

# **Metsikön varhaiskehityksen kuvaus MOTTI-ohjelmistossa**

Jouni Siipilehto, Sauli Valkonen, Risto Ojansuu, Jari Hynynen,  
Jari Miina ja Timo Saksa

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](mailto:julkaisutoimitus@metla.fi)

**Julkaisija**

Metsäntutkimuslaitos  
PL 18,  
01301 Vantaa  
puh. 029 532 2111  
faksi 029 532 2103  
sähköposti [info@metla.fi](mailto:info@metla.fi)  
<http://www.metla.fi/>

<b>Tekijät</b> Siipilehto, Jouni, Valkonen, Sauli, Ojansuu, Risto, Hynynen, Jari, Miina, Jari & Saksa, Timo			
<b>Nimeke</b> Metsikön varhaiskehityksen kuvaus MOTTI-ohjelmistossa			
<b>Vuosi</b> 2014	<b>Sivumäärä</b> 43	<b>ISBN</b> 978-951-40-2463-4 (PDF)	<b>ISSN</b> 1795-150X
<b>Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet</b> VA // 3587 Metsikködynamiikan ennustaminen ja MOTTI-ohjelmiston kehittäminen, 358702 Varhaiskehityksen ennustaminen			
<b>Hyväksynyt</b> Taneli Kolström, tutkimusjohtaja, 4.3.2014			
<b>Tiivistelmä</b> <p>Raportissa esitellään MOTTI-ohjelmiston (versio 3.0) rakenne metsikön varhaiskehityksen ennustamiseksi kuvauspuiden luomiseen asti. Varhaiskehityksen malleihin sisältyy taimien syntyminen sekä metsää uudistettaessa että varhaisperkauksen jälkeen, puustotunnusten lämmukaisen kehityksen ennustaminen ja taimikonhoitotoimenpiteiden kuvaaminen. Varhaiskehitysvaiheen lopussa, kun pääpuulaji saavuttaa 8 m valtapituuden, luodaan ennustettujen puustotunnusten avulla metsikön kuvauspuut jakaumamalleja käyttäen.</p> <p>Metsän uudistamisen yhteydessä syntyvän luontaisen sekapuuston tiheys oli MOTTI-ohjelmistolla pienempi kuin vertailuissa tutkimuksissa muokkaamattomilla ja laikutetuilla uudistusaloilla, suurempi äesteyillä aloilla ja samaa suuruusluokkaa mätästetyillä aloilla. Maanmuokkauksen vaikutus syntyvän luontaisen puuston tiheyteen oli MOTTI-malleilla suurempi kuin vertailuissa tutkimuksissa. Taimikoiden alkutiheydet olivat varsin suuria, eikä aiempi MOTTI 2.0 versio sisältänyt taimivaiheen kuolleisuutta, vaikka taimikkoa kasvatti hoitamatto-mana. MOTTI 3.0 versiossa taimivaiheen mahdollinen kuolleisuus kohdistettiin ensimmäisen taimijakson kehityskelvottomiin ja varhaisperkauksen jälkeen syntyvän toisen taimijakson kaikkiin ositteisiin jakamalla taimikon suhteellisesta tiheydestä johtuva kilpailu ositteille niiden pituussuhteiden avulla. Taimikon ositteet muodostettiin puulajin, syntyvän, kehityskelpoisuuden ja taimijakson mukaan. Käytännössä kuoleminen kohdistui pääasiassa varhaisperkauksen jälkeen syntyneisiin kuusen taimiin niiden hitaan alkukehityksen vuoksi.</p> <p>MOTTI-ohjelmiston puustotunnusmallit perustuvat metsikön puulajiin, kasvupaikkaan, sijaintiin ja ikään. Ne ovat lineaarisen ennustamisen teorian mukaan kalibroittavia malleja, ts. jos jokin puustotunnus tunnetaan, sitä voidaan käyttää tuntemattomien puustotunnusten ennusteiden tarkentamiseksi. Varhaiskehitystä ennustettaessa kalibroidaan puuston keskitunnuksia runkoluvuilla. Puustotunnukset käyttäytyivät johdonmukaisesti ja samansuuntaisesti muiden taimikkomallien kanssa, kun tarkasteltiin puuston tiheyden vaikutusta puuston keskitunnuksiin. Istutuskuusikoiden malleja korjattiin pituuskehityksen nopeuttamiseksi vastaamaan nyky-aikaisilla menetelmillä aikaansaatuja kasvunopeutta.</p> <p>Varhaiskehityksestä siirrytään 8 metrin valtapituusvaiheessa varttuneiden puustojen kuvaamiseen jakaumamalleilla luotujen kuvauspuiden avulla. Jakaumaennusteet eivät tuottaneet kaikkia mallin selittäviä puustotunnuksia tarkasti, kun ne laskettiin jakaumasta poimituista kuvauspuista.</p> <p>Puustotunnusmalleja edelleen kehitettäessä tulee huomioida tunnusten välisen loogisen riippuvuuden lisäksi aineistojen hierarkkinen rakenne. Kun metsikkövaikutus saadaan erotettua satunnaisvirheestä, kalibrointi tehostuu ja johtaa entistä tarkempiin puustotunnuksiin. Jakauman ennustamisen sijaan uutena vaihtoehtona tutkitaan jakauman ratkaisemista momenttimenetelmällä, jolla keskeiset puustotunnukset saadaan ilman jakauman estimointivirhettä.</p>			
<b>Asiasanat</b> Ennustaminen, simulointi, mallit, metsänuudistus, taimikonhoito			
<b>Julkaisun verkko-osoite</b> <a href="http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp286.htm">http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp286.htm</a>			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
<b>Yhteydenotot</b> Jouni Siipilehto, Jokiniemenkuja, 01370 Vantaa. Sähköposti <a href="mailto:jouni.siipilehto@metla.fi">jouni.siipilehto@metla.fi</a>			
<b>Muita tietoja</b>			

## Sisällys

<b>1 Johdanto</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Malleissa käytetyt aineistot</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Taimien syntyminen ja kuoleminen</b> .....	<b>8</b>
3.1 Taimikon rakenteen hierarkkia .....	8
3.2 Uudistamisessa syntyvä taimitiheys.....	9
3.3 Varhaisperkauksen jälkeen syntyvä taimitiheys .....	11
3.4 Taimikuolleisuus.....	13
<b>4 Taimikoiden kehitys</b> .....	<b>14</b>
4.1 Taimikon kehitys iän funktiona .....	14
4.1.1 Kalibroittavat mallit puustotunnuksille.....	14
4.1.2 Läpimitta- ja pituustunnuksen loogisuus .....	15
4.1.3 Kuusikon alkukehitys 2000-luvun istutusaloilla.....	16
4.1.4 Pohjapinta-alan ennuste .....	17
4.2 Taimikon käsittelyt .....	18
4.2.1 Taimikon perkaus ja harvennus .....	18
4.2.2 Kilpailun kuvaus varhaisperkauksen jälkeen.....	20
4.2.3 Taimikonhoidon kustannukset.....	22
<b>5 Taimikon puustotunnuksista kuvauspuihin</b> .....	<b>22</b>
<b>6 Taimikkomallien vertailua</b> .....	<b>25</b>
6.1 Puustotunnusten kehityksen vertailu.....	25
6.2 Syntyvän taimiaineuksen vertailu .....	29
<b>7 Tulosten tarkastelua</b> .....	<b>31</b>
7.1 Mallien toiminta.....	31
7.1 Varhaiskehitysmallin kehityskohteita .....	33
<b>Kirjallisuus</b> .....	<b>35</b>
<b>Liitteet</b> .....	<b>39</b>

## 1 Johdanto

MOTTI on metsikön kehityksen simulointiohjelmisto. Sen avulla voidaan tarkastella ja havainnollistaa erilaisten kasvatusohjelmien vaikutuksia metsikön puuston kehitykseen, hakkuukertymiin ja taloudelliseen kannattavuuteen. MOTTI tuottaa puuston kehitysennusteita kasvu- ja tuotsmallien avulla, jotka pohjautuvat pitkäaikaiseen tutkimustyöhön ja laajoihin aineistoihin. Aineistoja on käytetty mallien laadintaan ja testaamiseen. Testauksessa on tarkasteltu sekä metsän kehitysennustetta kokonaisuutena että sen eri osamallien toimivuutta. Tämä oli tärkeä työvaihe, kun MELA-ohjelmistoon (ks. Siitonen ym. 1999) kehitettiin uudet kasvumallit vuosituhannen vaihteessa (ks. Hynynen & Ojansuu 1996). MOTTI-ohjelmistoon on edelleen helppo liittää uusia malleja testattavaksi tai käyttöön otettavaksi ja tällä tavalla MOTTI palvelee tutkijoita testausohjelmistona.

MOTTI-ohjelmiston ensimmäinen julkinen versio (MOTTI 1.1) ilmestyi 19.1.2006 internetin kautta vapaasti ladattavaksi. MOTTI 1.1 mahdollisti olemassa olevan varttuneen puuston tarkastelun lähtötilasta päätehakkuuseen. Jo vuosia ennen ensimmäisen version julkistusta ns. TutkijaMOTTI on ollut tutkijoiden apuvälineenä esimerkiksi erilaisten skenaarioiden laskennassa (esim. Matala ym. 2003, Ahtikoski ym. 2004, Hynynen ym. 2005). Muista MOTTI-ohjelmiston versioista mainittakoon SuojeluMOTTI (1.7.2011), jonka avulla voi laskea metsän suojelun puuntuotannollisia ja taloudellisia vaikutuksia (esim. Hynynen & Ahtikoski 2010). Metsäalan oppilaitoksille on räätälöity oma versio nimeltään OpeMOTTI (21.05.2013). Lisäksi tutkijoiden käytössä on VMI-MOTTI, joka nykymuodossaan pystyy käyttämään valtakunnan metsien 9. ja 10. inventoinnin (VMI9 ja VMI10) koealoja lähtötilanteena valtakunnallisten tai muiden suuralueiden skenaarioiden laskennassa (esim. Hynynen ym. 2014).

MOTTI-ohjelmiston rakenne on erilainen varhaiskehityksen ja sulkeutuneen puuston osalta. Sulkeutuneen puuston kehitys on melko hyvin ennustettavissa puiden väliseen kilpailuun perustuen. Se ennustetaan yksittäisten puiden kasvua ja ominaisuuksia kuvaavien mallien avulla. Sulkeutuneen metsän malleja ovat yksittäisen puun pohjapinta-alan kasvu, pituuskasvu, latvus-suhteen malli ja puun kuoleminen todennäköisyys (ks. Hynynen ym. 2002). Näissä malleissa puiden välistä kilpailua kuvataan metsikön tiheyden ja kohdepuuta suurempien puiden avulla. Metsikön ylitiheydestä johtuva kuoleminen on lisäksi kuvattu metsikkötason itseharvenemisrajalla (Hynynen 1993, Hynynen ym. 2002). MOTTI 2.0 (13.2.2007) laajennettiin mahdollistamaan päätehakkuun jälkeisen metsän uudistamisen ja taimikon varhaiskehityksen ennustamisen.

Metsikön varhaiskehitys kuvaa puuston kehitystä uudistamisesta sulkeutuneen metsän vaiheeseen, joka MOTTI-ohjelmistossa tarkoittaa pääpuulajin saavuttamaa 8 metrin valtapituutta. Puuston syntymisessä ja varhaiskehityksessä monet muut tekijät kuin puiden keskinäinen kilpailu on avainasemassa. Taimikon syntymiseen ja kehitykseen vaikuttaa sen perustamistapa, joka voi olla luontainen uudistaminen tai metsän viljely kylväen tai istuttaen. Esimerkiksi istutustulokseen vaikuttaa koko viljelyketju: taimimateriaalin kasvatus, kuljetus, välivarastointi, istutus-työ ja taimikonhoito. Reunametsä ja taimikon pintakasvillisuus vaikuttavat aina syntyvän puuston rakenteeseen, mutta näitä tunnuksia harvoin kuvataan käytännön metsäsuunnittelussa tai metsikkösimulaattoreissa. Maanmuokkauksella muutetaan kasvualustaa kasvatettavan puuston eduksi, mutta samalla vaikutetaan taimettumisaltiuteen ja vesottumiseen ja sitä kautta perkaus-tarpeeseen.

Taimikoiden syntymiseen ja varhaiskehitykseen liittyvää tutkimusta on olemassa, mutta se on sirpaleista. Tutkimuksissa on usein keskitytty vain tietyn tutkimusongelman tarkasteluun rajatulla maantieteellisellä alueella, minkä lisäksi aineistot ja mittausmenetelmät ovat vaihdelleet tutkimuksesta toiseen. Siksi olemassa olevien aineistojen yhdistäminen taimien syntymisen ja varhaiskehityksen mallittamiseksi on vaikeaa. Lisäksi osa tutkimustuloksista on jo vanhentunut, sillä erityisesti viljelymenetelmät ovat muuttuneet vuosien saatossa.

Koska yksittäisen taimen syntymisen ja varhaiskehityksen kuvaaminen on erittäin vaikea tehtävä monimutkaisuutensa ja suuren satunnaisuutensa vuoksi, taimikon syntymistä ja kehitystä on päädytty mallintamaan puuston tunnusten sijasta puuston keski- ja summatunnusten avulla. Näitä puustotunnuksia ovat esimerkiksi puuston runkoluku, pohjapinta-ala, keski- ja valtapituus. Moniin puustotunnuksiin liittyy suurta satunnaisuutta, kuten esim. luontaisen siemen- ja vesa-syntyisen taimiaineksen runkoluvut. Vaikka tarkastelu rajattaisiin tiettyyn kasvupaikkaan ja tiettyyn muokkausmenetelmään, on hajonta sekä eri taimikoiden välillä että taimikon sisällä edelleen huomattavan suurta. Taimien syntytaapa vaikuttaa pituuden ja läpimitan keskimääräiseen kehitykseen. Vesa-syntyisen puuston kehitys tunnetaan huonoimmin. Oman vaikeutensa varhaiskehityksen kuvaamiseen tuo jatkuva uusien metsänhoitomenetelmien käyttöönotto. Esimerkkeinä mainittakoon kannonnosto uudistusaloilta sekä metsän viljelyn että taimikonhoidon koneellistaminen.

Osa MOTTI-ohjelmiston metsikön uudistamisen malleista on julkaistu aikaisemmin. Tärkeimpinä mainittakoon ennusteet vakiintuneen taimiaineksen runkoluvuksi ja sen jakaantumiseksi puulajeittain kehityskelpoisiin ja kehityskelvottomiin olosuhteiltaan erilaisissa taimikoissa. Nämä ennusteet perustuvat VMI-tuloksiin (ks. Hynynen ym. 2002) ja niitä on käytetty MELA-ohjelmistossa ennen kuin ne otettiin käyttöön MOTTI 2.0 versiossa. MOTTI-ohjelmistossa taimikoiden kehitys ennustetaan metsikkötason puustotunnusmalleilla, jotka on laadittu erikseen männylle, kuuselle ja koivulle. Nämä mallit kattavat kaikki kehitysluokat pienistä taimikoista uudistuskypsiin metsiin. Näistä on julkaistu kuusikoiden puustotunnusmallit (Siipilehto 2006).

Muita malleja taimikoiden puustotunnuksille ovat julkaisseet mm. Saksa (1998), Varmola (1993), Huuskonen ja Hynynen (2006) ja Huuskonen ja Miina (2007) männylle ja Valkonen (1997) istutetulle kuuselle. Lisäksi Saksa ym. (2005) ovat julkaisseet mallit keskipituuden alkukehitykseksi nykykäytännön mukaisesti istutetuille kuusikoille. Nissinen (2002) on laatinut pohjapinta-alan ja pohjapinta-alan mediaaniläpimitan puulajeittaiset ennusteet nuorille metsille. Varmola (1993), Valkonen (1997) sekä Huuskonen ja Miina (2007) ovat kuvanneet viljelymetsien valtapituuden kehitystä. Miina ja Saksa (2008, 2013b) ovat tarkastelleet männyn ja kuusen taimikoiden puulajeittaisia runkolukuja ja keskipituuksia 3–5 vuotta taimikon perustamisesta. Siipilehto (2011a) laati kuusen puustotunnusmalleja vastaavat mallit männiköiden puustotunnuksille yhtäaikaaisesti kolmen vaihtoehdoisen läpimitajakauman ja Näslundin pituuskäyrän parametrien kanssa. Kaikkia edellä esitettyjä malleja verrataan tämän raportin loppuosassa MOTTI 3.0 (27.11.2012) ohjelmistolla saatuihin vastaaviin puustotunnuksiin.

Taimikon perustamiseen liittyy erilaisia toimenpiteitä, jotka vaikuttavat sekä perustamiskustannuksiin että taimikon tulevaan kehitykseen. Näitä ovat uudistusalan raivaus, maanmuokkaus ja metsän viljely. MOTTI (3.0) sisältää useita vaihtoehtoisia muokkausmenetelmiä, jotka vaikuttavat kustannusten lisäksi syntyviin taimimääriin sekä istutuskuusten alkukehitykseen. Nykyisessä muodossaan uudistamisketjujen vaihtoehtoja on runsaasti, mutta MOTTI ei vastaa yksityiskohtaisuudessaan uudistamisen vaihtoehtoja vertailevaa VILJO-laskentaohjelmaa (Parviainen ym. 1985).

MOTTI-ohjelmistoon voidaan syöttää tietoa joko metsikön puustotunnuksina esimerkiksi luke-malla metsäsuunnittelun Solmu-tietoa (ks. Solmun maastotyöopas 1997) tai syöttämällä ohjelmistolle käsin kuviotiedot tai vaihtoehtoisesti ns. puksitiedoston avulla suoraan puuston tietona. Jos lähtötiedot ovat metsikön puustotunnuksia, niin valtapituudesta riippuu, käsitelläänkö tunnuksia jatkossa puustotunnustasolla vai luodaanko puustotunnusten avulla metsikön kuvauspuut. Puiden kuvaus tehdään 8 metrin valtapituusvaiheessa ennustettujen kokojakaumien avulla. Jos kyseistä valtapituutta ei ole saavutettu, käytetään syötettyjä puustotunnuksia tuntemattomien puustotunnusten ennustamiseksi lähtötilanteessa ja sen jälkeen metsikön kehitystä ennustetaan puustotunnusmallien avulla 8 metrin valtapituuteen. MOTTI-käyttäjän kannalta on hyvä, että puustotunnukset eivät ole pakollisia tietoja kuviotietoja käsin syötettäessä. Lähtöpuuston luomiseksi riittää, kun metsikölle annetaan sijaintikunta, kasvupaikka, pääpuulaji, syntytaapa ja metsikön ikä. Näiden tunnusten avulla saadaan puustotunnusten odotusarvot.

MOTTI 3.0 versio vastaa pääsääntöisesti MOTTI 2.0 version ominaisuuksia varhaiskehityksen osalta. Poikkeuksena on luvussa 4.1.2. esiteltävä MOTTI 3.0 versioon tehty sovellus, jossa nykyaikaisten istutuskuusikoiden pituuskasvu jäljittelee Saksan ym. (2005) pituuskasvumallia. Uutena piirteenä on myös laajempi maanmuokkausmenetelmien kirjo ja muokkauksessa rikotun maapinnan osuuden vaikutus uudistusalan taimettumiseen. Lisäksi MOTTI 3.0 versiossa kuvataan taimikuolleisuutta tiheissä taimikoissa.

Metsikön uudistaminen kuvataan toistaiseksi vain kivennäismailla, mutta puustotunnuksilla kuvatus vakiintuneen taimikon kehitys voidaan ennustaa sekä kivennäis- että turvemaille. Taimikkovaiheessa käytetään kuitenkin aina kivennäismaiden puustotunnusmalleja, koska turvemaille niitä ei ole olemassa. Kivennäismaiden puustotunnusmalleja on alustavasti testattu turvekankaiden uuden puusukupolven aineistolla (Siipilehto ym. 2014).

Tämän raportin tarkoituksena on esitellä MOTTI-ohjelmiston version 3.0 metsikön uudistamista ja taimikon kehitystä kuvaavat mallit. Julkaisussa (Siipilehto 2006) kuvataan puustotunnusmallien periaatteet vain staattisessa tilassa. Koska MOTTI-ohjelmistossa puustotunnusmalleja käytetään dynaamisesti eri taimikonhoitotoimenpiteiden yhteydessä, niin mallien dynaaminen soveltaminen kuvataan tässä julkaisussa varsin seikkaperäisesti. Lopuksi simuloidaan joitakin vaihtoehtoisia taimikonhoitoketjuja ja tarkastellaan käsittelyn ajoituksen vaikutusta taimikon puustotunnuksiin, tuotokseen ja kustannuksiin ensiharvennusvaiheessa. MOTTI-ohjelmiston malleja verrataan myös muihin, aikaisemmin julkaistuihin taimikoiden tilaa ja puustotunnuksia kuvaaviin malleihin. Jatkossa MOTTI-ohjelmiston (3.0) taimikoiden vakiintumista ja varhaiskehitystä kuvaavista malleista käytetään yhteistä nimitystä MOTTI-mallit.

## 2 Malleissa käytetyt aineistot

Uudistamisessa syntyvien taimien puulajit ja runkoluvut perustuvat valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) tehtyihin mittauksiin. Alun perin mallit laadittiin seitsemännen inventoinnin, VMI7, tuloksista (Hynynen ym. 2002), mutta mallit on myöhemmin päivitetty vastaamaan Pohjois-Suomessa VMI8:n ja Etelä-Suomessa VMI9:n tuloksia. Aineisto käsitti täystiheät koealat, joiden valtapituus on yli 1,3 m, keskiläpimitta alle 8 cm sekä biologinen ikä Etelä-Suomessa alle 50 vuotta ja Pohjois-Suomessa alle 120 vuotta (eli VMI:n kehitysluokka ”varttunut taimikko” pois lukien vajaatuottoiset). Tällaisia metsikkökoealoja oli kaikkiaan noin 7000, joista kivennäismailla oli 90 % ja turvemaille 10 %. Männyn taimikot olivat enemmistönä 60 %:n osuudella, kun taas pääpuulajiltaan kuusen, rauduskoivun ja hieskoivun taimikoita oli vastaavasti 20 %, 9 % ja 6 %.

Puustotunnusmallien aineistoina olivat Metlan pysyvät taimikoiden TINKA- ja varttuneempien talousmetsien INKA-koealat, jotka ovat otos VMI7:n metsiköistä (Gustavsen ym. 1988). Siten MOTTI-ohjelmiston puustotunnusmallit eivät rajoitu vain taimikoihin vaan puustotunnuksia voidaan ennustaa koko kiertoajalle. Kustakin metsiköstä oli mitattu kolmen ympyräkoealan ryväs. Koealat yhdistettiin kuvaamaan metsikköä kokonaisuudessaan, jolloin yhdestä metsiköstä oli mitattuna yhteensä noin 100–120 puuta. Mallitusaineistoja rajattiin puustotunnusten osalta siten, että keskiläpimitta oli suurempi kuin 0,5 cm ja pohjapinta-ala oli suurempi kuin 0,5 m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup> (ks. Siipilehto 2006). Mallitusaineisto käsitti yhteensä 863 metsikköä, joista männiköitä oli 611, kuusikoita 227 ja koivikoita 26. Koivumallien laadinta-aineistoon poimittiin mukaan myös koivusekapuustoja havupuuvaltaisista metsistä, jolloin koivuaineisto laajeni 176 metsikköön. Taimikoiden TINKA-koealat käsittivät vain männyn ja kuusen taimikoita niiden tyypillisillä kasvupaikoilla. Männyn taimikoita oli 232 ja kuusen taimikoita 39 kappaletta.

