tree stand growth rate and water table level in drained peatland sites within Central Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 38(7): 1775–1783.
- Hökkä, H., Repola, J., Moilanen, M. & Saarinen, M. 2012. Seedling establishment in small cutting areas with or without site preparation in drained spruce mire – a case study in northern Finland. *Silva Fennica* 46(5): 695–705.
- Ihalainen, A. 2011. VMI10:n tuloksia soiden pinta-aloista sekä puuston tilavuudesta ja kasvusta. Uutta tietoa suometsätalouteen – Metlan Suometsätalous -tutkimusohjelman ”Tulokset käytäntöön” -seminaari. Vantaa. Saatavissa: <http://www.metla.fi/tapahtumat/2011/sum-seminaari/index.htm>
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Miina, J., Saksa, T. & Viiri, H. 2010. Metsänuudistamisen tila Suomessa VMI10:n aineistojen perusteella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2010: 425–478.
- Kubin, E., Hartman, M., Ilvesniemi, H., Lingren, M., Kokko, A., Murto, T., Pasanen, J., Piispanen, J., Pohjola, S., Seppänen, R., Tarvainen, O., Tillman-Sutela, E. & Tolvanen, A. 2013. Kantojen noston ja hakkuutähteiden keruun ekologiset ja metsänhoidolliset vaikutukset (3475). Koekenttien perustaminen ja tuloksia. Metlan työraportteja 252. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp252.pdf> [Lainattu 10.03.2014]
- Laine, J., Vasander, H., Hotanen, J.-P., Nousiainen, H., Saarinen, M. & Penttilä, T. 2012. Suotyypit ja turvekankaat – opas kasvupaikkojen tunnistamiseen. Metsäkustannus Oy. 160 s. + dvd-liite.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelia* 24. University of Joensuu. 182 s.
- Lehtosalu, M., Mäkelä, A. & Valkonen, S. 2010. Regeneration and tree dynamics of *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in regeneration areas treated with spot mounding in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 213–223.
- Luoranen, J. & Kiljunen, N. 2006. Kuusen paakkutaimien viljelyopas. Metsäntutkimuslaitos. Gummerus kirjapaino, Jyväskylä. 108 s.
- Luoranen, J., Saksa, T., Finer, L. & Tamminen, P. 2007. Metsämaan muokkausopas. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen yksikkö. 75 s.
- Miina, J. & Saksa, T. 2008. Predicting establishment of tree seedlings for evaluating methods of regeneration for *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23(1): 12–27.
- Miina, J. & Saksa, T. 2013. Predicting establishment of tree seedlings in regeneration areas of *Picea abies*. *Baltic Forestry* 19(2): 187–200.
- Moilanen, M., Ferm, A., & Issakainen, J. 1995. Kuusen- ja koivuntaimien alkukehitys korven uudistamisaloilla. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1995/2: 115–130.
- Moilanen, M., Saarinen, M., & Silfverberg, K. 2010. Foliar nitrogen, phosphorus and potassium concentrations of Scots pine in drained mires in Finland. *Silva Fennica* 44(4): 583–601.
- MOTTI-ohjelmisto. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/motti/index.htm>.
- Niemistö, P. 2000. Hieskoivut ojitusalueilla – riukuja vai rahapuita? *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2000: 286–291.
- Pearson, M., Saarinen, M., Minkkinen, K., Silvan, N & Laine, J. 2011. Mounding and scalping prior to reforestation of hydrologically sensitive deep-peated sites: factors behind Scots pine regeneration success. *Silva Fennica* 45(4): 647–667.
- Repola, J., Hökkä, H. & Penttilä, T. 2006. Thinning intensity and growth of mixed spruce-birch stands on drained peatlands in Finland. *Silva Fennica* 40(1): 83–99.
- Rossi, S., Varmola, M. & Hyppönen, M. 1993. Pellonmetsityksen onnistuminen Lapissa. *Folia Forestalia* 807. 23 s.
- Ruotsalainen, M. 2007. Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus Oy. 50 s. ISBN 978-952-5694-16-1.
- Saarinen, M. 2013. Männyn kylvö ja luontainen taimettuminen vanhoilla ojitusalueilla – turvemaiden uudistamisen erityispiirteitä. *Dissertationes Forestales* 164. 64 s.
- Saksa, T. 1998. Männyn istutustaimien menestyminen äestetyllä uudistusalalla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1998: 15–31.

- Saksa, T. 2011. Kuusen istutustaimien menestyminen ja tukkimiehentäin tuhot eri tavoin muokatuilla uudistusaloilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011: 91–105.
- Saksa, T. Heiskanen, J., Miina, J., Jaakkola, T. & Kolström, T. 2005. Multilevel modelling of height growth in young Norway spruce plantation in southern Finland. *Silva Fennica* 39(1):143–153.
- Siipilehto, J. 2006. Linear prediction application for modelling the relationships between a large number of stand characteristics of Norway spruce stands. *Silva Fennica* 40(3): 517–530.
- Siipilehto, J. 2009. Modelling stand structure in young Scots pine dominated stands. *Forest Ecology and Management* 257: 223–232.
- Siipilehto, J. 2011. Local prediction of stand structure using linear prediction theory in Scots pine-dominated stands in Finland. *Silva Fennica* 45(4): 669–692.
- Siipilehto, J., Ojansuu, R., Miina J., Hynynen J., Valkonen, S. & Saksa, T. 2014. Metsikön varhaiskehityksen kuvaus MOTTI-ohjelmistossa. Metlan Työraportti 286. 43 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp286.pdf>.
- Valkonen, S. 1997. Viljelykuusikon alkukehityksen malli. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1997: 321–347.
- Varmola, M. 1993. Viljelymänniköiden alkukehitystä kuvaava metsikkömalli. Summary: A stand model for early development of Scots pine cultures. *Folia Forestalia* 813:1–43.
- Vasander, H & Laine, J. 2008. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. *Metsäkustannus*.

LIITE 1



MOTTI 2.0 puustotunnusmallien odotusarvot kylvetyn männyn ja istutetun kuusen valtapituuden kehityksestä (—) ja MOTTI 3.0 versio mätästetyn ja paakkutaimilla istutetun kuusikon valtapituuden kehityksestä (---) ennustettuna kangasmaiden kasvupaikkojen puhtaille yhden puulajin metsiköille Etelä-Suomessa (lämpösusma 1 250 °Cvrk).