Tässä raportissa MOTTI-malleja verrataan muihin Suomessa julkaistuihin taimikoiden tutkimustuloksiin. Uudistamisen yhteydessä syntyviä taimi-tehyyksiä on tarkoituksenmukaista verrata vain riittävän laajoista aineistoista saatuihin ennusteisiin. Tällainen aineisto on Metsänuudistamisen laadun hallinta –hankkeen inventointiaineisto, johon mitattiin Etelä-Suomesta kuuden metsäkeskuksen alueelta valittujen metsänhoitoyhdistysten kaikki iältään sopivat uudistusalat (Saksa & Kankaanhuhta 2007). Istutusalat inventoitiin 3 kasvukautta istutuksesta, kylvöalat 4 kasvukautta kylvöstä ja luontaisen uudistamisen alat 5 kasvukautta muokkauksesta. Miinan ja Saksan (2008) laatimat männyn uudistamistulosta kuvaavat mallit perustuvat em. inventointiaineiston 1971 männyn istutusalaan, 2217 kylvöalaan ja 723 luontaiseen uudistusalaan. Vastavasti kuusen uudistamistuloksen mallit perustuvat 2 455 istutettuun, 119 kylvettyyn ja 175 luontaisesti uudistettuun metsikköön (Miina & Saksa 2013b).

Puustotunnusten vertailuissa käytettyjen mallien laadinta-aineistot on kuvattu tarkemmin ao. julkaisuissa, mutta ne kuvataan tässä lyhyesti. Varmolan (1993) mallit perustuivat 100 männyn taimikkoon, joista 71 oli kylvetty ja 29 istutettu eri puolille Suomea; Saksan (1998) tutkimus sisälsi 27 männyn istutusala Suonenjoelta; Nissinen (2002) käytti INKA-aineiston ensimmäistä mittauskertaa rajaamalla aineiston alle 70 vuoden ikäisiin metsiköihin, joista männiköitä oli 244, kuusikoita 112 ja koivikoita 42; Saksan ym. (2005) kuusen taimien keskipituuden kasvumallit perustuvat 22 uudistusalaan, jotka oli nykykäytännön mukaisesti äestetty tai mätästetty ja istutettu paakkutaimilla Valkealassa ja Mikkelissä; Huuskonen ja Hynynen (2006) tutkivat 13 männyn ensiharvennusvaiheen kestokoetta, joilta oli mitattu 169 metsikkökoealaa Etelä- ja Keski-Suomessa; Huuskonen ja Miina (2007) mallittivat kehityskelpoisten mäntyjen alkukehitystä TINKA-aineiston 192 männikössä. Siipilehdon (2011a) männyn puustotunnusten mallitus- ja testausaineisto käsitti 752 INKA- ja TINKA-metsikköä, joiden koealat oli mitattu kolmeen kertaan.

### 3 Taimien syntyminen ja kuoleminen

MOTTI-ohjelmistolla metsää uudistettaessa käyttäjä päättää uudistamistavan. Luontaisessa uudistamisessa käyttäjä kuvaa siemenpuuston ominaisuudet ja voi jättää muokkaamatta tai valita muokkauksen. Metsänviljelyn yhteydessä käyttäjä päättää muokkauksen lisäksi viljelymenetelmän (istutus tai kylvö), viljeltävän puulajin, viljelytiheyden ja voi muuttaa istutustaimien 100 % tai kylvötaimien 90 % eloonjäämisen oletusarvoa. Viljellyn pääpuulajin lisäksi taimikkoon syntyy tulevan kasvujakson aikana luontainen sekapuusto, jonka tiheyteen vaikuttaa taimikon maantieteellinen sijainti, kasvupaikka ja muokkaus. Kun taimikossa tehdään varhaisperkaus, vapautuu kasvutilaa ja syntyy toinen taimijakso. Varhaisperkauksen ajankohtana taimettumiskunto on heikentynyt, joten taimikon kokonaistiheys ei saavuta alkuperäistä tiheyttä. Osa syntyvästä sekapuustosta kuvataan ("korpamerkitään") kasvatuskelpoisena ja osa kasvatuskelvottomana. Luonnontaimista osa kuolee, jos taimikkoa kasvatetaan tiheänä. Kuoleminen kohdistuu ensisijaisesti kasvatuskelvottomiksi merkittyihin taimiositteisiin. Seuraavissa kappaleissa kuvataan yksityiskohtaisemmin taimikon rakenne, taimien syntyminen ja kuoleminen. Syntyvien puusto-ositteiden keskimääräinen koko (esim. keski- ja valtapituus) ennustetaan puustotunnusmalleilla, jotka kuvataan luvussa 4.

#### 3.1 Taimikon rakenteen hierarkkia

MOTTI-ohjelmistossa taimikon rakenne kuvataan puusto-ositteiden avulla. Ositteet muodostetaan taimijakson (ensimmäinen, toinen, kolmas), puulajin (mänty, kuusi, rauduskoivu, hieskoivu, haapa, harmaaleppä, tervaleppä, muu havupuu ja muu lehtipuu), syntyvän (istutus, kylvö, luontainen) ja kehityskelpoisuuden (kehityskelpoinen, kehityskelvoton) mukaan. Uusi taimijakso syntyy metsikköä perustettaessa ja varhaisperkauksen jälkeen. Siten esimerkiksi istutetussa kuusen taimikossa voi pelkästään kuusi esiintyä ensimmäisen taimijakson ositteissa: 1) istutettu kehityskelpoinen, 2) luontainen kehityskelpoinen ja 3) luontainen kehityskelvoton sekä



perkauksen jälkeen syntyvässä *toisen taimijakson* ositteissa: 4) luontainen kehityskelpoinen ja 5) luontainen kehityskelvoton. (Jos varhaisperkauksia tehtäisiin kaksi kertaa, syntyisi myös kolmas taimijakso). Kun kaikki taimikossa esiintyvät puulajit ositetaan taimijakson, syntyvän ja kehityskelpoisuuden mukaan, saadaan taimikon rakenteesta moniulotteinen taulukko. Kunkin puusto-ositteen ominaisuuksilla, kuten ikä, runkoluku ja keskipituus, on ratkaiseva merkitys sekä tulevan kehityksen että mahdollisen taimikuolleisuuden kannalta.

### 3.2 Uudistamisessa syntyvä taimitiheys

Taimia ennustetaan syntyvän metsikköä perustettaessa (ensimmäinen taimijakso) ja varhaisperkauksen jälkeen (toinen taimijakso). Aikanaan MELA-malleja varten taimikon dynamiikkaa kuvattiin taimitiheytenä, jota kohti taimikko kehittyi (ks. Hynynen ym. 2002, sivu 31). MOTTI-ohjelmistossa taimikon dynamiikkaa on yksinkertaistettu siten, että taulukoitu taimitiheys saavutetaan ensimmäisellä simulointiaskeleella taimikon perustamisen yhteydessä sen sijaan, että taimikkoon syntyisi uutta taimiainesta jokaisella kasvuaskeleella ja tiheys saavuttaisi taulukoidun tiheyden useamman kasvuaskeleen jälkeen. Tätä yksinkertaistusta voidaan perustella sillä, että simulointi käyttää pääsääntöisesti 5-vuoden kasvuaskelta ja tutkimusten mukaan taimikon maksimitiheys saavutetaan melko nopeasti, esimerkiksi Lehtosalon ym. (2010) mukaan noin 6 vuotta muokkauksesta.

Metsikköä perustettaessa uudistusosalalle syntyvä taimitiheys esitetään taulukkona, jonka arvoja skaalataan lämpösumman ja muokkaustavan mukaan. Taulukot on laadittu erikseen luontaisesti syntyneen puuston kokonaisrunkoluvuille puulajin ja kasvupaikkatyypin funktiona. Täydelliset, VMI7:n tuloksiin perustuvat taulukot on esitetty Hynynen ym. (2002) raportin taulukoissa 15 ja 17. Näitä on myöhemmin päivitetty VMI8:n ja VMI9:n tuloksilla ja päivitetty taulukot runkoluvuista on tämän raportin liitteissä 1A ja 1B. Seuraavassa tarkastellaan vain osia liitteen 1A ja 1B taulukoista. Viljelytaimikoiden luontaisten taimien kokonaisrunkoluvut metsämaan kankaiden kasvupaikoille ja tärkeimmille pääpuulajeille on esitetty taulukossa 1 ja vastaavat puulajiosuudet tärkeimmille syntyville luontaisille sekapuulajeille on taulukossa 2. Kuusen viljelytaimikoissa on keskimäärin suurempi luontaisten taimien runkoluku kuin männyn taimikoissa toisaan vastaavilla kasvupaikoilla. Suurimpia sekapuuston tiheyksiä saadaan taulukon 1 mukaan hieskoivun tuoreen kankaan taimikoissa, joissa runkoluku ylitti 10000 ha<sup>-1</sup>. Hieskoivikot olivat myös selvästi pääpuulajivaltaisimpia (77 %), kun taas kuusen ja männyn viljelytaimikoissa luontaista pääpuulajia syntyi 21–40 % sekapuuston kokonaisrunkoluvusta.

Täydelliset taulukot runkoluvuille esitetään erikseen kankaille, korville ja rämeille pääpuulajin ja kasvupaikkatyypin mukaan (liitetaulukot 1A ja 1B). Turvemaiilla syntyvät taimimäärät ovat keskimäärin suurempia turvemaan paremman taimettumisaltiuden vuoksi. Esimerkiksi rämeistä kehittyneellä puolukaturvekankaalla viljelymännikön luontaisen sekapuuston kokonaisrunkoluku on 10444 tainta hehtaarilla, kun se kuivahkolla kankaalla on 6 490 tainta hehtaarilla (ks. liitetaulukko 1B).

**Taulukko 1.** Esimerkki viljelyssä syntyvistä luontaisten taimien kokonaisrunkoluvuista kankailla neljän mahdollisen pääpuulajin ja kasvupaikan mukaan.

	Mänty	Kuusi	Rauduskoivu	Hieskoivu
Lehto	5 772	8 021	3 124	4 722
Lehtomainen	8 891	8 444	7 341	8 267
Tuore	7 795	9 038	8 320	10 991
Kuivahko	6 490	7 000	7 083	8 900
Kuiva	4 519	5 591	5 917	7 200
Karukko	3 545	4 409	4 625	5 400

**Taulukko 2.** Esimerkki puulajiosuuksista taimikon pääpuulajin (1. sarake) ja sivupuulajien (1. rivi) osalta. Diagonaalilla näkyy vahvennettuna luontaisesti syntyvän sekapuuston pääpuulajin osuus.

Pääpuulaji	Sivupuulaji					Yhteensä
	Mänty	Kuusi	Raudus	Hies	...	
Mänty	<b>0,3957</b>	0,0643	0,1010	0,3232	...	1,000
Kuusi	0,0164	<b>0,2135</b>	0,0192	0,1525	...	1,000
Raudus	0,0032	0,0286	<b>0,6608</b>	0,0997	...	1,000
Hies	0,0000	0,0000	0,0108	<b>0,7715</b>	...	1,000

Lämpösumma vaikuttaa luontaisesti syntyvän taimiaineksen määrään yhtälön (1) mukaisesti. Jos oletetaan viljelty taimikko lämpösumma-alueella 1 250 °Cvrk, niin em. taulukkoarvo kasvaa noin 12 %. Lämpösummalla 700 °Cvrk runkoluku on vain 40 % taulukkoarvosta. Esimerkiksi kuusen istutus tuoreelle kankaalle kolmessa eri kunnassa, jotka ovat Akaa (1 234 °Cvrk), Alavus (1 093 °Cvrk) ja Rovaniemi (895 °Cvrk), tuottaa luontaista sekapuustoa 10 343 ha<sup>-1</sup>, 9 887 ha<sup>-1</sup> ja 7 755 ha<sup>-1</sup>.

$$N_{tot} = \exp[\ln(N_{ta}) - 13,441 + 2,362 \ln(DD - 400) - 0,00282(DD - 400)] \quad (1)$$

missä

$N_{tot}$  = kokonaistaimimäärä

$N_{ta}$  = kokonaistaimimäärä taimimäärätaulukon ositteessa

$DD$  = lämpösumma, vuorokausiastetta, °Cvrk

Jos uudistaminen tehdään muokkaamattomaan maahan, syntyy vähemmän taimia kuin muokattuun maahan. MOTTI-ohjelmistossa se kuvataan kasvupaikan mukaisilla korjauskertoimilla. Nämä kertoimet ovat samoja kuin luvussa 3.2 esitetyn taulukon 3 sarakkeella 9 vuotta uudistamisen jälkeen esitetyt lukuarvot. Siten esimerkiksi muokkaamattomalle lehtomaiselle kankaalle syntyy 40 % ja kuivalle kankaalle 81 % keskimääräisestä muokatun uudistusalan kokonaistheydestä (ks. taulukko 3)

MOTTI 3.0 versiossa syntyvän taimiaineksen määrään vaikuttaa muokkauksessa rikotun maanpinnan osuus. Tätä ominaisuutta ei ollut aikaisemmissa MOTTI versioissa. Eri maanmuokausmenetelmillä tehtyjen muokkausalojen inventointeihin perustuva muokkausvaikutuksen malli saatiin vuonna 2009 metsänhoitopäällikkö Janne Soimasuolta (Metsämannut Oy). Eri muokausmenetelmät rikkovat erilaisilla maanpintaa. Mitä enemmän maanpintaa rikotaan, sitä runsaammin maa taimettuu. Muokkausvaikutuksen korjauskerroin  $c_{Muok}$  on muotoa:

$$c_{Muok} = 299 \times KivMaa\% / 5415 \quad (2)$$

missä

$KivMaa\%$  on muokkaustavasta riippuva rikotun maanpinnan osuus (0–100 %)

Pienin rikotun maanpinnan osuus (15 %) saadaan sekä laikutuksella, jossa vain humus poistetaan että kääntömätästyksellä, jossa irrotettu maa käännetään samaan kuoppaan, josta se on kaviettu. Sekä laikku- että ojitusmätästyksen oletetaan rikkovan 25 % maanpintaa, kun taas suurin osuus (30 %) saadaan äestyksellä, jossa tehdään jatkuvaa kivennäismaata paljastavaa muokausjälkeä (ks. Luoranen ym. 2007). Kääntömätästyksen ja laikutuksen yhteydessä muokkausvaikutuksen kerroin on 0,83, joten taulukoitu runkoluku pienenee 17 %. Laikku- ja ojitusmätästyksessä muokkausvaikutuksen kerroin saa arvon 1,38 ja äestyksessä arvon 1,66. MOTTI 3.0 versio tuottaa siten eri maanmuokkaustavoissa kääntömätästystä ja laikutusta lukuun ottamatta

suurempia taimikon tiheyksiä kuin MOTTI 2.0. Koska metsän viljely tulisi tehdä muokattuun maahan, niin MOTTI-simuloinnissa sekä istutus- että kylvöalat oletetaan muokatuiksi silloin, kun kyseistä tietoa ei ole olemassa. Tässä tapauksessa oletettu muokkaus käsitellään 25 % maanpintaa rikkovana menetelmänä.

Luontaisesti syntyvä kokonaisrunkoluku jaetaan kasvatuskelpoisten ja kasvatuskelvottomien taimien runkoluvuiksi. Kasvatuskelpoisten runkoluvun osuus on muotoa:

$$N_{kas} / N_{tot} = 1 - \exp\left\{-\frac{e^{-2181,09 - 26,914 \cdot luon - 200,922 \cdot vilj} \cdot u}{e} N_{tot}\right\} \quad (3)$$

missä

$N_{kas}$  = kasvatuskelpoisten taimien määrä

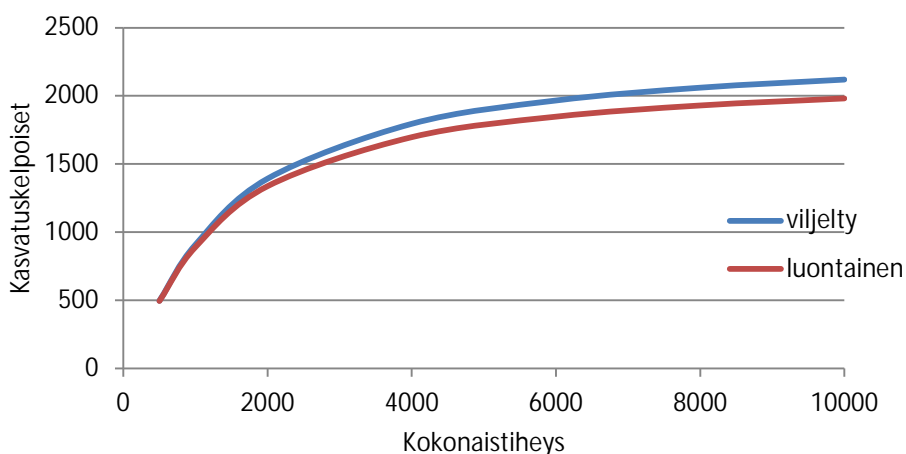
$N_{tot}$  = kokonaistaimimäärä

$luon$  = dummy-muuttuja, (jos luontainen niin 1 ja jos viljelty niin 0)

$vilj$  = dummy-muuttuja, (jos viljelty niin 1 ja jos luontainen niin 0)

Käytännössä kasvatuskelpoisten runkoluku jää tällä mallilla alle 2 200 ha<sup>-1</sup> (kuva 1). Mainittuun tiheyteen vaadittaisiin noin 20 000 hehtaarikohtaista kokonaisrunkolukua viljelytaimikossa ja tätä paljon suurempaa runkolukua luontaisessa taimikossa.

### Kasvatuskelpoisten taimien osuus



Kuva 1. Kasvatuskelpoisten taimien riippuvuus kokonaistiheydestä.

### 3.3 Varhaisperkauksen jälkeen syntyvä taimitiheys

MOTTI-simuloinnissa taimikon varhaisperkaus tehdään oletuksena noin 1,5 metrin valtapituusvaiheessa. Sitä voidaan aikaistaa tai se voidaan tehdä hieman myöhemmin 2 metrin valtapituuteen asti. Toinen taimijakso syntyy varhaisperkauksen jälkeen. Toisen taimijakson tiheys perustuu luontaisten taimien kokonaisrunkolukuun (taulukko 1), jota korjataan edellä esitetyn mukaisesti lämpösummalla (yhtälö 1) ja muokkausvaikutuksella (yhtälö 2). Lisäksi tarvitaan taimettumiskunnon kerrointa. Kivennäis- ja turvemaan taimettumiskunnon oletetaan olevan parhaimmillaan heti muokkauksen jälkeen. Siksi toisen taimijakson kokonaisrunkolukua korjataan pienemmäksi muokkauksesta kuluneen ajan funktiona (yhtälö 4). Varhaisperkauksen yhteydessä

kasvamaan jätetty sekapuusto luetaan kokonaisrunkolukuun, joten se vähentää omalta osaltaan syntyvän toisen taimijakson kokonaisrunkolukua. Varhaisperkauksen jälkeen taimitiheys on siten aina hieman pienempi kuin metsikköä perustettaessa.

Taulukossa 3 on laskettuna taimettumiskunnan kertoimia ( $c$ ) kangasmaille Etelä-Suomessa (1 250 °Cvrk). Korjauskertoimista nähdään, kuinka taimettumiskunto heikkenee viljavilla kasvupaikoilla nopeasti, mutta karuilla kasvupaikoilla muutos on huomattavan hidasta. Esimerkiksi tuoreella kankaalla taimettumiskunto puoliintuu alkuperäisestä 9 vuoden kuluttua, mutta jo viidessä vuodessa se on laskenut 56 %:iin (ks. taulukko 3).

Malli taimettumiskunnan kertoimelle ( $c$ ):

$$c = b_i S^i e^{-\frac{T^2}{b_j S^j \frac{DD_{\max} - DD}{DD_{\max}}}} \quad (4)$$

missä

- $c$  = maan taimettumiskunnan kerroin  
 $S$  = kasvupaikan luokkamuuttuja (kuuluu kasvupaikkaan = 1, ei = 0)  
 $b_i$  = muokkausvaikutuksen kerroin: muokattu = 1,0,  
muokkaamaton kasvupaikoittain: karu 0,9, kuiva 0,8, kuivahko 0,6, tuore 0,5, lehtomainen ja lehto 0,4, turvemaille kerroin on tuoretta kangasta vastaavilla ja sitä viljavimmilla kasvupaikoilla 0,6  
 $T$  = aika muokkauksesta, muokkaamattomilla aika hakkuusta  
 $b_j$  = kasvupaikoittainen parametri: karu ja kuiva 25, kuivahko 15, tuore 10, lehtomainen ja lehto 5  
 $DD$  = lämpösumma, vuorokausiastetta, °Cvrk  
 $DD_{\max}$  = lämpösumman maksimi, 1 400 °Cvrk  
 $b_3$  = parametri = 1,25

**Taulukko 3.** Kankaille syntyvän kokonaisrunkoluvun korjauskertoimia (taimettumiskunto) muokkauksesta tai uudistamisesta kuluneen ajan funktiona.

	Aika vuosina									
Kasvupaikka	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lehto	1,00	0,905	0,702	0,529	0,439	0,408	0,401	0,400	0,400	0,400
Lehtomainen	1,00	0,905	0,702	0,529	0,439	0,408	0,401	0,400	0,400	0,400
Tuore	1,00	0,959	0,855	0,732	0,627	0,559	0,523	0,507	0,502	0,500
Kuivahko	1,00	0,977	0,918	0,839	0,761	0,696	0,651	0,624	0,610	0,604
Kuiva	1,00	0,993	0,974	0,947	0,915	0,885	0,858	0,837	0,822	0,812
Karukko	1,00	0,997	0,987	0,974	0,958	0,943	0,929	0,919	0,911	0,906

### 3.4 Taimikuolleisuus

Taimikuolleisuutta ei ole otettu huomioon aiemmin julkaistussa MOTTI 2.0 versiossa, mutta MOTTI 3.0 versiossa kilpailusta johtuvaa taimikuolleisuutta kuvataan varovaisuusperiaatteella. Tämä tarkoittaa sitä, että ennustettu kuolleisuus voi kohdistua vain ensimmäisen taimijakson *kehityskelvottomiin* puusto-ositteisiin ja varhaisperkauksen jälkeen syntyvän *toisen taimijakson kaikkiin ositteisiin*. Mallin perustana on puutason kuolemismalli (ks. Hynynen ym. 2002, s. 50), jossa kilpailu kuvataan itseharvenemisrajaan perustuvan suhteellisen tiheyden (Relative Density Factor, *RDF*) avulla. Itseharvenemisrajat ovat puulajeittaisia ja ne kuvataan runkoluvun ja mediaanipuun kantoläpimitan funktiona.

Taimikuolleisuutta ennustettaessa taimikon tiheydestä johtuva kilpailu on avainasemassa. Taimikoissa yksittäisen puun sijasta kuvauksen kohteena on puulaji- ja puujakso-ositteiden välinen kilpailu, jossa ositetta edustaa sen runkoluku, pohjapinta-alan mediaanipuun pituus ( $h_{gM}$ ) ja kantoläpimita ( $d_{gMk}$ ). Taimikoissa kantoläpimita saadaan pituudesta TINKA-aineistosta estimoidulla logaritmisella sekamallilla, jossa satunnaisen toistuvista mittauksista johtuva metsikkövaikutuksen keskivirhe  $s_{eM}$  oli 0,037 ja jäännösvirhe  $s_{er}$  0,041. Harhankorjaus  $(s_{eM} + s_{er})^2/2$  on lisätty vakioon yhtälön (5) takaisinmuunnosta varten.

$$d_{gMk} = \exp[0,4132 + 1,0360 \ln(h_{gM})] \quad (5)$$

Taimikuolleisuutta kuvataan vasta sen jälkeen, kun metsikön kokonaiskilpailua kuvaava suhteellinen tiheys (*RDF*) on suurempi kuin 0,3. Taimikon *RDF* saadaan laskemalla yhteen kaikkien puusto-ositteiden (*i*) suhteelliset tiheydet (*RDF*(*i*)). Kohdepuusto-ositteen kilpailuaseman laskennassa käytetään avuksi asymmetristä tiheystekijää *RDFL*. Sitä laskettaessa kilpaileva osite (*i*) tulee mukaan laskentaan vain silloin, kun sen pituus on vähintään sama kuin kohdepuusto-ositteen eli  $h_{gM \text{ kilpailija}} \geq h_{gM \text{ kohde}}$ . Kun yhtäsuuruus on laskennassa mukana, niin pisimmän puusto-ositteen kilpailuindeksiksi saadaan puolet oman ositteen kokonaiskilpailusta. Tässä on periaatteena se, että keskimmäisenä puuna mediaanipuulle kohdistuu puolet oman ositteensa kilpailusta.

$$RDFL_{\text{kohde}} = S \text{ RDF}(i)_{\text{kilpailija}} / (2 \times h_{gM \text{ kilpailija}} / h_{gM \text{ kohde}}), \quad (6)$$

missä

$RDFL_{\text{kohde}}$  = kohdepuusto-ositteen kilpailuasema

$RDF(i)_{\text{kilpailija}}$  = kilpailevan puusto-ositteen ( $h_{gM \text{ kilpailija}} \geq h_{gM \text{ kohde}}$ ) suhteellinen tiheys

$RDF(i) = (N(i)/a_{1(i)}) \times Dk^{a_{2(i)}}$  eli taimikon puusto-ositteen *i* suhteellinen tiheys lasketaan ko. ositteen runkoluvun (*N*) ja kantoläpimitan (*Dk*) funktiona. Parametrit  $a_{1(i)}$  ja  $a_{2(i)}$  ovat puulajikohtaisia ja ne löytyvät julkaisusta Hynynen ym. (2002, s. 53).

Taimikoille sovellettava kuolemismalli (7) ilmaisee puusto-ositteen kuolevan puuston suhteellisen osuuden ja malli on kaikille puulajeille yhteinen:

$$P_{\text{kuolee}} = 1 / \{ 1 + \exp[8,8 - 4,5 \text{ RDFL} - 55,5 (\text{RDFL}/Dk)] \} \quad (7)$$

Käytännössä taimikuolleisuusmalli on käytössä vain silloin, kun puusto on jaettu kasvatuskelvottomiin ja kasvatuskelvottomiin ositteisiin. Tämä ehto toteutuu metsää uudistettaessa MOTTI-ohjelmistolla. Lisäksi ehto toteutuu VMI-MOTTI-ohjelmistossa, koska VMI-aineistoissa kuvataan kasvatuskelvottomien ja kasvatuskelvottomien runkolukusuhteet. Toisaalta yksityismetsien metsäsuunnittelun ns. Solmu-kuviotieto (Solmun maastotyöopas 1997) ei tätä tietoa sisällä. Kun puusto-ositteita syötetään interaktiivisesti MOTTI-ohjelmistolle, ei jakoa kehityskelpoisuuden ja -kelvottomuuden suhteen tehdä. Sen sijaan MOTTI-käyttäjä voi antaa viljelymateriaalin eloonjäämisosuuden metsää uudistettaessa. Eloonjäämisen oletusarvo on 100 % istutustaimille ja 90 % kylvötaimille.

## 4 Taimikoiden kehitys

### 4.1 Taimikon kehitys iän funktiona

#### 4.1.1 Kalibroittavat mallit puustotunnuksille

MOTTI-ohjelmistossa puustotunnusten kehitys ennustetaan metsikön iän funktiona metsikön varhaiskehitysvaiheessa. Vain kuuselle tehtyt mallit on julkaistu (Siipilehto 2006), mutta rakenteeltaan samanlaiset mallit on laadittu myös männylle ja koivulle. Rauduskoivun malleja sovelletaan myös haavalle ja hieskoivun malleja muille lehtipuille. Malleilla ennustettavat puustotunnukset ovat pohjapinta-ala ( $G$ , m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup>), runkoluku ( $N$ , ha<sup>-1</sup>), aritmeettinen keskiläpimitta ( $D$ , cm) ja -pituus ( $H$ , m), pohjapinta-ala mediaanipuun läpimitta ( $d_{gM}$ , cm) ja -pituus ( $h_{gM}$ , m) sekä valtaläpimitta ( $D_{dom}$ , cm) ja -pituus ( $H_{dom}$ , m). Mallien selittävinä muuttujina ovat puuston ikä ja syntytyyppi sekä kasvupaikkamuuttujina lämpösumma ja kasvupaikkatyyppi. Mallitusvaiheessa rinnankorkeusläpimittatunnukset ( $D_i$ ) muutettiin kannonkorkeudelle ( $D_k$ ) Laasasenahon (1975) yhtälöllä  $D_k = 2 + 1,25 \times D_i$ . Puustotunnusmallit oletettiin tulomuotoisiksi (yleisessä muodossa  $Y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_n^{a_n}$ ) ja ne linearisoitiin logaritmuunnoksen avulla yhtälön (8) mukaisesti.

$$\ln(Y) = a_0 + a_1 (T)^k + a_2 \ln(DD) + a_3 \text{Vilj} \times T^k + a_i S_i + \epsilon \quad (8)$$

missä

$Y$  = metsikkötunnus

$T$  = kokonaisikä (vuotta)

$k$  = kokeellinen parametri, arvo -1, -0,9, ..., -0,5

$DD$  = lämpösumma (°Cvrk)

$\text{Vilj}$  = dummy-muuttuja (arvo 1 viljellyille, 0 luontaisille puustoille)

$S_i$  = dummy-muuttujat kasvupaikkatyypeistä ( $i$ ) ja lisämääreistä kivinen tai soistunut

$a_0 - a_i$  = mallin estimoitavat parametrit

$\epsilon$  = jännösvirhe.

Mallit estimoitiin yhtäaikaaisesti ns. SUR-mallina (näennäisesti riippumaton regressio eli seemingly unrelated regression), jolloin mallien virheiden väliset riippuvuudet tulivat hyödynnettyä mallien estimoinnissa (ks. Zellner 1962).

SUR-mallin etu sovellustilanteessa on siinä, että mikäli yhden tai useamman selitettävän muuttujan arvo tunnetaan tietyllä iällä, voidaan kaikkien mallissa mukana olevien selitettävien muuttujien ennusteet kalibroida vastaamaan tilannetta. Kalibrointi tapahtuu lineaarisen ennustamisen teorian mukaisesti (Lappi 1993). Kalibroitu ennuste (yhtälö 9) odotusarvolle  $\mu_i$  on ns. paras lineaarinen harhaton ennuste (Best Linear Unbiased Predictor, BLUP).

$$\hat{x}_1 = m_1 + s_{12} S_{22}^{-1} (x_2 - m_2) \quad (9)$$

missä

$x_1$  = skalaari (tuntematon selitettävä puustotunnus)

$x_2$  = vektori (tunnetut selittävät puustotunnukset)

$S_{12}$  = vektori (kovarianssit tuntemattoman selitettävän ja tunnettujen selittäjien välillä)

$S_{22}$  = varianssi-kovarianssi matriisi tunnettujen selittäjien  $x_2$  välillä (Lappi 1993).

Koska mallit ovat logaritmisia, lisätään mallin vakiotermin puolet virhevarianssista takaisinmuunnoksen harhan korjaamiseksi. Virhevarianssi pienenee, kun malliin tuodaan uusia selittäjiä, eli kalibrointimuuttujia. Kalibroitu virhevarianssi lasketaan yhtälön (10) avulla.

$$\text{var}(\hat{x}_1 - x_1) = s_{11} - s_{12} \mathbf{S}_{22}^{-1} s_{12}^{\top} \quad (10)$$

missä

$s_{11}$  = skalaari (selitettävän muuttujan alkuperäinen varianssi)

$s_{12}$  = vektorin  $\mathbf{S}_{12}$  transpoosi.

Esimerkiksi kuusen pohjapinta-alan odotusarvon keskivirhe oli 34 %. Kun pohjapinta-ala kalibroitiin tyypillisillä taimikon puustotunnuksilla  $N$ ,  $D$  ja  $H$ , niin kalibroitu keskivirhe oli 17,7 %. Mediaaniläpimitan ( $d_{gM}$ ) 18 %:n keskivirhe oli vastaavan kalibroinnin jälkeen 10,8 %.

Tyypillisessä MOTTI-simuloinnissa puustotunnusmalleja kalibroidaan runkoluvuilla (katso luku 4.2.1). Puustotunnuksen ja runkoluvun välisen riippuvuuden voimakkuutta kuvaa linearisoidujen mallien virheiden väliset kovarianssit ja korrelaatiokertoimet. Esimerkiksi männyllä runkoluvun korrelaatiokerroin pohjapinta-alan kanssa oli 0,46; keskiläpimitan -0,49; keskipituuden -0,24; valtaläpimitan -0,21 ja valtapituuden kanssa -0,14 (Siipilehto 2011a). Siten runkoluvun kasvaminen suurentaa pohjapinta-alaa, mutta pienentää keskitunnuksia siten, että keskiläpimita pienenee suhteellisesti eniten ja valtapituus vähiten.

Metsikön puusto-ositteiden runkoluvuista lasketaan kokonaisrunkoluku ja kunkin puusto-ositteen osuus kokonaisrunkoluvusta. Kun tarkastelun kohteena olevan puusto-ositteen summatunnuksia ( $N$  ja  $G$ ) ennustetaan, malliin tuodaan kyseisen ositteen osuus  $P$  ( $0 < P \leq 1$ ) vastavasta metsikön summatunnuksesta. Siten esimerkiksi männyn summatunnus saadaan lisäämällä  $\ln(N)$  ja  $\ln(G)$  malliin termi  $+1,0 \times \ln(P_{m\ddot{a}nty})$ . Tällä tavalla tunnistetaan metsikön kokonaistiheys ja sen vaikutus malliperheen dimensioihin tulee huomioiduksi. Jos kyseessä olisi puhdas männikkö, niin  $P = 1$  ja samalla  $\ln(P) = 0$ , jolloin kyseinen termi ei muuta odotusarvoa. Teknisesti taimikon tiheyden vaikutus puustotunnuksiin on sama, onpa puuston tiheys 4000 runkoa  $\text{ha}^{-1}$  puhtaassa metsikössä tai 2000 runkoa  $\text{ha}^{-1}$ , kun kyseinen runkoluku on 50 % kokonaistiheydestä.

#### 4.1.2 Läpimita- ja pituustunnuksen loogisuus

Kuusen mallien odotusarvoja metsikön iän funktiona on kuvattu alkuperäisessä julkaisussa syntytävän ja kasvupaikan mukaan 100 vuoden ikään asti (ks. Siipilehto 2006, kuva1). Kiinnostuksen kohteena oli yhtä lailla valtapituus 100 vuoden iällä kuin mallien looginen käyttäytyminen taimikkovaiheessa. MOTTI-mallien testaamiseksi erityisesti taimikoiden varhaisperkausvaiheessa tarkastellaan seuraavaksi läpimitaennusteita sinä ajankohtana, kun pituusenusteet saavuttavat rinnankorkeuden, 1,3 m. Esimerkiksi kuusen  $D_{dom}$  odotusarvo tuoreen kankaan puhtaassa kuusikossa Etelä-Suomessa (1 200 °Cvrk) oli noin 4 cm, kun  $H_{dom}$  saavutti rinnankorkeuden. Sen sijaan  $D$  ja  $d_{gM}$  olivat alle 1 cm, kun  $H$  ja  $h_{gM}$  saavuttivat rinnankorkeuden. Männyn malleilla valtaläpimita oli noin 2–3 cm, kun valtapituus saavutti rinnankorkeuden. Muiden läpimittojen odotusarvot olivat pääsääntöisesti alle 1 cm luontaisilla ja hieman yli 1 cm viljellyillä männyn uudistusaloilla. Siten valtaläpimitan odotusarvot olivat havupuilla liian suuria, kun valtapituus ylitti rinnankorkeuden. Runkoluvulla kalibrointi hieman heikensi tunnuksen loogisuutta, koska valtaläpimita kasvoi kalibroinnissa valtapituuksia enemmän. Esimerkiksi puhtaan metsikön runkoluku 2 000  $\text{ha}^{-1}$  kasvatti kuusen valtaläpimitan hieman yli 4 cm:iin ja männyn valtaläpimitat kasvoivat noin 0,5 cm runkoluvulla kalibroinnin yhteydessä. Koivulla läpimitan odotusarvot olivat pääsääntöisesti alle 0,5 cm rinnankorkeuden kynnysvaiheessa, mutta toisinaan luontaisesti syntyneen koivikon läpimitan ennuste sai myös negatiivisen arvon. Tämä on sinänsä ymmärrettävää, koska koivun piiskamaisen latvan vuoksi läpimita on hyvin lähellä nolaa pituuden ylittäessä rinnankorkeuden. Mallien loogisuuteen voidaan vaikuttaa niin aineiston raja-

uksella kuin mallin formuloinnilla, erityisesti mallin vasteen ja selittävän ikämuuttujan muunnoksilla. Näihin on jatkossa kiinnitettävä erityistä huomiota, kun malleja uudistetaan.

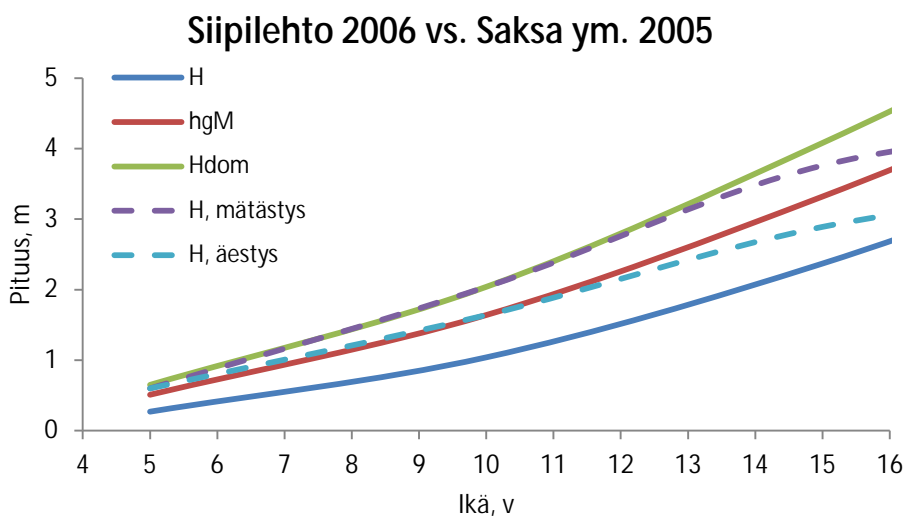
#### 4.1.3 Kuusikon alkukehitys 2000-luvun istutusaloilla

Puustotunnusmallit kuvaavat 1980-luvulla ja sitä aikaisemmin perustettujen viljelykuusikoiden varhaiskehitystä kivennäismaiden talousmetsien pysyviltä INKA- ja TINKA-koealoilla, koska mallit on laadittu ko. aineistojen avulla. Tyypillistä tuon ajan istutuskuusille oli jurominen. Juromisen takia istutuskuusikon alkukehitys erosi suhteellisen vähän luontaisesti syntyneen kuusikon alkukehityksestä ja siksi istutus ei ollut edes merkitsevä selittäjä valtapuutunnusten ennustamiseksi (ks. Siipilehto 2006). Nykykäytännön mukaiset kuusen istutukset onnistuvat 80-luvulla ja aikaisemmin istutettuja paremmin mm. kehittyneiden maanmuokkausmenetelmien ja hyvän viljelymateriaalin ansiosta (ks. Heiskanen 2005, Kainulainen 2011, Luoranen & Kiljunen 2006, Saksa 2011).

Nykyisiin kuusikon istutusmenetelmiin perustuva Saksan ym. (2005) keskipituuden kasvumalli on laadittu logaritmiselle pituuskasvulle istutuksesta kuluneen ajan funktiona. Kuvassa 2 kasvumallin ennusteita verrataan Siipilehdon (2006) MOTTI 2.0 version pituustunnusten ennusteisiin taimikon iän funktiona. Vertailussa käytetty lämpösumma oli  $1\,230\text{ °Cvirk}$ , mikä vastasi kasvumallin laadinta-aineiston (Mikkelin ja Valkealan koealueiden) keskiarvoa (ks. Saksa ym. 2005) ja alkupituutena käytettiin 30 cm 2-vuotisille ja 20 cm 1-vuotisille paakkutaimille. Kasvumallin mukainen keskipituuden kehitys vastaa puustotunnusmallin mukaista valtapituuden ( $H_{dom}$ ) kehitystä nykyisillä mätästetyillä aloilla ja painotetun keskipituuden ( $h_{gM}$ ) kehitystä nykyisillä äestetyillä aloilla (kuva 2). Tämä pitää paikkansa Saksan ym. (2005) aineiston vaihtelualueella noin 12-vuotiseen taimikkoon, eli noin 2–3 metrin keskipituuteen asti. Jos keskipituuden kasvumallia sovelletaan tätä vanhemmille istutuskuusikoille, ennustettu pituuskasvu taantuu epärealistisen nopeasti (kuva 2).

Saksan ym. (2005) malli ei ole sellaisenaan sovellettavissa MOTTI-ohjelmistossa, koska MOTTI-simuloinnissa tarvitaan puuston pituuskehityksen ennustetta aina 8 metrin valtapituuteen asti. Niinpä MOTTI-ohjelmistossa nykyaikaisten kuusen viljelymenetelmien mukaiset alkukehitykset ratkaistaan sijoittamalla ensin puustotunnusmallin mukainen valtapituuden  $H_{dom}$  ennuste kuusen keskipituudeksi ( $H$ ) mätästetyillä uudistusaloilla ja vaihtoehtoisesti pohjapinta-alan mediaanipuun pituuden  $h_{gM}$  ennuste kuusen keskipituudeksi äestetyillä uudistusaloilla ja näiden avulla kalibroidaan puuttuvat puustotunnukset. Edellä kuvatun ratkaisun etuna on se, että puustotunnusmalleissa on kuvattu vaste lämpösummaan, jolloin ennustetta voidaan turvallisesti soveltaa eri puolilla Suomea. Lisäksi tiheyden vaikutus keskipituuden kehitykseen saadaan kuvattua kalibroimalla puustotunnusmalleja edellä esitetyn ratkaisun lisäksi myös tunnetulla runkoluvulla. Kuvattu nopeampi pituuskehitys edustaa vain muokattuja kuusen uudistusaloja. Muokkaamattomalla uudistusaloilla tätä ratkaisua ei käytetä vaan pitäydytään alkuperäisissä puustotunnusmallien ennusteissa.





**Kuva 2.** Kuusen keskipituus ( $H$ ), pohjapinta-alan mediaanipituus ( $h_{gM}$ ) ja valtipituus ( $H_{dom}$ ) iän funktiona istutuskusikoissa Siipilehdon (2006) puustotunnusmalleilla. Saksan ym. (2005) pituuskasvumallien mukaiset keskipituuden alkukehitykset istutetulle kuusen paakkutaimelle äestetyille ja mätästetyille uudistusosalalle (katkoviivat).

#### 4.1.4 Pohjapinta-alan ennuste

Pohjapinta-ala on tärkeä tunnus siksi, että harvennusmallit perustuvat pääsääntöisesti pohjapinta-alaan. Kun metsikön kehitystä simuloidaan MOTTI-ohjelmistolla, niin puuston pohjapinta-alan kehitys ja harvennusmallien mukaiset harvennusrajat esitetään graafisesti kuvaruudulla harvennusten päätöksenteon tueksi. Puustotunnusmalleja voidaan kalibroida kuviotietojen perusteella (esim. keskiläpimitta, -pituus ja runkoluku), mutta metsän uudistamisen yhteydessä malleja voidaan kalibroida vain runkoluvun avulla (esim. viljelytiheys ja syntyvän sekapuuston runkoluvut). Tunnetun runkoluvun vaikutus pohjapinta-alan tarkkuuteen oli varsin vaatimaton. Esimerkiksi kuusella puuston pohjapinta-alan 34 %:n keskivirhe laski vain 2 %-yksikköä runkoluvulla kalibroitaessa (Siipilehto 2006).

Jotta pohjapinta-ala olisi sopusoinnussa muiden tunnettujen tai ennustettujen puustotunnusten kanssa, Nissisen (2002) pohjapinta-alan malli otettiin käyttöön päivitetystä MOTTI-ohjelmistossa. Nissisen (2002) puulajeittaiset pohjapinta-alan mallit oletettiin tulomuotoisiksi, ja ne sovitettiin logaritmimuunnoksen avulla linearisoituina. Mallien keskivirheet olivat määnyllä 6 %, kuusella 10 % ja koivulla 7 %. Mallien selitysasteet olivat noin 99 %, jos keskiläpimitta ( $D$ ), runkoluku ( $N$ ) ja metsikön ikä ( $T$ ) tunnettiin. Nissisen (2002) yhtälöt eri puulajeille ovat:

$$\ln(G_{M\ddot{a}nty}) = -8,920 + 1,855 \ln(D) + 0,987 \ln(N) + 0,00070 T \quad (11)$$

$$\ln(G_{Kuusi}) = -8,842 + 1,851 \ln(D) + 0,981 \ln(N) + 0,00183 T \quad (12)$$

$$\ln(G_{Koivu}) = -9,086 + 1,887 \ln(D) + 0,999 \ln(N) \quad (13)$$

Teoreettinen ja samalla harhaton malli voidaan kuvata neliökeskiarvolla ( $D_q$ ), joka puolestaan voidaan määrittää mitatuista läpimitoista ( $d$ ) tai puuston pohjapinta-alan ( $G$ ) ja runkoluvun ( $N$ ) avulla. Neliökeskiarvo on:

$$D_q = \sqrt{(\Sigma d^2)/n} = \sqrt{G/kN} \quad (14)$$

Siten pohjapinta-ala saadaan yhtälöstä  $\ln(G) = \ln(k) + 2,0 \ln(D_q) + 1,0 \ln(N)$ , missä  $k = [p/(2 \cdot 100)^2]$  ja  $\ln(k) = -9,452$ . Nissisen (2002) malleissa sekä vakio että läpimitan ja runkoluvun kertoimet ovat aika lähellä teoreettisen mallin kertoimia. Puustotunnusmallien kovariansseista lasketut vastaavat kertoimet olivat selvästi pienempiä kuin edellä esitetyt, ts.  $1,79 \times \ln(D)$  ja  $0,93 \times \ln(N)$  ja  $N$  ja  $D$  tunnuksilla kalibroidun mallin keskivirhe oli selvästi suurempi eli 18 %.

## 4.2 Taimikon käsittelyt

### 4.2.1 Taimikon perkaus ja harvennus

MOTTI-ohjelmistossa taimikon varhaisperkaus toteutetaan oletusarvoisesti 1,5 metrin valtapiivusvaiheessa. Varhaisperkauksessa jäävä puusto toteutetaan Tapion suositusten mukaisesti. Perkauksessa jätetään viljelytaimet ja luontaisesti syntyneitä pääpuulajin kasvatuskelpoisia taimia, mutta lisäksi jätetään muita kasvatuskelpoisia puulajeja siten, että kokonaistiheys on noin 3000 tainta hehtaarilla. Sekapuuna suositaan yleensä ensisijaisesti rauduskoivua, mutta kuusen taimikoissa ensisijainen sekapuuta on mänty ja toissijainen on rauduskoivu. Taimikon harvennus on mahdollista suorittaa varhaisperkausajankohdan jälkeen. Taimikon harvennuksessa MOTTI-käyttäjä voi määrittellä jäävän puuston määrän puulajeittain, mutta se voidaan tehdä myös oletusarvoisesti Tapion suositusten mukaan (ks. Hyvän metsänhoidon... 2006).

Taimikonperkaus ja -harvennus toteutetaan MOTTI-ohjelmistossa pudottamalla perkausajankohdan puuston runkoluvut toimenpiteen määrittämälle tasolle. Tämän jälkeen muiden puustotunnusten kehitys kalibroidaan vastaamaan uutta tilannetta. Kalibrointi perustuu runkolukumuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin muiden puustotunnusten ennusteissa. Toimenpidehetkellä ennustetaan toimenpiteen vaikutus ja tulevaa kehitystä ennustettaessa saadulla vaikutuksella korjataan puustotunnusten ennusteita. Taimikon käsittelyn vaikutus puuston dimension  $x$  kehitykseen saadaan seuraavasti:

$$\Delta x(T_2) = E(x|N_2, N_{tot_2}) - E(x|N_1, N_{tot_1}) \quad (15)$$

missä

$\Delta x(T_2)$  = taimikonhoidon vaikutus dimension  $x$  ehdolliseen odotusarvoon käsittelyhetkellä  $T_2$

$N_{tot_1}$  = käsitteilyä edeltänyt kokonaisrunkoluku

$N_{tot_2}$  = käsittelyn jälkeinen kokonaisrunkoluku

$N_1$  ja  $N_2$  = vastaavat laskentaosittien  $i$  runkoluvut ennen ja jälkeen käsittelyn

$E(x_i|N_k)$  = runkoluvuilla  $N_k$  kalibroitu ehdollinen odotusarvo

$\Delta N = N_2/N_1$  = osittien  $i$  runkoluvun suhteellinen muutos toimenpiteen yhteydessä

Tulevan kehityksen ennustuksessa ajankohdan  $T$  ennuste  $x(T)$  saadaan runkolukujen suhteen ehdollisen odotusarvon ja toimenpiteen vaikutuksen funktiona:

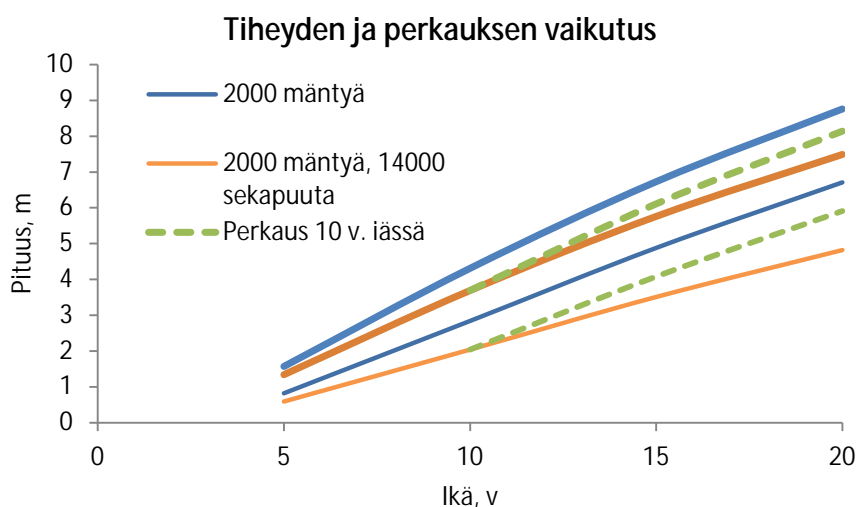
$$x(T) = E(x|N_2, N_{tot_2}) - \Delta x(T_2) \times \Delta N \quad (16)$$

Jos puusto-osittien runkoluku  $N$  ei muutu, niin  $\Delta N = 1$  ja erotus  $\Delta x(T_2)$  vähennetään kokonaisuudessaan ehdollisesta odotusarvosta. Kun osittien runkoluku muuttuu, niin ehdolliseen odotusarvoon tehtävää vähennystä korjataan runkoluvun suhteellisella muutoksella. Näillä laskentaperiaatteilla voidaan kuvata sekä varhaisperkaus, jossa viljeltyyn pääpuulajiin ei kohdistu käsitteilyä että taimikon harvennuksen erilaiset voimakkuudet, joissa myös viljellyn puusto-osittien runkolukua voidaan muuttaa.

MOTTI 2.0 versiossa havaittu ongelmakohta oli varhaisperkauksen ajoituksen vaikutuksen kuvaaminen läpimittatunnuksiin. Koska puusto-ositteen keskipituus on usein alle rinnankorkeuden, niin rinnankorkeusläpimitoilla ei ole reaaliarvoa, eikä korjaustekijää varhaisperkauksen vaikutuksesta siten saa laskettua läpimitoista. Poikkeuksena oli varhaisperkaus 1,5–2 metrin valtapituusvaiheessa, jolloin valta- ja toisinaan myös mediaaniläpimita saivat reaaliarvon, ja korjaustekijät näille tunnuksille voitiin laskea. MOTTI 3.0 versiossa läpimittatunnukselle lasetaan korjaustekijä vastaavasta pituustunnuksen korjaustekijästä kaksinkertaisena silloin, kun rinnankorkeutta ei ole saavutettu.

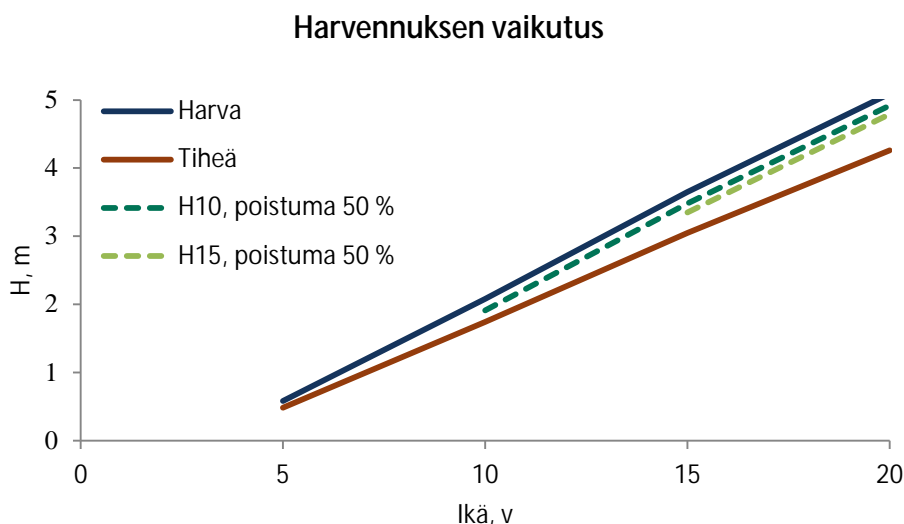
Kuvassa 3 esitetään keski- ja valtapituuden iänmukainen kehitys istutusmännyn ositteelle MT kasvupaikalla eteläisessä Suomessa (1 200 °Cv<sub>rk</sub>). Istustiheydeksi oletetaan 2000 ha<sup>-1</sup>. Toinen metsikkö edustaa männikköä, joka on kehittynyt ilman sekapuuston kilpailua ja toisessa metsikössä istutusmännyn osuus on 12,5 % kokonaisrunkoluvusta 16000 ha<sup>-1</sup>. Näillä tunnuksilla tiheämmässä metsikössä männyn valtapituus oli 1,3 m pienempi ja keskipituus 1,9 m pienempi, kuin puhtaan männikön vastaavat tunnuksat 20 vuoden ikävaiheessa. Kuvan 3 esimerkissä taimikon perkauksessa poistetaan sekapuusto 10 vuoden iällä. Puustotunnuksen perkauksen jälkeinen kehitys kuvataan tapahtuvaksi sillä nopeudella, mitä mallit ennustavat perkauksen jälkeiselle tiheydelle. Siten esimerkissä keski- ja valtapituuden kehitys perkauksen jälkeen on sama kuin puhtaan männikön vastaava kehitys (kuva 3, katkoviiivat). Männyn puustotunnuksat eivät toimenpiteen yhteydessä muutu, koska istutusmännyn ositteeseen ei varhaisperkauksessa kosketa. Käytännössä varhaiskehitysennusteiden erotus ennen ja jälkeen toimenpiteen vähennetään kokonaisuudessaan uudesta ennusteesta. Tällä periaatteella peratun taimikon pituustunnuksat jäävät jälkeen puhtaan taimikon pituustunnuksista perkaushetken pituuserojen verran. Esimerkissä pituustunnuksen erot olivat 80 cm keski- ja 62 cm valtapituudessa 10-vuotiaan männyn taimikon varhaisperkauksen ajankohtana.

Taimikon harvennuksessa käyttäjä voi määrittellä kunkin puusto-ositteen runkoluvusta poistettavan osuuden. Oletetaan, että meillä on kaksi puhdasta kylvömännikköä kuivahkolla kankaalla. Taimikoiden alkutiheydet ovat 2 000 ja 4 000 ha<sup>-1</sup> ja taimikon harvennuksessa tiheämmän metsikön runkoluvusta poistetaan puolet. Koska taimikoissa harvennus oletetaan alaharvennustyyppiseksi, dimensiot nousevat harvennuksen yhteydessä korkeammalle tasolle (ks. kuva 4). Dimensioiden tason nousu on suoraan verrannollinen harvennuspoistuman osuuteen kyseisestä ositteesta. Kun esimerkiksi puolet männyn runkoluvusta poistetaan, on keskipituuden ero harvennuksen jälkeen puolet eri tiheyksillä kalibroituja ennusteiden eroista harvennushetkellä.



**Kuva 3.** Taimikon sekapuuston tiheyden (14 000 ha<sup>-1</sup>) ja perkauksen vaikutus istutetun männyn (2 000 ha<sup>-1</sup>) keski- (—) ja valtapituuden (—) kehitykseen.

Mitä aikaisemmin tiheä taimikko harvennetaan, sitä pienemmäksi jää ero harvempana kasva-  
neen metsikön keskipituuteen. Esimerkissä harvemman ja tiheämmän metsikön välillä keskipi-  
tuuden ero oli 34 cm 10 vuoden iällä ja 60 cm 15 vuoden iällä. Koska männyn runkoluvusta  
harvennettiin 50 %, niin keskipituuden eroksi jäi 17 cm ja 30 cm, kun harvennus tehtiin joko 10  
tai 15 vuoden kuluttua viljelystä (kuva 4).



**Kuva 4.** Periaatekuva taimikon tiheyden ja harvennuksen ajoituksen vaikutuksesta keskipituuden ( $H$ ) kehitykseen, kun runkoluvusta poistetaan puolet. Harvennus tehdään joko 10 vuotta (H10) tai 15 vuotta (H15) taimikon perustamisesta.

#### 4.2.2 Kilpailun kuvaus varhaisperkauksen jälkeen

Varhaisperkauksessa syntyy toinen taimijakso uudistamisen yhteydessä syntyneen ja perkauksessa osittain poistetun ensimmäisen taimijakson tilalle (ks. 3.3 Varhaisperkauksen jälkeen syntyvä taimitiheys). Syntyvän toisen taimijakson tiheyteen vaikuttaa perkausajankohta taimettumiskunnon (yhtälön 4) mukaisesti. Myös toiseen taimijaksoon sovelletaan samoja kalibroituja puustotunnusmalleja kuin ensimmäiseen taimijaksoon. Osa varhaisperkauksen jälkeen syntyneistä toisesta taimijaksosta kehittyy ensimmäisen taimijakson kilpailijaksi. Koska MOTTI ei sisällä vesasyntyisten puiden kasvumalleja, ei tätä kilpailua saada kuvattua puusto-ositteiden pituussuhteilla. Kuitenkin aikaisemmista tutkimuksista tiedetään, että ensimmäisen taimijakson havupuut tarvitsevat noin 1,5–2 metrin etumatkan, jotta vesapuusto ei pääse kasvamaan sen yli (Björkdahl 1983, Tham 1983, Maltamo ym. 1989, Harstela 2003).

Toisen taimijakson vaikutus ensimmäiseen taimijaksoon on sitä pienempi, mitä myöhemmin taimikon varhaisperkaus tehdään. Toisen taimijakson kilpailun vaikutusta ensimmäisen taimijakson kehitykseen kuvataan MOTTI-malleissa toisen taimijakson runkoluvun vaikutuksella *kilpailevaan kokonaisrunkolukuun*. Ennen varhaisperkausta ja heti varhaisperkauksen jälkeen prosenttiosuus kertoo, kuinka suuri on tarkasteltavan puusto-ositteen osuus ensimmäisen taimijakson kokonaisrunkoluvusta ( $Ntot_1$ ). Varhaisperkauksen jälkeen syntyvän toisen taimijakson runkoluku ( $Ntot_2$ ) otetaan huomioon kilpailevassa runkoluvussa asteittain ( $Pros_1$ ) varhaisperkauksesta kuluneen ajan ( $Tvp$ ) funktiona yhtälön (17) mukaisesti.

$$\text{Pros}_{1,i} = N_{1,i} / [N_{tot1} + (N_{tot2} - N_{tot2} \times (HdVp_{Max}/HdVp)^{(-0,05 Tvp)})], \quad (17)$$

missä

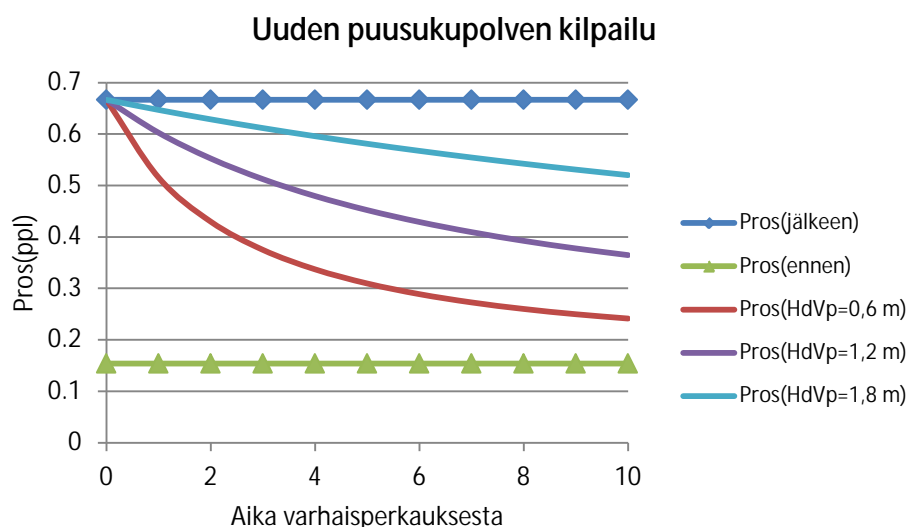
- $N_{1,i}$  = ensimmäisen taimijakson puusto-ositteen  $i$  runkoluku,  
 $N_{tot1}$  = kokonaisrunkoluku ensimmäisessä taimijaksossa,  
 $N_{tot2}$  = perkauksen jälkeen syntyvän toisen taimijakson kokonaisrunkoluku,  
 $HdVp$  = valtapituus varhaisperkaushetkellä,  
 $HdVp_{Max}$  = suurin mahdollinen varhaisperkauksen valtapituus (2 m),  
 $Tvp$  = varhaisperkauksesta kulunut aika (vuotta).

Kilpailu on sitä kovempi, mitä pienempi ensimmäisen taimijakson puusto-ositteen ( $i$ ) prosenttiosuus ( $\text{Pros}_{1,i}$ ) on. Kilpailuvaikutuksen laskentayhtälön (17) muotoilusta seuraa, että tehtäessä varhaisperkaus aivan viime hetkellä ( $HdVp = HdVp_{Max}$ ), varhaisperkauksen jälkeen syntyvästä toisesta taimijaksosta ei kohdistu lainkaan kilpailua ensimmäiseen taimijaksoon puustotunnusten seurannan aikana, eli sinä aikana, kun  $H_{dom} < 8$  m.  $HdVp_{Max}$  on asetettu 2 metriin, joka on riittävä huomioiden sekä männyn että kuusen taimikot (Björkdahl 1983, Harstela 2003, Fahlvik 2005, Saksa & Miina 2007, Uotila ym. 2010).

Yhtälön (17) käyttäytymistä on tarkasteltu kuvassa 5. Esimerkissä taimikon kokonaistiheydeksi oletetaan  $13\,000\text{ ha}^{-1}$  ja pääpuulajin tiheydeksi  $2\,000\text{ ha}^{-1}$ . Perkauksessa poistetaan  $10\,000$  runkoa  $\text{ha}^{-1}$ , jolloin perkauksen jälkeen ensimmäisen taimijakson kokonaistiheys on  $3\,000\text{ ha}^{-1}$ . Pääpuulajin osuus runkoluvusta on siten 15 % ennen perkausta ja 67 % perkauksen jälkeen (ks. kuva 5). Kuten edellä kuvattiin, syntyvän toisen taimijakson runkoluku pienenee varhaisperkausta viivästettäessä. Kuvassa 5 runkolukujen korjauskertoimet ovat taulukon 3 mukaiset seuraavilla oletuksilla: tehtäessä varhaisperkaus valtapituudella  $HdVp = 0,6$  m, maanmuokkauksesta kulunut aika on 3 vuotta;  $HdVp = 1,2$  m aikaa on kulunut 5 vuotta ja  $HdVp = 1,8$  m aikaa on kulunut 7 vuotta.

Esimerkissä perkausajankohta oli 3, 5 tai 7 vuotta taimikon uudistamisesta. Eri perkausajankohtia vastaavat pääpuulajin osuudet olivat 31 %, 45 % tai 58 % viisi vuotta perkauksen jälkeen (kuva 5). Sama asia voidaan ilmaista myös toisin. Kun perkausajankohta oli 3, 5 tai 7 vuotta uudistamisesta, niin syntyvän toisen taimijakson kokonaistiheydet olivat  $7\,320$ ,  $5\,590$  tai  $5\,070\text{ ha}^{-1}$ . Näistä runkoluvuista ensimmäisen taimijakson kilpailijaksi nousi viiden vuoden kuluessa mallin mukaan  $3\,500$ ,  $1\,970$  tai  $530$  runkoa  $\text{ha}^{-1}$ .

Teknisesti MOTTI-ohjelmisto siirtyy varhaisperkauksesta taimikon harvennuksiin, kun valtapituus ylittää 2 m. MOTTI-ohjelmistossa ei taimikon harvennuksen yhteydessä synny toista taimijaksoa. Tämän vuoksi varhaisesta taimikon harvennuksesta tulee varhaisperkausta edullisempi vaihtoehto. Tämä näkyy vaihtoehtoisten taimikonhoitomenetelmien tuotos- ja etenkin taloudellisuusvertailuissa (ks. Liitteet 2–4). Kilpailufunktion (13) ja taimettumiskunnon (taulukko 3) avulla myöhäinen varhaisperkaus ja varhainen taimikon harvennus olivat toimenpiteinä vertailukelpoisia ensimmäisen taimijakson kehityksen kannalta. Sen sijaan varhaisperkauksen jälkeen syntyvä sekapuusto vaikuttaa joko tuleviin taimikonhoitokustannuksiin tai hoitamattoman taimikon myöhempiin harvennuskertymiin.



**Kuva 5.** Pääpuulajin osuus (Pros(pp)) kilpailevasta kokonaisrunkoluvusta varhaisperkauksen jälkeen perkausajankohdan valtapituuden ( $HdVp$ ) ollessa 0,6, 1,2 tai 1,8 metriä. Pääpuulajin runkoluku on  $2\,000\text{ ha}^{-1}$ . Maanmuokkauksen jälkeen syntyneen sekapuuston runkoluvuksi oletettiin  $11\,000\text{ ha}^{-1}$ , jolloin pääpuulajin osuus ennen perkausta,  $Pros(ennen) = 0,15$ . Sekapuuston runkoluvuksi oletettiin  $1\,000\text{ ha}^{-1}$  perkauksen jälkeen, jolloin pääpuulajin osuus,  $Pros(jälkeen) = 0,67$ .

#### 4.2.3 Taimikonhoidon kustannukset

MOTTI 3.0 -ohjelmistossa taimikonhoidon kustannukset käsitellään kiinteinä hehtaarikohtaisina kustannuksina, joille on annettu oletusarvot. MOTTI-käyttäjä voi itse varioida kustannuksia, jos hän tekee esimerkiksi vertailuja taimikonhoidon toimenpiteiden ajoituksista. MOTTI-ohjelmisto sisältää raivaussahatyönä tehdyn taimikonhoidon kustannusmallit (Kaila ym. 1999), mutta ne ovat käytössä vain TutkijaMOTTI versiossa. Taimikonhoidon ajanmenekkiin vaikuttaa poistettava runkoluku ja poistettavan puuston keskiläpimitta kannonkorkeudelta (Kaila ym. 1999).

Taimikon perkauksen ja harvennuksen ajankohta vaikuttaa poistettavan puuston kantoläpimitaan. Keskipituudet ennustetaan alussa esitellyillä puustotunnusmalleilla. Puusto-ositteiden keskipituuksista lasketaan poistettavan puuston keskipituus pois lukien kasvatettavan pääpuulajin osite. Keskipituuden avulla saadaan keskiläpimitta kannonkorkeudelta ( $D_k$ ) yhtälöllä (5) siten, että keskipituutena käytetään poistettavan puuston aritmeettista keskipituutta. Taimikonhoidon kustannusten laskentaan käytettiin TutkijaMOTTI-ohjelmistoa vertailtaessa vaihtoehtoisia taimikonhoitoketjuja. Taimikonhoidon kustannusten perusteet, poistettava runkoluku ja keskimääräinen kantoläpimitta on annettu liitteissä 2–4.

## 5 Taimikon puustotunnuksista kuvauspuihin

MOTTI-ohjelmistossa varttunut puusto kuvataan kuvauspuiden avulla. Ne ennustetaan jakaumamalleilla kunkin ositteen puustotunnuksista. Kuvauspuut luodaan samanaikaisesti kaikille ositteille sinä vuonna, kun pääpuulajin valtapituus ( $H_{dom}$ ) ylittää 8 m rajan. Kun luontihetkellä tarkasteltavan puusto-ositteen valtapituus ylittää 6 m, niin jakaumaksi valitaan Johnsonin SB-jakaumaan perustuva läpimittajakauma (Siipilehto ym. 2007). SB-jakaumaa selittävät tunnuksot olivat  $N$ ,  $G$  ja  $d_{gM}$ . Läpimittajakauman kanssa MOTTI-ohjelmisto käyttää puulajeittaista Näs-

lundin pituuskäyrää (Siipilehto 1999) puiden pituuden ennustamiseksi. (VMI-MOTTI-ohjelmistossa käytetään Eerikäisen (2009) VMI10 aineistosta laatimia koeloittain koepuiden avulla kalibroituja pituusmalleja). Jos taas tarkasteltavan puusto-ositteen valtapituus on alle 6 m puiden luontihetkellä, valitaan Weibull-jakaumaan perustuva pituusjakauma (Siipilehto 2009), jota selittää  $H$ ,  $H_{dom}$  ja  $N$ . Pituusjakamaa käytettäessä puun läpimitta saadaan puun pituuden sekä taimikon puustotunnusten  $D$ ,  $H$  ja  $H_{dom}$  funktiona (Siipilehto 2009). Näiden mallien ominaisuuksia on käsitelty laajemmin Siipilehdon (2011b) väitöskirjassa.

Vaihtoehtoisilla jakaumamalleilla on omat vahvuudet ja heikkoudet. SB-jakaumamallin vahvuutena on sen vaste puuston tiheyden vaihteluun. Tämä ilmenee runkoluvun ennusteen tarkkuutena (RMSE 5 %) samalla, kun pohjapinta-ala on virheetön. Mallin heikkoutena on puolestaan valtapuutunnusten vaihtelun epätarkka kuvautuminen (ks. Siipilehto 2011b, s. 35 ja 37). Pituusjakauma on varsin tarkka nuorissa taimikoissa. Sen sijaan yli 6 metrin valtapituusvaiheessa puiden pituuksien avulla ennustetut läpimitat tuottavat epätarkan puuston pohjapinta-alan sekä valtaläpimitan verrattuna läpimittajakaumamalleihin (Siipilehto 2011b, s. 38–39). Siksi pituusjakamaa sovelletaan MOTTI-ohjelmistossa vain alle 6 m:n puusto-ositteille ja läpimittajakauma on valtamenetelmä kuvauspuita luotaessa.

Seuraavassa tarkastellaan, kuinka jakaumamalleilla muodostetuista kuvauspuista lasketut puustotunnukset vastasivat alkuperäisiä puustotunnusennusteita. Tarkastelu tehtiin metsän uudistamisesimerkkien avulla, joissa taimikonhoitokäsittelyn ajankohta vaihtelee (liitteet 2–4). Käytettyjä merkintöjä ovat esim. VP 3 = varhaisperkaus 3 vuotta viljelystä; P/H 7 = myöhäinen perkaus/harvennus 7 vuotta viljelystä; H 15 = harvennus 15 vuotta viljelystä. Näistä esimerkeistä on koottu puiden luontihetken puustotunnusennusteet (PT) ja vastaavan tunnuksen suhteellinen ero luoduista kuvauspuista laskettuna (Puut, %). Eniten suuria eroja oli valtaläpimitassa. Kuusen istutuslallalla valtaläpimitta jäi kuvauspuista laskettuna jopa yli 30 % pienemmäksi kuin vastaava puustotunnusennuste. Keskiläpimitta oli puista laskettuna 9–21 % puustotunnusta suurempi, kun taimikonhoito tehtiin myöhään eli 15 vuotta viljelystä. Männyn kylvötaimikon ja kuusen istutustaimikon viimehetken varhaisperkauksessa ( $H_{dom} \approx 2$  m) keskipituus oli kuvauspuista laskettuna 7–9 % suurempi kuin puustotunnusennuste. Kuvauspuista lasketut valtapituudet olivat männyllä kautta linjan suurempia kuin valtapituusennusteet. Kuvauspuista laskettu valtapituus oli suurempi myös silloin, kun valtaläpimitta oli tarkka. Tämä merkitsi sitä, että kuvauspuiden luontihetkellä ennustettu pituuskäyrä oli liian jyrkkä. SB-jakaumamalli on laadittu pohjapinta-alan läpimittajakaumaksi, mutta MOTTI-ohjelmistossa metsän uudistamisen yhteydessä SB-jakauma skaalattiin korjauskertoimella toteuttamaan tunnettu/ennustettu runkoluku, jolloin pientä epäyhdenmukaisuutta syntyi pohjapinta-alaan ja pohjapinta-alan mediaaniläpimittaan. Taulukossa 4 keskimääräinen ero  $G$  ja  $d_{gM}$  tunnuksille oli 4,2 % ja 1,4 %.

**Taulukko 4.** Ennustetut puustotunnukset (PT) kuvauspuiden luontihetkellä ja kuvauspuista laskettujen vastaavien tunnusten ero (%) eli  $100 \times (PT - \text{Puut})/PT$ . Kasvatusketjuissa varioidaan varhaisperkauksen (Vp), perkaus/harvennuksen (P/H) ja harvennuksen (H) ajankohtaa (vuotta viljelystä). Tunnukset, joissa puustotunnusmallin ja kuvauspuista lasketun tunnuksen ero oli yli 10 % on **vahvennettu** ja **punaisella** erot 5–10 %.

Kasvatusketju		G	D	H	$d_{gM}$	$h_{gM}$	$D_{dom}$	$H_{dom}$
<b>MT, männyn istutus</b>								
Vp 3	PT	7,4	5,8	5,4	7,8	6,4	12,3	7,7
	Puut, %	<b>5,4</b>	<b>-8,6</b>	0,0	-2,6	0,0	2,4	<b>-7,8</b>
Vp 4	PT	8,0	6,3	5,6	8,4	6,6	12,3	7,8
	Puut, %	<b>5,0</b>	-1,6	3,6	-1,2	1,5	-4,9	<b>-9,0</b>
Vp 5	PT	8,5	6,6	5,8	8,2	6,8	12,5	7,9
	Puut, %	4,7	-3,0	0,0	-2,4	1,5	0,0	<b>-8,9</b>
P/H 6	PT	7,7	5,8	5,8	8,3	6,8	12,5	7,9
	Puut, %	3,9	<b>-8,6</b>	<b>5,2</b>	-1,2	1,5	-2,4	<b>-10,1</b>
H 15	PT	5,6	4,6	4,9	6,4	5,9	11,4	7,3
	Puut, %	3,6	<b>-21,7</b>	<b>-8,2</b>	-3,1	0,0	<b>15,8</b>	-4,1
<b>MT, kuusen istutus</b>								
Vp 3	PT	4,8	5,1	5,4	5,9	6,1	12,1	7,9
	Puut, %	4,2	<b>-9,8</b>	<b>-5,6</b>	-1,7	0,0	<b>33,9</b>	0,0
Vp 4	PT	5,2	5,3	5,5	6,2	6,2	12,4	7,9
	Puut, %	3,8	<b>-9,4</b>	<b>-5,5</b>	0,0	0,0	<b>32,3</b>	-2,5
Vp 5	PT	5,5	5,5	5,6	6,4	6,3	11,7	8,0
	Puut, %	3,6	<b>-9,1</b>	<b>-5,4</b>	0,0	0,0	<b>25,6</b>	-2,5
Vp 6	PT	5,7	5,6	5,6	6,3	6,3	11,8	8,0
	Puut, %	<b>5,3</b>	<b>-8,9</b>	<b>-8,9</b>	-1,6	0,0	<b>31,4</b>	1,3
P/H 7	PT	5,6	5,5	5,8	6,7	6,5	12,1	8,1
	Puut, %	3,6	<b>-7,3</b>	1,7	-1,5	0,0	<b>19,0</b>	<b>-11,1</b>
H 15	PT	3,7	4,5	5,2	5,2	5,7	10,9	7,8
	Puut, %	2,7	<b>-8,9</b>	<b>-5,8</b>	0,0	0,0	<b>37,6</b>	<b>5,1</b>
<b>VT, männyn kylvä</b>								
Vp 4	PT	8,0	6,1	5,4	8,4	6,6	12,3	7,7
	Puut, %	3,8	<b>-6,6</b>	0,0	-1,2	1,5	-4,9	<b>-10,4</b>
Vp 5	PT	7,5	6,2	5,4	8,5	6,6	11,3	7,7
	Puut, %	2,7	0,0	3,7	-1,2	1,5	<b>-15,9</b>	<b>-11,7</b>
Vp 6	PT	8,2	6,2	5,5	7,9	6,7	12,3	7,7
	Puut, %	4,9	<b>-8,1</b>	<b>-7,3</b>	-2,5	1,5	3,3	<b>-10,4</b>
P/H 7	PT	8,5	6,3	5,6	8,8	6,8	12,5	7,8
	Puut, %	4,7	-4,8	1,8	-1,1	1,5	<b>-8,0</b>	<b>-11,5</b>
H 15	PT	7,5	5,8	5,3	8,0	6,5	12,1	7,6
	Puut, %	4,0	<b>-8,6</b>	0,0	-2,5	1,5	-2,5	<b>-10,5</b>



Silloin kun rinnankorkeutta ei ole saavutettu varhaisperkausvaiheessa, niin MOTTI 3.0 versiossa läpimittatunnukseksi laskettiin perkauksen korjaustekijä vastaavasta pituustunnuksen korjaustekijästä kaksinkertaisena. Tästä ”kynnyksestä” koitui silti vääristymiä läpimittojen keskinäisiin suhteisiin siinä vaiheessa, kun taimikon harvennuksen vaikutus kuvattiin läpimittoihin. Esimerkiksi, kun VT männyn kylvöalalla siirryttiin varhaisperkauksen ajoituksessa vuodesta viisi vuoteen kuusi, tippui  $d_{gM}$  8,5 cm:stä 7,9 cm:iin (ks. taulukon 4 rajatut arvot). Edellisessä luvussa korjaustekijä on johdettu pituustunnuksesta ja jälkimmäisessä se on saatu laskettua läpimitan ennusteista. Valtaläpimitassa vastaava kynnyks tuli esiin vuotta aikaisemmin. Tästä kynnyksestä johtuen varhaisperkauksen ajoituksen tarkastelusta ei saada aivan johdonmukaisia tuloksia.

## 6 Taimikkomallien vertailua

### 6.1 Puustotunnusten kehityksen vertailu

Suomessa laadittuja puustotunnusmalleja verrattiin MOTTI-malleihin oletetuissa 25-vuotiaissa eri tavoin syntyneissä puolukkatyyppin metsiköissä Etelä-Suomessa (lämpösusma 1200 °Cvrk). Puustotunnusmallien vertailu MOTTI-malleihin osoitti pääsääntöisesti melko yhdenmukaisia tuloksia runkoluvun vaihtelun vaikutuksesta taimikon muihin puustotunnuksiin. Varmolan (1993) ja Nissisen (2002) regressiomallit pohjapinta-alan ( $G$ ) ja mediaaniläpimitan ( $d_{gM}$ ) kehitykselle käyttäytyivät pienistä tasoeroista huolimatta metsikön tiheysvaihtelun suhteen hyvin samansuuntaisesti kuin runkoluvulla kalibroidut MOTTI-mallit ja Siipilehdon (2011a) runkoluvulla kalibroidut puustotunnusmallit (kuvat 6 ja 7). Huuskosen ja Miinan (2007) malleissa tiheyden vaikutus pohjapinta-alaan oli muita malleja voimakkaampi ja ne tuottivat syntyvästä riippumatta muita suuremman pohjapinta-alan. Koska Huuskosen ja Miinan (2007) mallit kuvaavat kehityskelpoisten mäntyjen tunnuksia, näillä malleilla tarkasteltiin tiheyden vaikutusta vain runkolukuun 4000 ha<sup>-1</sup> saakka. Heidän malliaan lukuun ottamatta, kaikki muut mallit tuottivat lähes saman pohjapinta-alan luontaisesti syntyneissä männiköissä aina 5000 ha<sup>-1</sup> tiheyteen asti (kuva 6). Sitä suuremmalla tiheydellä Varmolan (1993) mallilla saatiin muita malleja suurempi pohjapinta-ala. Kylvömänniköissä MOTTI-mallin pohjapinta-ala oli noin 4 m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup> ja istutusmänniköissä noin 2 m<sup>2</sup>ha<sup>-1</sup> suurempi kuin Nissisen (2002) ja Siipilehdon (2011a) malleilla, jotka olivat keskenään hyvin samanlaiset. Varmolan (1993) pohjapinta-alan ennusteet istutusmänniköissä ja alle 4000 ha<sup>-1</sup> runkoluvun kylvömänniköissä olivat muita malleja pienemmät.

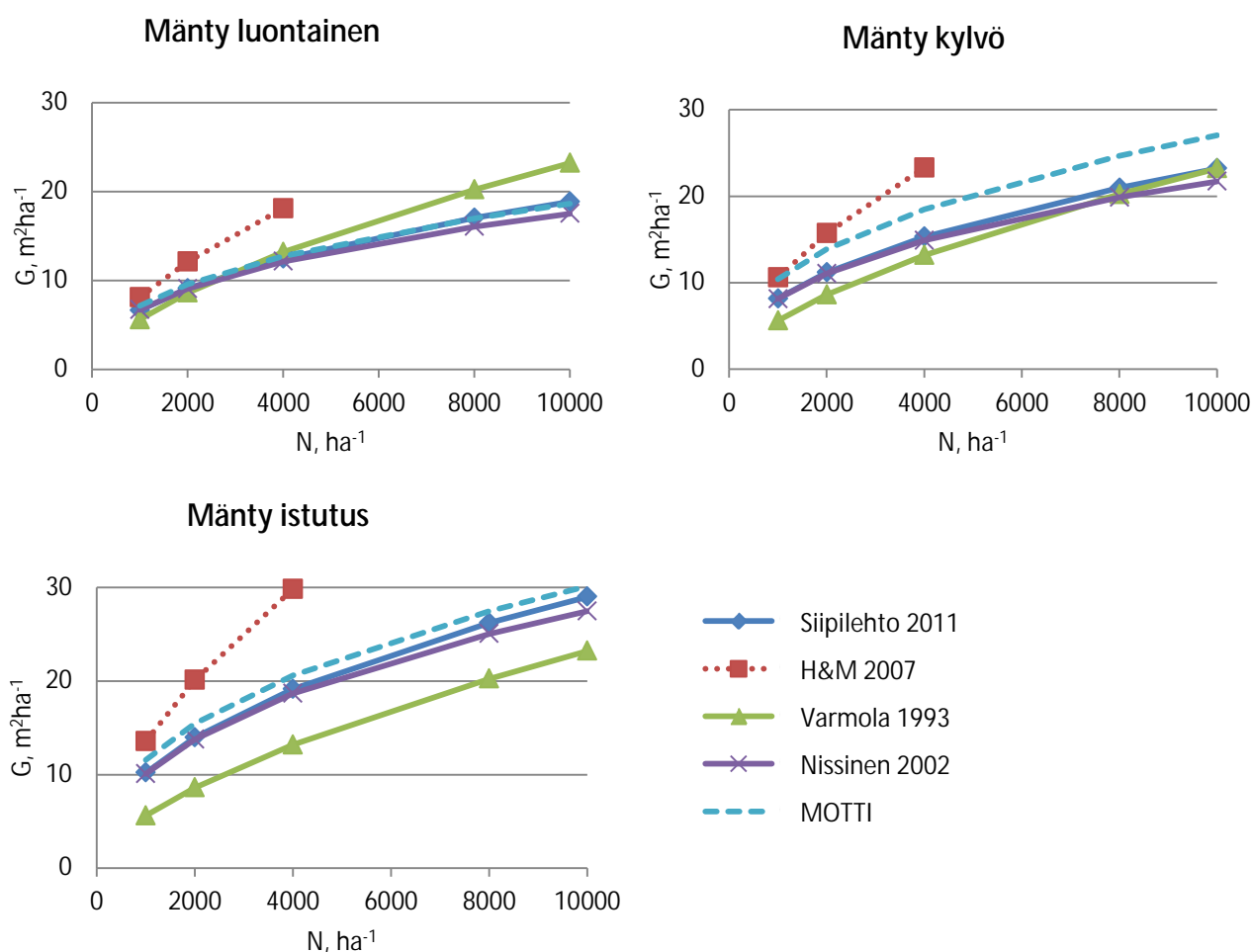
MOTTI-mallin ja Siipilehdon (2011a)  $d_{gM}$  ennusteet runkoluvulla kalibroituina osuivat Varmolan (1993) ja Nissisen (2002) ennusteiden väliin (kuva 7). MOTTI-mallin keskiläpimita ( $D$ ) pieneni tiheyden lisääntyessä samaan tapaan kuin Siipilehdon (2011a) mallilla. Huuskosen ja Miinan (2007) mallilla kehityskelpoisten mäntyjen keskiläpimita pieneni vain hiukan tiheyden kasvaessa.

Tyypillisesti metsikön tiheys ei vaikuta valtapituuden ( $H_{dom}$ ) ennusteeseen (Varmola 1993, Huuskonen & Miina 2007). Sekä kalibroituilla MOTTI-malleilla että Siipilehdon (2011a) malleilla tiheyden kasvaessa valtapituus hieman pieneni (kuva 8). Näillä malleilla valtapituus oli käytännössä sama luontaisissa ja istutusmänniköissä, mutta kylvössä MOTTI-malli antoi pienillä tiheyksillä hieman suuremman valtapituuden kuin Siipilehdon (2011a) malli. Pienellä tiheydellä MOTTI-malli ja Varmolan (1993) malli tuottivat saman valtapituuden niin kylvön (kuva 8) kuin muidenkin syntytapojen yhteydessä. Huuskosen ja Miinan (2007) malli tuotti hieman näitä suuremman valtapituuden varsinkin viljelymänniköille.

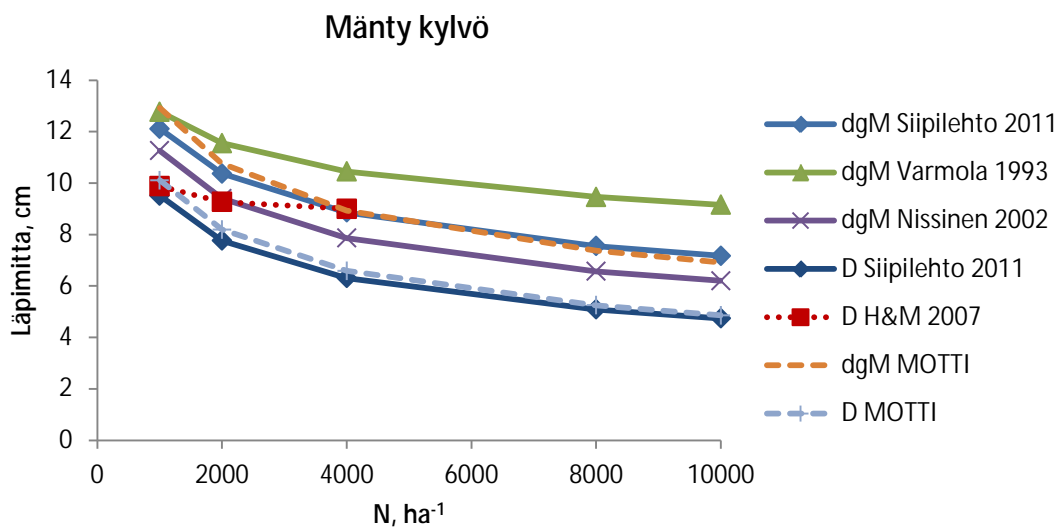
MOTTI-simulaattorin puustotunnusmallit eivät rajoitu pelkästään taimikkovaiheeseen vaan puustotunnuksia voidaan ennustaa koko kiertoajalle (ks. Siipilehto 2006), vaikka pääasiallinen MOTTI-mallien soveltaminen tapahtuu valtapituudeltaan alle 8 m:n taimikoissa. Seuraavaksi

tarkastellaan keskiläpimitan ennustetta, kun taimikosta on siirrytty nuoren kasvatusmetsän ensiharvennusvaiheeseen (valtapituus 10–17 m), jotta MOTTI-mallia voidaan verrata Siipilehdon (2011a) ja Huuskosen ja Hynysen (2006) vastaavaan ennusteeseen. Ennustetta tarvitaan MOTTI-simuloinnissa, jos MOTTI-käyttäjä haluaa tarkastella metsikön kehitystä vasta ensiharvennusvaiheesta lähtien. Oletettu VT-männikkö sijaitsi Etelä-Suomessa (lämpösumma 1 200 °Cvrk). Tarkastelussa käytettiin metsikön tiheyden odotusarvoja, jotka vaihtelivat 30-vuotiaan metsikön 1 434 rungosta ha<sup>-1</sup> 60-vuotiaan metsikön 1 390 runkoon ha<sup>-1</sup> MOTTI-mallilla ja vastaavasti 1937 rungosta ha<sup>-1</sup> 60-vuotiaan metsikön 1 390 runkoon ha<sup>-1</sup> Siipilehdon (2011a) malleilla. Huuskosen ja Hynysen (2006) mallissa tarvittiin runkoluvun lisäksi valtapituuksia, joka saatiin vertailtavan malliperheen odotusarvosta, siis MOTTI-mallin tai Siipilehdon (2011a) mallin valtapituuksien ennusteesta.

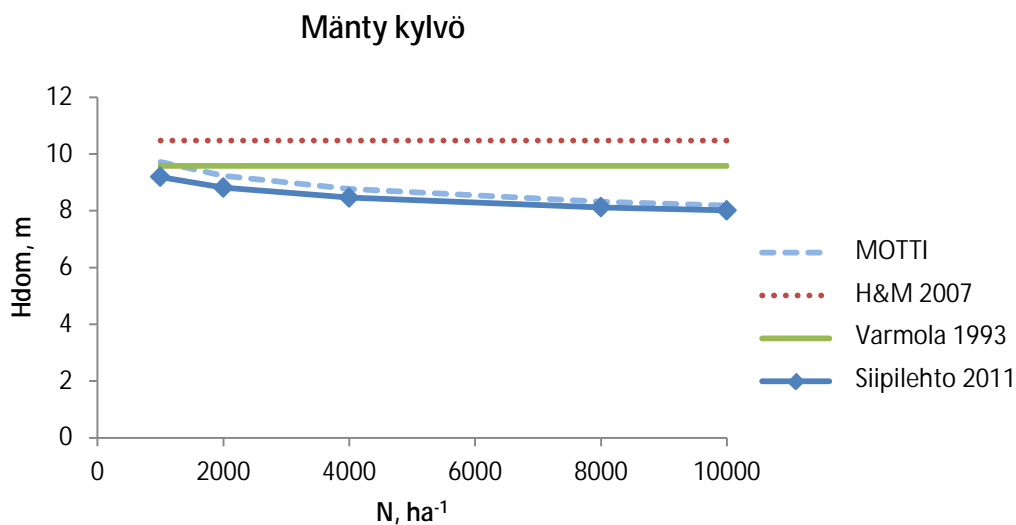
Kun selittävät muuttujat poimittiin MOTTI-mallin ennusteista, ensiharvennusvaiheen keskiläpimitat olivat 30 vuoden ikävaiheessa lähellä toisiaan (ero 0,5 cm), mutta iän karttuessa ja valtapituuksien kasvaessa Huuskosen ja Hynysen (2006) mallin ennuste jäi jälkeen MOTTI-mallin keskiläpimitan ennusteesta. 50 vuoden iällä ero oli 1,7 cm luontaisessa männikössä (kuva 9). Sen sijaan Huuskosen ja Hynysen (2006) mallin ennusteet luontaisesti tai kylväen perustettujen ensiharvennusvaiheen keskiläpimitaksi olivat erittäin lähellä Siipilehdon (2011a) keskiläpimitan ennusteita (erot < 0,5 cm).



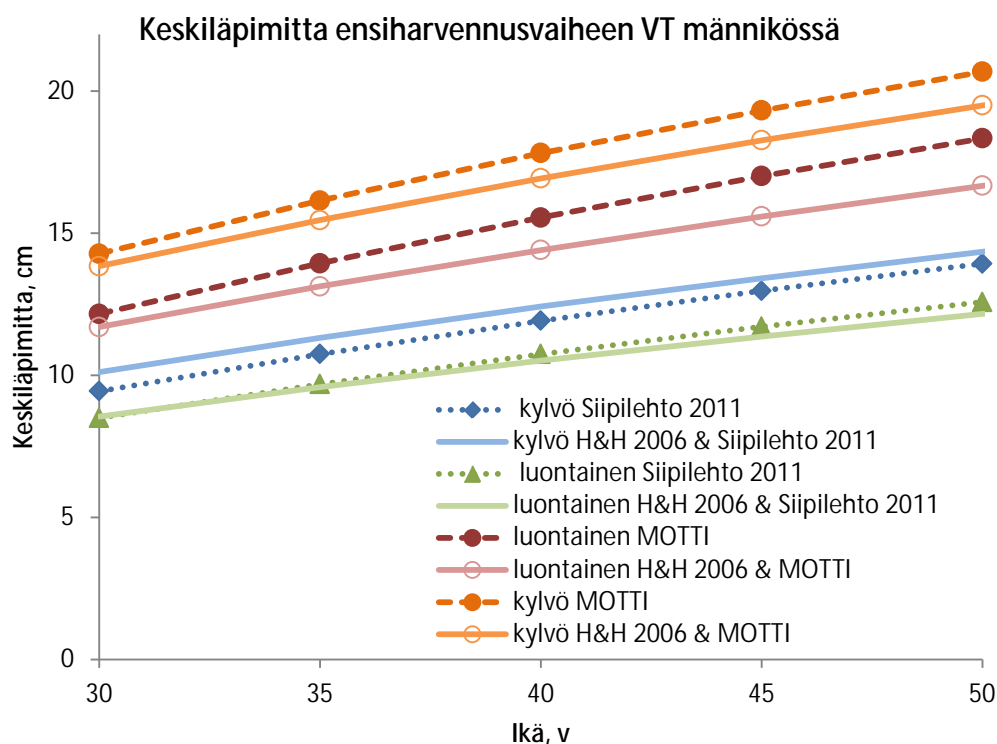
**Kuva 6.** Pohjapinta-ala (G) ennustettuna eri tiheyksillä MOTTI-mallilla ja Siipilehdon (2011a), Huuskosen ja Miinan (H&M 2007), Varmolan (1993) ja Nissisen (2002) malleilla 25-vuotiaissa VT männyn taimikoissa.



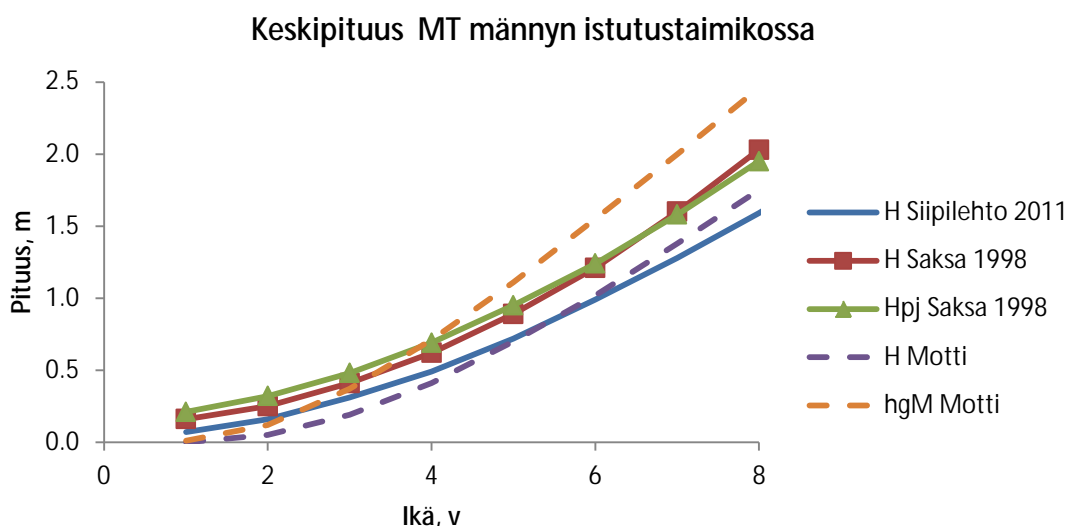
**Kuva 7.** Keskiläpimitta ( $D$  ja  $d_{GM}$ ) ennustettuna eri tiheyksillä MOTTI-malleilla sekä Siipilehdon (2011a), Huuskosen ja Miinan (H&M 2007), Varmolan (1993) ja Nissisen (2002) malleilla 25-vuotiaissa VT männyn taimikoissa.



**Kuva 8.** Valtapituus ( $H_{dom}$ ) ennustettuna eri tiheyksillä MOTTI-mallilla ja vaihtoehtoisilla Siipilehdon (2011a), Huuskosen ja Miinan (H&M 2007) sekä Varmolan (1993) malleilla 25-vuotiaissa VT männyn taimikoissa.



**Kuva 9.** Keskiläpimitta ( $D$ ) ennustettuna ensiharvennusvaiheessa (ikä 30–50 v) MOTTI-mallilla ja Siipilehdon (2011a) mallilla luontaisessa sekä kylvetyssä VT männikössä. Huuskosen ja Hynysen (H&H 2006) mallin ennusteet laskettiin sekä MOTTI-mallin että Siipilehdon (2011a) mallin runkoluvun ja valtapituuden odotusarvoilla selittäen.



**Kuva 10.** Keskipituuden ( $H$ ) alkukehitys MT männikössä Suonenjoella (1120 °Cvrk) ennustettuna MOTTI-malleilla, Siipilehdon (2011a) puustotunnusmalleilla ja Saksan (1998) malleilla paakkutaimelle ( $H$  Saksa) tai paljasjuuritaimelle ( $Hpj$  Saksa).

Saksa (1998) esitti keskipituuden alkukehityksen mallit Suonenjoen metsänhoitoyhdistyksen alueen mäntytaimikoille. MOTTI-mallilla saatu keskipituus oli aluksi selvästi pienempi kuin Saksan (1998) ja Siipilehdon (2011a) keskipituus ennuste (kuva 10). Saksan (1998) mallin mukainen keskipituus oli neljään vuoteen asti jopa suurempi kuin vertailuun lisätty MOTTI-mallin painotettu keskipituus,  $h_{gM}$ . Viiden vuoden jälkeen MOTTI-mallin keskipituus alkoi lähestyä Saksan (1998) ennusteita, kun taas Siipilehdon (2011a) ennuste alkoi jäädä jälkeen Saksan (1998) ennustamasta keskipituuden kehityksestä.

Saksan (1998) mukaan paakkutaimen keskipituus ohitti paljasjuuritaimen keskipituuden kuudentena kasvukautena, vaikka paakkutaimi oli kaksi vuotta nuorempi. Sama ilmiö havaittiin kannonkorkeusläpimitassa. Niinpä 7-vuotinen paakkutaimi ja 9-vuotinen paljasjuuritaimi olivat saman paksuisia tyveltä (3,4 cm). Vastaavat läpimitat MOTTI-malleilla olivat 2,1 cm ja 3,2 cm aritmeettisestä keskipituudesta laskettuna yhtälön (5) avulla. On myös huomionarvoista, kuinka vähän paljasjuuristen ja paakkutaimien alkupituudet poikkesivat toisistaan (kuva 10). Nimittäin 3-vuotiaan avomaalla kasvatetun ja koulitun taimen (A2+A1) pituus oli keskimäärin 16 cm ja 1-vuotiaan muovihuoneessa kasvatetun paakkutaimen (FS-408) pituus oli 12,5 cm. Nykyisillä MOTTI-malleilla saatavat alkupituudet (ikä 1–3 vuotta) niin männyllä (kuva 10) kuin muillakin puulajeille ovat selvästi liian pieniä.

## 6.2 Syntyvän taimiaineksen vertailu

Taulukoihin 5 ja 6 on koottu eri tavoin muokatuille uudistusaloille syntyvien taimien runkolukunusteita puulajiryhmittäin. Runkoluvut on ennustettu MOTTI 3.0 versiolla ja Miinan ja Saksan (2008, 2013b) malleilla (jatkoksa M & S malli, kuten taulukoissa 5 ja 6) männyn ja kuusen tyyppillisille uudistusaloille. Vertailussa on otettu huomioon vain luontaiset ja kylvötaimet, joten istutetut taimet puuttuvat luvuista. M & S malleissa muokkaamattomuus, laikutus ja mätästys olivat dummy-muuttujina ja perustaso vastasi äestettyä uudistusala. Vertailuissa malleissa on aika paljon eroavaisuuksia: (1) MOTTI 3.0 versiossa erotetaan kääntömätästys omaksi muokkauslajiksi, koska sen rikkomaa maanpinnan osuus on muokkausmenetelmistä pienin yhdessä laikutuksen kanssa, kun taas M & S mallit eivät erottele erilaisia mätästysmenetelmiä toisistaan. (2) MOTTI-malleissa muokkaamaton tarkoittaa sitä, että uudistusala on jätetty muokkaamatta, kun taas M & S malleissa muokkaamaton tarkoittaa pääasiassa *muokatun uudistusalan muokkaamatonta 20 m<sup>2</sup>:n koalaa*. (3) MOTTI-mallien taimimäärät perustuvat varttuneisiin taimikoihin (keskipituus > 1,3 m), kun M & S mallien taimimäärät perustuvat 4-vuotisiin taimikoihin (keskipituus 0,5 m). (4) MOTTI-mallit ei erottele siemen- ja vesasyntyisiä taimia toisistaan (jako kehityskelpoinen ja kehityskelvoton), kun M & S malleilla koivun runkoluvut edustivat siemensyntyistä koivua. (5) MOTTI-malleissa muun lehtipuuston runkoluku oli haavan ja lepän sekä muiden lehtipuiden (mm. pihlaja ja pajut) runkolukujen summa, kun M & S malleilla se sisälsi vesasyntyiset koivut muiden lehtipuulajien lisäksi. (6) MOTTI-mallien runkolukua rajoittaa taimen pieni koko (VMI-aineistossa taimea ei huomioida, jos sillä ei ole merkitystä taimikon kehityksen kannalta), kun taas M & S aineistoissa huomioitiin yli 5 cm pitkät kehityskelpoiset taimet niin, että puulajikohtaiseksi enimmäismääräksi asetettiin 20 tainta koalalla (10 000 ha<sup>-1</sup>).

M & S malleilla muokkaamattomille ja eri tavoin muokatuille alustoille syntyvien kokonaisrunkolukujen erot olivat lopulta aika pieniä; kokonaisrunkoluku vaihteli männikoissä muokkaamattoman pinnan 6 117 ha<sup>-1</sup> tiheydestä mätästetyn uudistusalan 9 594 ha<sup>-1</sup> tiheyteen ja vastaavasti kuusikoissa 7 304–9 558 ha<sup>-1</sup>. MOTTI-malleilla vastaavat runkoluvut muokkaamattomilla, laikutetuilla ja kääntömätästetyillä uudistusaloilla olivat systemaattisesti pienempiä (2 158–6 173 ha<sup>-1</sup>) kuin M & S mallien ennusteet (taulukko 5 ja 6). Onkin huomion arvoista, että MOTTI-malleilla kääntömätästyksessä syntyi melkein puolta vähemmän taimia kuin (laikku)mätästyksessä (taulukko 5 ja 6). MOTTI-mallit tuottivat selvästi suurimmat runkoluvut äestetyille uudistusaloille (12 263–15 277 ha<sup>-1</sup>) (ks. taulukko 5 ja 6). Mätästyksessä kokonaisrunkoluvut samoin

kuin luontaisen täydentävän männyn ja kuusen runkoluvut olivat lähellä toisiaan vertailluilla malleilla. MOTTI-malleilla saatiin männyn taimikoiden muokkausaloille yleensä M & S malleja tiheämpi koivusekapuusto, mutta muokatuissa kuusen taimikoissa koivun runkoluvut olivat yleensä aika samaa suuruusluokkaa.

MOTTI 3.0 versiossa rikutun maanpinnan osuudesta johdettu muokkausvaikutus oli huomattavan suuri. M & S malleissa samaa trendiä ei ole havaittavissa, vaan laskennallisesti eniten maanpintaa rikkovilla äestysaloilla oli muokkausaloista pienimmät runkoluvut. Toisaalta sekä MOTTI että M & S mallit tuottivat mätästysaloille suuremman tiheyden kuin laikutetuille uudistusalaille.

**Taulukko 5.** Muokkaustavan vaikutus syntyviin taimimääriin MOTTI-ohjelmistolla (MOTTI) ja Miinan ja Saksan (2008) mukaan (M & S). Tuoreen kankaan männyn istutuslalla istutustaimet eivät sisälly männyn runkolukuihin, mutta kuivahkon kankaan männyn kylvöalalla kylvötaimet sisältyvät männyn runkolukuihin. MOTTI-simuloinnissa kylvömäntyjä oletettiin olevan 2000 ha<sup>-1</sup>.

Puulaji	Ei muokkausta		Äestys		Laikutus		Mätästys		Käntöm.
	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI
<b>Männyn istutus, tuore kangas, 1 250 °Cvrk</b>									
Mänty	353	1 431	3 829	2 137	914	2 049	2 857	2 477	914
Kuusi	223	575	947	648	474	672	789	719	474
Koivu	1 469	1 419	6 249	2 848	3 124	2 534	5 207	2 848	3 124
Muut	401	3 176	1 706	3 176	853	3 176	1 421	3 176	853
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 446</b>	<b>6 601</b>	<b>12 731</b>	<b>8 809</b>	<b>5 365</b>	<b>8 431</b>	<b>10 274</b>	<b>9 220</b>	<b>5 365</b>
<b>Männyn kylvö, kuivahko kangas, 1250 °Cvrk</b>									
Mänty	2 711	2 049	7 486	3 493	3 743	3 685	6 238	3 777	3 743
Kuusi	230	546	635	546	318	700	529	765	318
Koivu	1 135	1 440	3 133	2 321	1 567	2 182	2 611	2 321	1 567
Muut	366	2 082	1 009	2 497	505	2 497	841	2 731	505
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>4 442</b>	<b>6 117</b>	<b>12 263</b>	<b>8 857</b>	<b>6 133</b>	<b>9 064</b>	<b>10 219</b>	<b>9 594</b>	<b>6 133</b>

**Taulukko 6.** Muokkaustavan vaikutus syntyviin taimimääriin MOTTI-ohjelmistolla (MOTTI) ja Miinan ja Saksan (2013b) mukaan (M & S). Kuusen istutuslalla istutustaimet eivät sisälly kuusen runkolukuihin.

Puulaji	Ei muokkausta		Äestys		Laikutus		Mätästys		Käntöm.
	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI	M & S	MOTTI
<b>Kuusen istutus, lehtomainen kangas, 1250 °Cvrk</b>									
Mänty	43	88	232	233	109	274	194	233	109
Kuusi	534	1 865	2 987	1 807	937	1 882	2 189	2 013	937
Koivu	439	1 470	2 439	2 374	1 186	2 568	2 032	2 857	1 186
Muut	1 142	3 881	8 399	3 881	3 941	3 881	7 000	3 881	3 941
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 158</b>	<b>7 304</b>	<b>14 057</b>	<b>8 295</b>	<b>6 173</b>	<b>8 605</b>	<b>11 415</b>	<b>8 984</b>	<b>6 173</b>
<b>Kuusen istutus, tuore kangas, 1 250 °Cvrk</b>									
Mänty	182	191	457	505	229	590	381	505	229
Kuusi	640	2 015	5 028	1 948	1 614	2 028	3 890	2 168	1 614
Koivu	963	1 752	3 245	2 830	1 680	3 062	2 704	3 406	1 680
Muut	1 734	3 479	6 547	3 479	1 549	3 479	2 008	3 479	1 549
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>3 519</b>	<b>7 437</b>	<b>15 277</b>	<b>8 762</b>	<b>5 072</b>	<b>9 159</b>	<b>8 983</b>	<b>9 558</b>	<b>5 072</b>

## 7 Tulosten tarkastelua

### 7.1 Mallien toiminta

Varhaiskehityksen ennustaminen MOTTI-ohjelmistossa sisältää uusien puiden synnyn, puiden kasvamisen ja puiden kuoleamisen kuvaukset puustotunnustasolla sekä jakaumamallit sulkeutuneen metsän puiden ennustamiseksi puustotunnustuksen funktiona.

Taimien syntyminen perustuu VMI-aineiston keskimääräisiin luontaisesti syntyvien taimien kokonaisrunkolukuihin ja sen jakaantumiseen eri puulajeille pääpuulajin ja kasvupaikan mukaan taulukoituna. Näitä runkolukuja korjattiin maanmuokkauksessa rikkoutuvan maanpinnan osuuteen perustuvalla mallilla (yhtälö 2) MOTTI 3.0 versiossa. Vertailuissa havaittiin, että MOTTI 3.0 tuotti muokkaamattomille ja laikutetuille uudistusaloille pienempiä kokonaistiheyksiä, mätätetyille aloille melko samanlaisia tiheyksiä, mutta äestetyille uudistusaloille selvästi suurempia kokonaistiheyksiä kuin Miinan ja Saksan (2008, 2013b) mallit nykyisiltä käytännön uudistusaloilta. Vaikka Miinan ja Saksan (2008, 2013b) malleissa muokkaustapa oli dummy-muuttujana, niin syntyvä taimitiheys ei noudattanut suoraviivaisesti muokkauksessa rikkoutuvan maanpinnan osuutta MOTTI-mallien tapaan. Sen sijaan Siipilehdon ym. (2014) mukaan turvekankaiden uudistusaloille (192 taimikkoa) syntyneen sekapuuston tiheys noudatti MOTTI-mallien mukaisesti muokkauksessa rikutun maanpinnan osuutta, vaikkakin taimitiheydet olivat suurempia kuin kivennäismailla saadut. Miinan ja Saksan (2008, 2013b) vertailuaineistojen uudistusalat on todennäköisesti inventoitu ennen maksimitiheyttä, joka Lehtosalon ym. (2010) mukaan saavutetaan noin 6 vuotta muokkauksesta tuoreilla kankailla ja Saksan (1986) mukaan noin 8 vuoden kuluessa kuivahkoilla kankailla. Toisaalta MOTTI-mallien taimitiheystaulukoiden perustana olevissa VMI-aineiston varttuneissa taimikoissa maksimitiheys oli todennäköisesti jo ohitettu. Lehtosalon ym. (2011) mukaan mätäspinta taimettuu usean vuoden ajan, kun taas laikussa taimitiheys ei ajan kuluessa juuri muutu. Tästä johtuen laikun suurempi taimitiheys kolme vuotta muokkauksesta kääntyi mättään suuremmaksi tiheydeksi kuusi vuotta muokkauksesta (Lehtosalo ym. 2011). Kääntömätästystä ei Miinan ja Saksan (2008, 2013b) tutkimuksissa erotettu muusta mätästyksestä. Kääntömätästys onkin melko uusi menetelmä ja siitä on toistaiseksi melko vähän tutkittua käytännön tietoa (Örlander ym. 1998, Huttunen 2013, Huittinen 2013), vaikka se kuuluu kuusen uudistamisen suositusten mukaiseen muokkausvalikoimaan (Hyvän metsänhoidon ...2006). Huttusen (2013) ja Huittisen (2013) mukaan kääntömätästykseen yhteydessä perkaustarve oli pienempi kuin laikkumätästyksessä. Näissä tutkimuksissa lehtisekapuuston runkoluku oli kääntömätästyksessä 20–50 % pienempi kuin laikkumätästyksessä.

Taimikkovaiheessa tärkein puuston kehitystä kuvaava tekijä on valtapituuden kehitys. MOTTI-malleissa taimikon tiheys vaikutti kaikkiin pituustunnuksiin, mutta tiheyden vaikutus valtapituuteen oli selvästi pienempi kuin keskipituuteen tai keskiläpimittaan (Siipilehto 2006). Siipilehdon (2011a) malleja lukuun ottamatta vertailut valtapituusmallit eivät sisältäneet tiheyden vaikutusta (esim. Varmola 1993, Huuskonen & Miina 2007). Normaalissa kasvatustiheydessä MOTTI-mallin ja Varmolan (1993) mallin valtapituudet olivat lähellä toisiaan, mutta ylitiheissä taimikoissa MOTTI-mallin valtapituus oli selvästi pienempi. Olemassa oleva tutkimustieto ei anna yksiselitteistä kuvaa tiheyden vaikutuksesta eri pituustunnuksiin. Varmolan ym. (1998) tutkimuksessa kylvötuppaiden harventaminen lisäsi valtataimien pituuskasvua tilastollisesti merkittävästi, mutta useissa muissa tutkimuksissa tiheyden ei ole havaittu vaikuttavan pituuskasvuun (esim. Kinnunen 1986, Valkonen & Ruuska 2003, Mäkinen & Isomäki 2004a, Varmola & Salminen 2004, Miina & Saksa 2013a) tai lisääntynyt tiheys on jopa lisännyt pituuskasvua (Sirén 1956, Näslund 1983, Mäkinen & Isomäki 2004b). Suotuisin pituuskehitys saattaa vaatia tietyn optimitiheyden ja siten tiheyden vaikutus olisi epälineaarinen. Esimerkiksi lehtipuilla havaittiin liiallisen tiheyden pienentävän pituuskasvua kilpailusta johtuen, mutta myös harva tilajärjestys vähensi pituuskasvua oksikkuuden ja haaroittumisen lisääntyessä (Pohjonen 1974, Niemistö 1995).

Kuusen pituuskasvu istutuksen jälkeen on nykyisillä menetelmillä nopeampaa kuin 1980-luvulla, jolloin MOTTI-mallien perustana olevat INKA- ja TINKA-koelat perustettiin (Kaila ym. 2006). Saksan ym. (2005) nykykuusikoiden keskipituuden kasvumalli oli perustana uudelle MOTTI (3.0) sovellukselle istutuskuusikoiden kasvun korjaamiseksi. Tätä sovellusta on testattu laajemmin turvekankaiden uudistamisen aineistolla rinnastamalla turvekankaat kivennäismaiden vastaaviin metsätyyppeihin (Vasander & Laine 2008). Testin mukaan kuusen valta- ja keskipituuden harha ja keskivirhe pienenevät tyypillisissä mustikka- ja puolukkaturvekankaiden taimikoissa MOTTI 3.0 versiolla verrattuna edelliseen MOTTI 2.0 versioon, mutta samalla ruohoturvekankailla pituuskehitys yliarvioitiin huolestuttavasti (ks. Siipilehto ym. 2014).

MOTTI-malleissa ei huomioida erilaisten taimimateriaalien eroja alkupituudessa tai taimien kehityksessä, vaan oletetaan, että viljelyssä käytetään kasvupaikalle sopivinta taimimateriaalia. Koska MOTTI-mallien pituustunnuksissa ei ole vastaavaa alkupituusparametria kuin Saksan (1998) mallissa, niin MOTTI-malleilla saatiin istutusmetsille ensimmäisen viiden vuoden aikana pienempi keskipituus kuin Saksan (1998) mallilla. Miinan ja Saksan (2013b) mukaan taimimateriaali (paljasjuuri, pieni tai iso paakkutaimi) ei ollut tilastollisesti merkitsevä muuttuja kuusen pituutta ennustettaessa.

Ennustettaessa puustotunnusten kehitystä MOTTI-ohjelmistolla metsän uudistamisen yhteydessä, tunnetaan aina puusto-ositteiden runkoluku. Puustotunnusmallien kalibrointi runkoluvun avulla kuvasi puustotunnusten väliset riippuvuudet loogisesti. Siten puuston pohjapinta-alan, keskiläpimitan ja -pituuden kehitys erilaisilla kasvatustiheyksillä vastasi melko hyvin useita aikaisempia tutkimustuloksia (Saksa 1998, Varmola 1993, Huuskonen & Hynynen 2006). Vaikka MOTTI-mallin kalibroitu pohjapinta-ala vastasi kylvöä lukuun ottamatta melko hyvin Nissisen (2002) pohjapinta-alaa, otettiin Nissisen mallit käyttöön MOTTI 3.0 versiossa pohjapinta-alan pienemmän keskivirheen vuoksi. Pieni keskivirhe ja korkea selitysaste varmistavat kalibroittavia puustotunnusmalleja paremmin loogisen yhdistelmän keskeisten puustotunnusten  $G$ ,  $N$  ja  $D$  välillä.

Interaktiivisessa metsän uudistamisessa MOTTI-käyttäjä voi antaa viljelymateriaaliin kohdistuvan oletetun kuolleisuuden. Tämä kuolleisuus vähennetään suoraan viljelytiheydestä. MOTTI (2.0) ei sisältänyt taimivaiheen kuolemista lainkaan, kun taas päivitettyssä MOTTI 3.0 versiossa sovelletaan puutason kuolemissmallia taimikkovaiheessa puustotunnustasolla. Potentiaalisesti kuolleisuutta esiintyy vain kasvatuskelvottomissa taimissa ensimmäisessä taimijaksossa ja varhaisperkauksen jälkeen syntyvän toisen taimijakson kaikissa ositteissa siten, että kuoleminen kohdistuu pituuskehityksessä jälkeen jääviin puusto-ositteisiin. Saksan (1998) mukaan taimikuolleisuus on pientä istutusvuonna, mutta kahtena seuraavana vuonna riski on suurimmillaan ja kuuden vuoden päästä istutettuja männyn taimia oli elossa keskimäärin 70 prosenttia. Yleisin yksittäinen kuolinsyy oli tukkimiehentäin syönteä. MOTTI-ohjelmistossa taimikkovaiheen kuoleminen oli selvästi vähäisempää, koska se perustui puiden väliseen kilpailuun, eikä esimerkiksi tukkimiehentäin, myyrän tai pintakasvillisuuden aiheuttamaan tuhoriskiin.

MOTTI-ohjelmistossa varhaiskehityksen ja varttuneen metsän rajapinnassa luodaan kuvauspuut puustotunnuksien funktiona kokojakaumamallien avulla. Jakaumaennusteiden ja puustotunnusten välillä on tietty yhteensopimattomuutta mm. siksi, että vain osa MOTTI-mallien puustotunnuksista on jakaumamallien selittävinä muuttujina. Pituusjakaumamallissa selittävät tunnuksset olivat  $H$ ,  $H_{dom}$  ja  $N$  ja läpimittajakaumassa  $G$ ,  $N$  ja  $d_{gM}$ . Kun puustotunnusmallien selittävinä muuttujina tunnuksset laskettiin kuvauspuista, saatiin vain osa selittävästä tunnuksista tarkasti, mutta osaan jäi satunnaista virhettä. Niissä puustotunnuksissa, jotka eivät olleet jakaumamallin selittäviä muuttujia, ero puustotunnusennusteen ja kuvauspuista lasketun vastaavan tunnuksen välillä saattoi olla huomattavan suuri. Suurimmat erot havaittiin kuusen valta- ja keskiläpimitas- ja sekä männyn valtapituudessa.



## 7.2 Varhaiskehitysmallin kehityskohteita

Merkittävimmät kehitystarpeet MOTTI-ohjelmiston alkukehityksen kuvauksessa liittyvät erillisen vesojen pituuskehitysmallin puuttumiseen, taimien kuolemiseen, valtaläpimitan loogiseen vasteeseen taimikon valtapituuden saavuttaessa rinnankorkeuden, taimikonhoidon yhteydessä syntyvään uuteen taimiainekseen ja jakaumamalleilla luotujen kuvauspuiden puutteelliseen yhteensopivuuteen alkuperäisiin puustotunnuksiin. Myös koneellisen metsänviljelyn ja taimikonperkauksen kehitys asettaa uusia vaatimuksia malleille. Lisäksi uudistamisvaiheessa syntyvän runkoluvun suuren metsiköiden välisen satunnaisen vaihtelun puuttuminen on merkittävä rajoitus erilaisten hoitotoimenpideketjujen vertailussa.

Vesakon kuvaus voisi jatkossa olla yksi MOTTI-ohjelmiston kehitettäviä uusia piirteitä, koska peratusta puustosta tunnetaan runkoluvut ja keskimääräiset kantoläpimitat puulajeittain. Puulaji ja kantoläpimita ovat vesomisalltiuteen ja vesojen kasvuun vaikuttavia tekijöitä (ks. Maltamo ym. 1989, Kays & Canham 1991, Johansson 2008, Hamberg ym. 2011). Tiheiden kanto-vesaryhmien kehityksen kuvaukseen tarvitaan myös niiden itseharveneminen (mm. Johansson 1992, 2008, Uotila ym. 2010).

MOTTI-ohjelmisto on edelleen puutteellinen taimikuolleisuuden ja tuhoriskien suhteen. Ohjelmistoa tulisi kehittää niin, että taimien kuolemisriskiä voitaisiin arvioida esimerkiksi kasvupaikan, taimimateriaalin ja muokkausmenetelmän suhteen. Muokkauksella ja taimimateriaalin valinnalla on voitu vähentää tukkimiehentäin aiheuttamia tuhoja (Kinnunen 1999, Örlander & Nilsson 1999, Thorsén ym. 2001, Pearson ym. 2011) ja taimikonhoidolla hirvituhoja (esim. Härkönen ym. 2008). Muokkauksella voidaan parantaa istutustaimien eloonjäämistä (Örlander ym. 1998, Pearson ym. 2011), kun taas muokkaamattomuus voi suorastaan vaarantaa metsän uudistumisen (Saksa & Smolander 1998, Hallikainen ym. 2004, Saksa & Kankaanhuhta 2007, Miina & Saksa 2008).

Varhaiskehitystä ajatellen tulee malleja testattaessa huomioida läpimita- ja pituustunnusten keskinäinen loogisuus siinä vaiheessa, kun pituustunnus ylittää rinnankorkeuden. Nykyisissä MOTTI-malleissa tämän vaiheen valtaläpimitat olivat männyllä ja etenkin kuusella epärealistisen suuria. Malleja kalibroitaessa odotusarvoa pienemmällä runkoluvulla tämä epäsuhta vielä hieman kasvaa. MOTTI-mallit (Siipilehto 2006) oli laadittu Laasasenahon (1975) yhtälön mukaisille kannonkorkeusläpimitoille. Taimikon alkuvaiheen pienille puille ja juuri rinnankorkeuden saavuttaneille puille yhtälö ei ole sopiva, vaan näitä varten kannonkorkeus tulee mallittaa pituuden funktiona.

MOTTI-ohjelmistossa ennustetut kannonkorkeustunnukset (Siipilehto 2006) muunnettiin takaisin rinnankorkeudelle. Taimikon varhaisperkauksen vaikutuksen kuvausta voitaneen parantaa pitäytymällä kannonkorkeusläpimitan ennusteissa, jolloin vältetään rinnankorkeuden epäjatkuvuuskohdasta ja sen mukanaan tuomista ongelmista. Toisen taimijakson syntymistä MOTTI-ohjelmistossa olisi jatkettava vähintään 4 metrin valtapituusvaiheeseen saakka, jolloin taimikon voi olettaa jokseenkin sulkeutuneen. Näillä muutoksilla saataisiin varhaisperkauksen ajoituksen vaikutus loogiseksi ja voitaisiin välttää MOTTI-ohjelmistossa havaittu varhaisen taimikon harvennuksen (kun  $H_{dom} \approx 2$  m) ylivoimainen taloudellinen tulos varhaisperkaukseen verrattuna.

Siipilehdon (2011a) uudemman sukupolven puustotunnusmallit osoittautuivat MOTTI-malleja (Siipilehto 2006) paremmin yhteensopiviksi Huuskosen ja Hynysen (2006) läpimitaennusteen, Saksan (1998) keskipituusennusteen ja Nissisen (2002) pohjapinta-alan ennusteen kanssa. On kuitenkin huomionarvoista, että Siipilehdon (2011a) puustotunnusmalleissa ei ole erotettu metsiköiden välistä vaihtelua ja metsikön sisäistä lämmukaista vaihtelua toisistaan. Metsiköiden välisen vaihtelun erottavien mallien laadinta on työn alla. Uusien mallien laadinnan yhteydessä tulee tarkastella muokkausmenetelmien ja taimikonhoidon (esim. Miina & Saksa 2008, 2013b) vaikutusta taimikon varhaiskehitykseen.

Puustotunnusten avulla luodaan kuvauspuut, kun pääpuulaji saavuttaa 8 m valtapituuden. Nykyiset jakaumien ennustemallit toimivat hyvin, vaikka ne eivät tuota kaikkia selittäviä muuttujia virheettömästi (Siipilehto 2011b). Vaihtoehtoisena menetelmänä tutkitaan parhaillaan Weibull-jakauman ratkaisua momentteihin perustuen (esim. Cao 2004) ja menetelmää, jossa mediaania ( $d_{gM}$ ) hyödynnetään momenttien lisäksi jakaumaparametrien ratkaisemiseksi (Siipilehto & Mehtätalo 2013). Läpimittajakaumasta saatavat yhdenmukaiset puustotunnukset olisivat silloin edellä mainituissa tapauksissa  $D$ ,  $N$  ja  $G$  tai  $d_{gM}$  ja  $N$  ja  $G$ . Siipilehdon ja Mehtätalon (2013) mukaan näiden puustotunnusten yhdenmukaisuus paransi samalla puuston tilavuustunnusten tarkkuutta.

Kannonnosto on yleistynyt uudistumiseen vaikuttava toimenpide. Sillä lisätään energiapuun talteenottoa ja samalla se on osa muokkausta. Kannonnostoaloille syntyvä taimimäärä on suurempi ja voi olla jopa noin kaksinkertainen verrattuna muokattuihin uudistusaloihin ilman kannonnostoa (Melkas 2006, Saksa 2012, Karlsson & Tamminen 2013). Vaikka lehtipuustoa oli enemmän kannonnostoaloilla, taimettuminen tapahtui pitemmällä aikavälillä siten, että tiheyden maksimi saavutettiin 8–9 vuotta kannonnostosta, kun perinteisessä muokkauksessa se on saavutettu noin 5–6 vuotta muokkauksesta (ks. Saksa 2012). Kannonnoston vaikutuksesta istutustaimikon varhaiskehitykseen on saatu erilaisia tutkimustuloksia. Kannonnoston on joko havaittu nopeuttavan kuusen pituuskasvua (Mekis ym. 2010), tai pituuskasvun erot eri käsittelyissä on vaihdellut koekenttien välillä ilman selvää systematiikkaa (Kubin ym. 2013) tai pituuskasvu ei ole eronnut muokkausalojen ja kannonnostoalojen välillä (Saksa 2012). Hitaampi luontainen taimettuminen vähensi osaltaan viljelypuulajiin kohdistunutta kilpailua.

Tutkimustulosten perusteella kannonnoston vaikutus taimettumiseen on linjassa MOTTI-mallien riktun maanpinnan osuuden ja syntyvän tiheyden kuvauksen kanssa, koska riktottu osuus on yli 50 % kannonnostoaloilla ja noin 20–30 % muokkausaloilla (Strandström 2006, Saksa 2011, Luoranen ym. 2007, Kubin ym. 2013). Koska taimia tulee hitaammin, lehtipuuston keski-ikää voisi laskea 1–2 vuodella perinteisempiin muokkauksiin verrattuna.

Koneellinen istutus voidaan installoida MOTTI-ohjelmistoon lisäämällä julkaistuja kustannusmalleja (Arnkil & Hämäläinen 1995, Saarinen 2006, Rantala & Laine 2010). Koneellinen kitkevä perkaus olisi mahdollista liittää MOTTI-ohjelmistoon siten, että perkaus tehdään ajoissa (3–4 vuotta istutuksesta), noin 10 % viljelymateriaalista oletetaan kuolevan käsittelyn yhteydessä, toisen taimijakson syntyminen estetään ja pituuskehitykseen käytetään MOTTI 3.0 version malleja (istutetun kuusen nopeampi alkukehitys) (ks. Heikkinen 2009, Ivakko 2012). Samalla MOTTI-ohjelmistoon tulee liittää Rantalan ja Kauton (2011) kitkevän perkauksen ajanmenekkimalli.

MOTTI-malleissa käytettiin taimitiheyksien korjaukseen laskennallista riktun maanpinnan osuutta eri muokausmenetelmillä (Luoranen ym. 2007). Tämä menettely saattoi eri muokausmenetelmät erilaisempaan asemaan syntyvän sekapuuston tiheyden suhteen kuin laajat käytännön inventointiaineistot osoittivat (vrt. Miina & Saksa 2008, 2013b). Käytännössä esim. muokkaukoneen telojen rikkoma maanpinnan osuus voi olla yhtä suuri kuin varsinainen muokkausjälki (ks. Kubin ym. 2012), joten se tasaa muokkausten välisiä eroja ja tulisi ottaa huomioon muokkauksen korjausker-toimissa (yhtälö 2).

Metsän uudistamisen yhteydessä syntyy luontaista taimiainesta, jonka vaihtelu on erittäin suurta sekä taimikoiden välillä että taimikoiden sisällä (esim. Saksa 1986, Lehtosalo ym. 2010, Miina & Saksa 2008, 2013b). Uudistamis- ja taimikkovaiheessa syntyvän taimiaineksen suuren metsiköiden välisen satunnaisen vaihtelun puuttuminen on merkittävä rajoitus erilaisten hoitotoimenpideketjujen vertailussa. Miina ja Saksa (2008, 2013b) sekä Miina ja Heinonen (2008) tarkastelivat metsikkö- ja koealatasen vaihtelun merkitystä metsikön alkukehityksen ennustamisessa. Menettelyllä voitiin tarkastella metsän uudistamisen onnistumisen todennäköisyyttä. Huomionarvoista on, että Miinan ja Heinosen (2008) tulosten mukaan keskimääräiset taimikonhoitokustannukset aliarvioituvat merkittävästi, jos metsiköitten välistä satunnaista vaihtelua ei oteta huomioon. Metsän uudistumistuloksen satunnaisen vaihtelun sisällyttäminen MOTTI-ohjelmistoon antaa tulevaisuudessa luotettavamman ja monipuolisemman mahdollisuuden analysoida uudistamis- ja taimikonhoitotöiden vaikutuksia.

## Kirjallisuus

- Ahtikoski, A., Päätaalo, M.-L., Niemistö, P., Karhu, J. & Poutiainen, E. 2004. Effect of alternative thinning intensities on the financial outcome in silver birch (*Betula pendula* Roth) stands: A case study based on long-term experiments and MOTTI stand simulations. *Baltic Forestry* 10(2): 46–55
- Arnkil, R. & Hämäläinen, J. 1995. Bräcke Planter- ja Ilves-istutuskoneiden tuottavuus ja työjälki. *Metsätehon katsaus* 1. 8 s.
- Björkdahl, G. 1983. Höjdtveckling hos stubbskott av vårt- och glasbjörk samt tall och gran efter mekanisk röjning. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Stencil 18. 54 s.
- Cao, Q.V. 2004. Predicting parameters of a Weibull function for modelling diameter distribution. *Forest Science* 50(5): 682–685.
- Eerikäinen, K. 2009. A multivariate linear mixed-effects model for the generalization of sample tree heights and crown ratios in the Finnish National Forest Inventory. *Forest Science* 55(6): 480–493.
- 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.
- Hallikainen, V., Hyppönen, M., Jalkanen, R. & Mäkitalo, K. 2004. Metsänviljelyn onnistuminen Lapin yksityismetsissä vuosina 1984–1995. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2004: 3–20.
- Hamberg, L., Vartiamaäki, H., Malmivaara-Lämsä, M., Löfström, I., Valkonen, S. & Hantula, J. 2011. Short-term effects of mechanical and biological treatments on *Sorbus aucuparia* L. sprouting in mesic forests in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 505–514.
- Harstela, P. 2003. Taimikonhoidon vaikutus kuusen laatuun ja tuottoon. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2003: 143–152.
- Heikkinen, O. 2009. Kitkevän reikäperkauksen vaikutus lehtipuiden kantovesomisen määrään. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 28 s.
- Heiskanen, J. 2005. Jurovatko kuusentaimet? *Taimiuutiset* 4/2005. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki.
- Huittinen, N. 2013. Turvemaiden uudistaminen. Mikkelin ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 59 s.
- Huttunen, M. 2013. Varhaisperkauksen tarve kääntö- ja laikkumätästetyillä alueilla. Mikkelin ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 49 s. Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/55877/opparivalmis\\_mirjamhuttunen.pdf](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/55877/opparivalmis_mirjamhuttunen.pdf) [Lainattu 22.01.2014]
- Huuskonen, S. & Hynynen, J. 2006. Timing and intensity of precommercial thinning and their effect on the first commercial thinning in Scots pine stands. *Silva Fennica* 40(4): 645–662.
- Huuskonen, S. & Miina, J. 2007. Stand-level growth models for young Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management* 241: 49–61.
- Hynynen, J. 1993. Self-thinning lines for even-aged stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8(3): 326–336.
- Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.) 1996. Puuston kehityksen ennustaminen - MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 1996. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 612. 116 s.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 835. 116 s.
- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effect of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management* 207: 5–18.
- Hynynen, J., Salminen, H., Ahtikoski, A., Huuskonen, S., Ojansuu, R., Siipilehto, J., Lehtonen, M., Rummukainen, A., Eerikäinen, K. & Sauvula-Seppälä, T. 2014. Impact of alternative management and utilization of Finnish forest resources on the raw material supply for forest and energy industry. *Käsikirjoitus*.
- Hyvän metsänhoidon suosituksat. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006. *Metsäkustannus Oy*. 100 s.
- Härkönen, S., Miina, J. & Saksa, T. 2008. Effect of cleaning methods in mixed pine-deciduous stands on moose damage to Scots pines in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23(6): 491–500.

- Ivako, P. 2012. Kuusen taimikoiden koneellisen kitkennän jälkeisen kehityksen seuranta tutkimus. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 74 s.
- Johansson, T. 1992. Sprouting of 2- to 5-year old birches (*Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth) in stump height and felling time. *Forest Ecology and Management* 53: 263–281.
- 2008. Sprouting ability and biomass production of downy and silver birch stumps of different diameters. *Biomass and Bioenergy* 32: 944 – 951.
- Karlsson, K. & Tamminen, P. 2013. Long term effects of stump harvesting on soil properties and tree growth in Scots pine and Norway spruce stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28: 550–558.
- Kays, J.S. & Canham, C.D. 1991. Effects of time and frequency of cutting on hardwood root reserves and sprout growth. *Forest Science* 37(2): 5–539.
- Kaila, S., Poikela, A. & Strandström, M. 1999. Raivaussahatyön tuottavuus ja palkanmääritys. *Metsätalouden raportti* 78. 44 s.
- Kaila, S., Kiljunen, N., Miettinen, A. & Valkonen, S. 2006. Effect of timing of precommercial thinning on the consumption of working time in *Picea abies* stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21(6): 496–504.
- Kainulainen, T. 2011. Laikku- ja kääntömätästyksen vaikutus kuusen alkukehitykseen. Mikkelin ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 27 s.
- Kinnunen, K. 1986. Männyn kylvötuppauden harventamisesta. *Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja* 215. 19 s.
- Kinnunen, K. 1999. Tukkimiehentäin tuhojen kemiallinen ja mekaaninen torjunta. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1999: 687–695.
- 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 22.01.2014]
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. University of Joensuu. 182 s.
- Lehtosalo, 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.
- Lehtosalo, M., Mäkelä, A. & Valkonen, S. 2011. Laikkumätästettyjen uudistusalojen vesottuminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2011: 46–49.
- Luoranen, J. & Kiljunen, N. 2006. Kuusen paakkutaimien viljelyopas. Metsätutkimuslaitos. Gummerus kirjapaino, Jyväskylä. 108 s.
- Luoranen, J., Saksa, T., Finer, L. & Tamminen, P. 2007. Metsämaan muokkausopas. Metsätutkimuslaitos, Suonenjoen yksikkö. 75 s.
- Maltamo, M., Kangas, J. & Tolonen, R. 1989. Vesakon alkukehitys ja sen vaikutus taimikkoon. Kirjallisuustarkastelu. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 343. 66 s.
- Matala, J., Hynynen, J., Miina, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R., Väisänen, H. & Kellomäki, S. 2003. Comparison of a physiological model and a statistical model for prediction of growth and yield in boreal forests. *Ecological Modelling* 161(1-2): 95–116.
- Melkas, T. 2006. Metsänviljelyn onnistuminen kuuselle uudistettavilla kannonnostoaloilla. Tampereen ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 45 s.
- Menkis, A., Uotila, A., Arhipova, N. & Vasaitis, R. 2010. Effect of stump removal on growth and mycorrhization on *Picea abies* seedlings outplanted on a forest clear-cut. *Mycorrhiza* 20(7): 505–509.
- Miina, J. & Heinonen, J. 2008. Stochastic simulation of forest regeneration establishment using a multi-level multivariate model. *Forest Science* 54(2): 206–219.
- 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.
- & Saksa, T. 2013a. Perkauksen vaikutus männyn kylvö- ja luontaisen taimikon kehitykseen ja taimikonhoidon ajanmenekkiin. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2013: 33–44.
- & Saksa, T. 2013b. Predicting establishment of tree seedlings in regeneration areas of *Picea abies*. *Baltic Forestry* 19(2): 187–200.

- Mäkinen, H. & Isomäki, A. 2004a. Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland. *Forestry* 77: 349–364.
- & Isomäki, A. 2004b. Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management* 201: 311–325.
- Niemistö, P. 1995. Influence of spacing and row-to-row distance on growth and yield of silver birch (*Betula pendula*). *Scandinavian Journal of Forest Research* 10: 245–255.
- Nissinen, J. 2002. Improving compatibility between prediction of basal area diameter distributions and assessments of young stands. *Metsäsuunnittelun ja -ekonomian pro gradu -tutkielma*. Joensuun yliopisto. 48 s.
- Näslund, B.-Å. 1983. Development of Scots pine seeded plantations to first thinning. Results from three experimental plots with and without release-cutting. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture. Report 8. 37 s.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s.
- Parviainen, J., Sokkanen, S. & Ruotsalainen, M. 1985. Metsän uudistamisen vaihtoehtoja vertaileva las-kentaohjelma ”VILJO”. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 179.
- 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.
- Pohjonen, V. 1974. Istutustiheyden vaikutus eräiden lyhytkiertoviljelyn puulajien ensimmäisen vuoden saantoon ja pituuskasvuun. *Silva Fennica* 8(2): 115–127.
- Rantala, J. & Laine, T. 2010. Productivity of the M-Planter tree planting device in practice. *Silva Fennica* 44(5): 859–869.
- Rantala, J. & Kautto, K. 2011. Koneellinen kitkentä taimikon varhaisperkauksessa – työajanmenekki, kustannukset ja työpölyn laatu. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2011: 3–12.
- Saarinen, V.-M. 2006. The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest re-generation operations – preliminary results. *Biomass and Bioenergy* 30: 349–356.
- Saksa, T. 1998. Männyn istutustaimien menestyminen äestetyillä uudistusaloilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1998: 15–31.
- 2011. Kuusen istutustaimien menestyminen ja tukkimiehentäin tuhot eri tavoin muokatuilla uudistusaloilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011: 91–105.
- 2012. Regeneration after stump harvesting in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 290: 79–82.
- Saksa, T. & Smolander, H. 1998. Metsänviljelyn viivästyminen Pohjois-Savon alueella tilastoissa ja todellisuudessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1998: 53–64.
- Saksa, T. & Miina, J. 2007. Cleaning methods in planted Scots pine stands in southern Finland: 4-year results on survival, growth and whipping damage of pines. *Silva Fennica* 41(4): 661–670.
- Saksa, T. & Kankaanhuhta, V. 2007. Metsänuudistamisen laatu ja keskeisimmät kehittämiskohteet Etelä-Suomessa. Metsänuudistamisen laadun hallinta –hankkeen loppuraportti. 90 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/taimitieto/julkaisut/metsanuudistus-printable.pdf> [Lainattu 22.01.2014]
- Saksa, T. & Miina, J. 2010. Perkaustavan ja -ajankohdan vaikutus männyn istutustaimikon kehitykseen Etelä-Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2010: 115–127.
- 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. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 33(4): 281–301.
- 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.
- 2009. Modelling stand structure in young Scots pine dominated stands. *Forest Ecology and management* 257: 223–232.
- 2011a. Local prediction of stand structure using linear prediction theory in Scots pine-dominated stands in Finland. *Silva Fennica* 45(4): 669–692.
- 2011b. Methods and applications for improving parameter prediction models for stand structures in Finland. *Dissertationes Forestales* 124. 56 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/dissertationes/df124.htm>

- Siipilehto, J., Sarkkola, S. & Mehtätalo, L. 2007. Comparing regression estimation techniques when predicting diameter distributions of Scots pine on drained peatlands. *Silva Fennica* 41(1): 333–349.
- Siipilehto, J. & Mehtätalo, L. 2013. Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for Scots pine stands in Finland. *Silva Fennica* 47(4) 21 p. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1057>
- Siipilehto, J., Saarinen, M. & Hökkä, H. 2014. Taimikoiden pituuskehityksen luotettavuus sovellettaessa MOTTI-ohjelmiston kivennäismaiden ennustemalleja turvekankaiden taimikoihin. Metlan työraportteja 294. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp294.pdf>.
- Siitonen, M. 1996. MELA ja metsien kehityksen ennustaminen. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612: 7–19.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Kilpeläinen, H. & Salminen, O. 1999. MELA Handbook 1999 Edition. The Finnish Forest Research Institute. 492 s. Saatavissa: <http://mela2.metla.fi/mela/julkaisut/oppaat/mela99.pdf>
- Sirén, G. 1956. Thinning of pine stands. *Metsätaloudellinen aikakauslehti* 2-3: 40–49.
- Solmun maastotyöopas. 1997. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Hakapaino Oy. 82 s.
- Strandström, M. 2006. Effect of stump lifting on sprouting at the regeneration site. NSFP-seminar: Forest regeneration and bioenergy 15.12.2006. 13 s. Saatavissa: [http://www.metla.fi/tapahtumat/2006/metsanuudistaminen/Strandstrom\\_Markus-2006-12-15.pdf](http://www.metla.fi/tapahtumat/2006/metsanuudistaminen/Strandstrom_Markus-2006-12-15.pdf) [lainattu 22.01.2014]
- Tham, Å. 1983. Behandling av lövträd i barrträdsföryngringar. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 158. 48 s.
- Thorsén, Å., Mattson, S. & Weslien, J. 2001. Influence of stem diameter on the survival and growth of containerized Norway spruce seedlings attacked by pine weevils (*Hylobius* spp.). *Scandinavian Journal of Forest Research* 16:54–66.
- Uotila, K., Rantala, J., Saksa, T. & Harstela, P. 2010. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica* 44(3): 511–524.
- Valkonen, S. 1997. Viljelykuusikon alkukehityksen malli. *Metsätieteen aikakauskirja* 3: 321–347.
- Valkonen, S. & Ruuska, J. 2003. Effect of *Betula pendula* admixture on tree growth and branch diameter in young *Pinus sylvestris* stands in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 18:416–426.
- Varmola, M. 1993. Viljelymänniköiden alkukehitystä kuvaava metsikkömalli. *Folia Forestalia* 813:1–43.
- Varmola, M. & Salminen, H. 2004. Timing and intensity of precommercial thinning in *Pinus sylvestris* stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19:142–151.
- Varmola, M., Kolström, T. & Mehtätalo, E. 1998. The effect of release cutting on the growth and external quality of the dominant trees in a *Pinus sylvestris* stand established by spot sowing. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 151–159.
- Vasander, H. & Laine, J. 2008. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. *Metsäkustannus*.
- Zellner, A. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *Journal of American Statistical Association* 57: 348–368.
- Örlander, G. & Nilsson, U. 1999. Effect of reforestation methods on pine weevil (*Hylobius abietis*) damage and seedling survival. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(4): 341–354.
- Örlander, G., Hallsby, G., Gemmel, P. & Wilhelmsson, C. 1998. Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* –10-year results from site preparation trial in northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(4): 160–168.

**Liite 1**

**Taulukko 1A.** Taimimäärät luontaisessa uudistamisessa kasvupaikan ja pääpuulajin (1–9) mukaan.

Luontainen	Pääpuulaji								
<i>Kangas</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lehto	7 332	5 992	11 435	11 635	16 156	15 994	8 955	5 064	7 504
Lehtomainen	8 022	9 057	16 478	12 592	16 681	16 456	14 765	6 634	13 989
Tuore	7 250	8 175	11 570	7 332	16 991	9 713	6 634	5 710	8 022
Kuivahko	6 076	4 494	5 875	5 903	9 647	5 167	5 167	4 817	6 374
Kuiva	4 625	3 569	4 447	3 076	6 974	4 230	4 230	3 752	5 271
Karu	4 477	2 981	3 641	2 441	5 486	3 498	3 498	3 498	4 188
Kalliomaa	4 098	2 515	2 807	2 208	3 984	2 779	2 779	3 262	3 134
Lakimetsä	1 998	1 998	1 998	1 998	1 998	1 998	1 998	1 604	1 998
<i>Korpi</i>									
Letto, Lhtk	7 864	9 344	9 997	9 164	7 332	7 332	7 332	6 248	7 332
Ruohoinen, Rhtkg	10 183	10 549	27 846	12 877	10 199	10 199	10 199	7 631	11 968
Suursarainen, Mtkg	10 984	10 451	23 587	17 678	13 095	13 095	13 095	8 955	13 095
Piensarinen, Ptkg	15 560	9 624	18 215	11 902	5 710	5 710	5 710	11 384	5 710
Tupasvilla, Vtkg	11 499	7 480	13 905	8 866	4 447	4 447	4 447	9 228	4 447
Rahkainen	8 250	5 636	10 000	6 500	3 250	3 250	3 250	6 600	3 250
Vesijättömaa	5 000	3 682	6 000	4 286	2 143	2 143	2 143	4 000	2 143
<i>Räme</i>									
Letto, Lhtk	3 000	3 000	4 800	6 000	4 800	4 800	4 800	2 400	4 800
Ruohoinen, Rhtkg	4 428	5 000	5 886	7 412	5 886	5 886	5 886	3 437	5 886
Suursarainen, Mtkg	7 245	7 394	9 600	12 104	9 600	9 600	9 600	5 972	9 600
Piensarinen, Ptkg	5 498	12 708	11 355	14 204	7 097	7 097	7 097	4 542	7 097
Tupasvilla, Vtkg	4 447	10 471	9 350	11 731	5 844	5 844	5 844	3 530	5 844
Rahkainen	4 017	7 765	7 850	8 323	4 162	4 162	4 162	3 072	4 162
Vesijättömaa	2 900	4 824	4 700	5 226	2 613	2 613	2 613	2 320	2 613

Puulajit: 1 mänty, 2 kuusi, 3 rauduskoivu, 4 hieskoivu, 5 haapa, 6 harmaaleppä, 7 tervaleppä, 8 muu lehtipuu, 9 muu havupuu

Lyhenteet: Lhtk lehtokorpi, Rhtkg ruohoturvekangas, Mtkg mustikkaturvekangas, Ptkg puolukaturvekangas, Vtkg varputurvekangas

**Taulukko 1B.** Taimimäärät viljellen uudistettaessa kasvupaikan ja pääpuulajin (1–9) mukaan.

<b>Viljelty</b>	<b>Pääpuulaji</b>								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Kangas</b>									
Lehto	5 772	8 021	3 124	4 722	3 200	3 200	3 200	3 197	3 200
Lehtomainen	8 891	8 444	7 341	8 267	6 600	6 600	6 600	8 778	6 600
Tuore	7 795	9 038	8 320	10 991	8 266	8 266	8 266	7 611	8 266
Kuivahko	6 490	7 000	7 083	8 900	4 450	4 450	4 450	6 503	4 450
Kuiva	4 519	5 591	5 917	7 200	3 600	3 600	3 600	5 208	3 600
Karu	3 545	4 409	4 625	5 400	2 700	2 700	2 700	4 000	2 700
Kalliomaa	2 976	3 128	3 292	3 650	1 825	1 825	1 825	2 708	1 825
Lakimetsä	2 000	2 000	2 000	2 000	1 000	1 000	1 000	1 500	1 000
<b>Korpi</b>									
Letto, Lhtk	8 604	2 926	1 588	1 806	1 334	1 334	1 334	3 000	1 334
Ruohoinen, Rhtkg	12 232	8 611	7 452	9 701	10 400	10 400	10 400	12 967	10 400
Suursarainen, Mtkg	14 132	9 438	6 664	8 667	6 934	6 934	6 934	9 400	6 934
Piensarinen, Ptkg	15 233	8 000	5 645	7 063	3 532	3 532	3 532	8 300	3 532
Tupasvilla, Vtkg	11 461	6 500	4 774	5 750	2 875	2 875	2 875	7 000	2 875
Rahkainen, Rhtkg	8 308	5 000	3 806	4 500	2 250	2 250	2 250	5 600	2 250
Vesijättömaa	5 154	3 500	2 903	3 250	1 625	1 625	2 625	4 250	1 625
<b>Räme</b>									
Letto, Lhtk	3 000	3 000	1 600	1 667	1 334	1 334	1 334	3 000	1 334
Ruohoinen, Rhtkg	8 188	8 224	6 333	13 000	10 400	10 400	10 400	10 000	10 400
Suursarainen, Mtkg	13 233	7 333	6 500	8 667	6 934	6 934	6 934	9 400	6 934
Piensarinen, Ptkg	10 444	6 417	5 645	7 063	3 532	3 532	3 532	8 300	3 532
Tupasvilla, Vtkg	6 000	5 292	4 774	5 750	2 875	2 875	2 875	7 000	2 875
Rahkainen	4 438	4 167	3 839	4 500	2 250	2 250	2 250	5 600	2 250
Vesijättömaa	3 250	3 042	2 903	3 250	1 625	1 625	1 625	4 250	1 625

Puulajit: 1 mänty, 2 kuusi, 3 rauduskoivu, 4 hieskoivu, 5 haapa, 6 harmaaleppä, 7 tervaleppä, 8 muu lehtipuu, 9 muu havupuu

Lyhenteet: Lhtk lehtokorpi, Rhtkg ruohoturvekangas, Mtkg mustikkaturvekangas, Ptkg puolukaturvekangas, Vtkg varputurvekangas



## Liite 2

Varhaisperkauksen (VP 3–VP 5) ja taimikon harvennuksen (H 15) tai myöhästetyn perkauksen/harvennuksen (P/H 6) ajankohdan vaikutus taimikonhoidon kustannuksiin ja tuotokseen ensiharvennusvaiheessa MT istutusmännikön MOTTI-simuloinnissa.

Käsittely	VP 3	VP 4	VP 5	P/H 6	H 15
<b>Perkaus:</b>					
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	9 775	9 775	9 775		
Kantoläpimitta, cm	0,5	1,0	1,5		
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	4,3	5,1	6,0		
<b>Harvennus:</b>					
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	6 314	5 110	4 327	10 275	9 652
Kantoläpimitta, cm	5,1	4,8	4,5	2,0	6,6
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	12,0	10,1	8,7	7,2	17,3
<b>Kustannukset, €ha<sup>-1</sup></b>					
Perkaus	211,3	250,0	292,6	-	-
Taimikon harvennus	805,8	584,0	426,5	344,5	1 320
<i>Yhteensä</i>	<i>1 017,1</i>	<i>834</i>	<i>719,1</i>	<i>344,5</i>	<i>1 320</i>
<b>Tuotos, m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup></b>					
Hukkapuu	14,1	13,6	12,7	13,6	13,5
Kuitupuu	153,8	152,4	167,0	158,6	142,6
Sahatukki	10,8	15,5	14,1	16,6	2,5
<i>Yhteensä</i>	<i>178,7</i>	<i>181,5</i>	<b><i>193,8</i></b>	<i>188,8</i>	<i>158,6</i>

Laikkumätästetty uudistusala sijaitsee Akaassa (1234 °Cvrk). Taimikon alkutiheys muokkauksen jälkeen oli 12 275 ha<sup>-1</sup>. Varhaisperkauksessa jäävä runkoluku oli 2 500 ha<sup>-1</sup>. Harvennus/perkaus 6 vuotta viljelystä oli kustannuksiltaan ylivoimainen, koska MOTTI ei tuota uutta taimiainesta taimikon harvennuksen jälkeen. Perkauksen viivästyttäminen kolmesta vuodesta viiteen vuoteen oli niin tuotoksen kuin kustannusten kannalta edullisempi kuin aikaisemmat perkaukset. Myöhäinen (15 v) taimikon harvennus aiheutti suuret kustannukset ja tuotos oli pienin.

Taimikonhoidon kustannuksissa ei ole huomioitu mahdollisia tukia.

### Liite 3

Varhaisperkauksen (VP 3–VP 6) ja taimikon harvennuksen (H 15) tai myöhästetyn perkauksen/harvennuksen (P/H 7) ajankohdan vaikutus taimikonhoidon kustannuksiin ja tuotokseen ensiharvennusvaiheessa MT istutuskusikon MOTTI-simuloinnissa.

Käsittely	VP 3	VP 4	VP 5	VP 6	P/H 7	H 15
<b>Perkaus:</b>						
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	11 136	11 136	11 136	11 136		
Kantoläpimitta, cm	0,5	0,9	1,4	1,8		
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	4,5	5,4	6,2	7,1		
<b>Harvennus:</b>						
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	7 769	6 787	6 094	5 996	12 433	9 425
Kantoläpimitta, cm	2,1	1,8	1,5	1,1	2,3	5,6
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	8,0	6,7	5,7	5,0	8,8	16,9
<b>Kustannukset, €ha<sup>-1</sup></b>						
Perkaus	211,9	247,7	286,0	326,7	-	-
Taimikon harvennus	601,7	483,2	401,8	359,7	370,4	1 320,0
<i>Yhteensä</i>	<i>813,6</i>	<i>730,9</i>	<i>687,8</i>	<i>686,4</i>	<b>370,4</b>	<i>1 320</i>
<b>Tuotos, m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup></b>						
Hukkapuu	16,6	16,5	16,5	16,4	18,0	17,1
Kuitupuu	150,0	154,1	155,2	161,1	145,8	150,1
Sahatukki	45,4	44,8	46,4	44,2	54,0	30,8
<i>Yhteensä</i>	<i>212</i>	<i>215,4</i>	<i>218,1</i>	<b>221,7</b>	<i>217,8</i>	<i>198</i>

Laikkumätästetty uudistusala sijaitsee Akaassa. Taimikon alkutiheys muokkauksen jälkeen oli 14 232 ha<sup>-1</sup>. Varhaisperkauksessa jäävä runkoluku oli 3 096 ha<sup>-1</sup>. Varhaisperkauksen jälkeen kokonaisrunkoluvut olivat eri vaihtoehdoissa 10 733, 9 267, 8 304 ja 7 796 ha<sup>-1</sup>. Ensiharvennus 38 vuoden iällä.

Kuitupuu- ja kokonaistuotoksen kannalta varhaisperkausta kannatti viivästyttää 6 vuoteen istutuksesta. Talousvertailuissa harvennus/perkaus 7 vuotta viljelystä oli kustannuksiltaan ylivoimainen, koska MOTTI ei tuota uutta taimiainesta taimikon harvennuksen jälkeen. Toisaalta varhaisperkaus 5–6 vuoden kohdalla yhdessä taimikon harvennuksen kanssa oli edullisempi kuin aikaisemmat perkaukset. Myöhäinen (15 v) taimikon harvennus aiheutti suuret kustannukset ja tuotos oli pienin.

## Liite 4

Varhaisperkauksen (VP 4–VP 6) ja taimikon harvennuksen (H 15) tai myöhästetyn perkauksen/harvennuksen (P/H 7) ajankohdan vaikutus taimikonhoidon kustannuksiin ja tuotokseen ensiharvennusvaiheessa VT kylvömännikön MOTTI-simuloinnissa.

Käsittely	VP 4	VP 5	VP 6	P/H 7	H 15
<b>Perkaus:</b>					
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	7 883	7 883	7 883		
Kantoläpimitta, cm	0,68	1,0	1,4		
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	6,1	6,9	7,7		
<b>Harvennus:</b>					
Poistuma, ha <sup>-1</sup>	7 544	6 674	6 429	10 265	
Kantoläpimitta, cm	3,3	3,0	2,7	1,8	4,8
Ajanmenekki, h ha <sup>-1</sup>	12,2	10,3	9,3	9,9	31,8
<b>Kustannukset, €ha<sup>-1</sup></b>					
Perkaus	201,9	226,5	252,9	-	-
Taimikon harvennus	402,9	340,2	306,8	325,8	1 049,6
<i>Yhteensä</i>	<i>604,8</i>	<i>566,7</i>	<i>559,7</i>	<b>325,8</b>	<i>1 049,6</i>
<b>Tuotos, m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup></b>					
Hukkapuu	12,9	13,3	12,9	13,4	12,6
Kuitupuu	143,3	137,0	156,5	147,1	140,3
Sahatukki	11,6	12,4	9,4	13,8	9,7
<i>Yhteensä</i>	<i>167,8</i>	<i>162,7</i>	<b>178,8</b>	<i>174,3</i>	<i>162,6</i>

Kuivahkon kankaan (VT) kylvömännikön äestetty uudistusala sijaitsee Akaassa. Taimikon alkutiheys muokkauksen jälkeen oli 12 265 ha<sup>-1</sup>, josta kylvömäntyjä 4 000 ha<sup>-1</sup>. Varhaisperkauksessa jäävä runkoluku oli 4 383 ha<sup>-1</sup>. Kuitupuun tuotoksen ja taimikonhoidon kokonaiskustannusten kannalta varhaisperkauksen viivästyttäminen 6 vuoteen oli parempi vaihtoehto kuin aikaisemmat perkaukset. Tuotos on laskettu ensiharvennusvaiheeseen, joka oli 40 vuotta kylvöstä. Myöhäinen (15 v) taimikon harvennus aiheutti suurimmat kustannukset ja pienimmän tuotoksen.