



■ Matti Närhi



■ Matti Maltamo



■ Petteri Packalén



■ Heli Peltola



■ Janne Soimasuo

Matti Närhi, Matti Maltamo, Petteri Packalén, Heli Peltola ja Janne Soimasuo

Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmatietojen avulla

Närhi, M., Maltamo, M., Packalén, P., Peltola, H. & Soimasuo, J. 2008. Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmatietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2008: 5–15.

Taimikonhoidon tarve määritetään perinteisesti maastoinventoinnilla, joka on kuitenkin hidasta ja kallista. Viime aikoina onkin pohdittu mahdollisuutta hyödyntää kaukokartoitusmateriaaleja taimikonhoitotarpeen määrittämisessä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää laserkeilauksen soveltuvuutta varttuneiden kuusen taimikoiden inventointiin ja taimikonhoitotarpeen määrittämiseen. Tutkimuksessa hyödynnetty maastoaineisto mitattiin Pohjois-Savossa Sonkajärven kunnan alueella ja se koostui yhteensä 25 taimikosta inventoidusta 195 koealaryppästä. Kaukokartoitusmateriaalina käytettiin pistetiheydeltään 0,5 pulssia per neliometri olevaa laserpisteaineistoa.

Laserpisteaineiston tunnuksilla ja metsätaloussuunnitelmatiedoilla ennustettiin lineaarisilla sekamalleilla koealojen puustojen keskipituutta ja tiheyttä. Taimikonhoidon kiireellisyysluokitus tuotettiin sekä lineaarisella erotteluanalyysillä käyttäen selittäjinä suoraan lasertunnuksia että luokittelemalla, jolloin hyödynnettiin laadittuja malleja puuston tiheydestä ja pituudesta. Laskettuja estimaatteja verrattiin maastossa mitatuille koealoille tehtyyn taimikonhoidon kiireellisyysluokituksen virhematriisin avulla.

Taimikonhoidon kiireellisyysluokittelu onnistui hieman paremmin suoralla erotteluanalyysillä (oikeinluokitusprosentti 71,8 %) verrattuna sekamalleihin perustuvien puuston pituus- ja tiheysestimaattien käyttöön luokittelussa (oikeinluokitusprosentti 69,2 %). Tulokset antavat viitteitä siitä, että laserkeilausta voitaneen tulevaisuudessa hyödyntää myös varttuneiden taimikoiden inventointiin ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittämiseen.

Asiasanat: Lidar, *Picea abies*, varttuneet taimikot, toimenpidetarve, taimikot

Yhteystiedot: Närhi ja Soimasuo, Metsämannut Oy, PL 314, 33101 Tampere; Maltamo, Packalén ja Peltola, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Sähköposti matti.maltamo@joensuu.fi

Hyväksytty 5.12.2007

I Johdanto

Metsänuudistamisen tavoitteena on saada aikaan melinvoimainen, riittävän tiheä ja hyvälaatuinen ja kasvupaikalle kasvatettavaksi soveltuvista puulajeista koostuva taimikko sekä turvata sen kasvuedellytykset. Tämä metsänkasvatuksen yksi tärkeimmistä vaiheista määrää pitkälti metsikön kehityksen kiertoajan kuluessa. Toisaalta, metsän uudistamisen tuloksena syntyvän taimikon hoidosta on myös huolehdittava, jotta pystytään turvaamaan tuotantopuuston kasvuedellytykset ja hyvä laatukehitys sekä ensiharvennuksen kannattavuus. Uudistamisen onnistuminen ja taimikonhoidosta huolehtiminen turvaavat pitkällä aikavälillä metsien taloudellisen kestävyyden lisäksi myös metsien ekologisen ja sosiaalisen kestävyyden (Hyvän metsänhoidon... 2006).

Taimikonhoidontarpeen määrittämisen tueksi tarvitaan tietoja taimikon tiheydestä ja puulajisuhteista sekä tilajärjestyksestä. Taimikon inventoinnissa on perinteisesti käytetty muun muassa maastomittauksiin perustuvaa nollaruutumenetelmää ja sekvenssiotantaa (Kangas ym. 2003). Suurien metsäpintaalojen maastossa tehtävä inventointi on kuitenkin hidasta ja kallista, minkä vuoksi on viime aikoina selvitetty vaihtoehtoisten ja kustannustehokkaampien inventointimenetelmien käyttömahdollisuuksia. Esimerkiksi Pesonen ym. (2007) ovat tutkineet taimikonhoitotarpeen määrittämistä lehtipuuston osuuden perusteella alle 11 metriä valtipituutta edustavilla metsikkökuviolla muodostamalla karttata-son, jossa VMI:n maastokoealojen tiedot yhdistettiin Landsat TM -satelliittikuviin. Pesosen ym. (2007) maastoaineisto käsitti koealainventoinnin 83 kuviolta, minkä lisäksi aineistoa täydennettiin metsänhoitosuunnitelmien perusteella valituilla 42 hoitotarpeisella kuviolla. Taimikonhoitotarpeen kiireellisyyden oikeinluokitus onnistui Pesosen ym. (2007) mukaan kivennäismailla 62 prosenttisesti, sen sijaan turve- mailla tulos ei ollut yhtä hyvä. Ongelmia tuottivat myös joidenkin kuvioiden tiheä aluskasvusto ja reu- napuiden varjostus. Tätä menetelmää tutkittiin, jotta valtion myöntämiä nuoren metsän hoitoon tarkoitettuja varoja voitaisiin markkinoida nykyistä tehokkaammin metsänomistajille.

Vastaavasti Tuomola (2007) on selvittänyt numeeriselta ilmakuvulta irrotettavien sävy- ja tekstuuripiirteiden soveltamista havupuutaimikkokuvioiden

perkaustarpeen määrittämiseen (aineistona 25 taimikkokuviolta mitatut 65 ympyräkoelaa). Hän muodosti kuvapiirteistä sekä kuvapiirteiden ja metsikkötunnusten yhdistelmistä ensin taimikon puustotunnuksille lineaarisia regressiomalleja, joita sitten käytettiin logistisissa regressiomalleissa taimikon perkaustarpeen ennustamiseen. Tuomolan (2007) mukaan lähestymistapa, jossa käytetään yhdessä numeerisilta ilmakuvilta irrotettavia kuvapiirteitä ja metsäsuunnittelutietoja taimikon ominaisuuksien estimointiin ja edelleen perkaustarpeen määrittämiseen, ei näyttäisi toimivan riittävän hyvin taimikonhoidon ajankohdan määrittämiseen. Toisaalta menetelmä, jossa yhdistetään ilmakuva- ja laserkeilausaineistoa saattaisi Tuomolan (2007) mukaan olla varteenotettava lähestymistapa taimikon perkaustarpeen estimoimiseksi.

Verrattuna perinteisiin optisiin kaukokartoitusmenetelmiin, laserkeilaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jota tehdään yleensä lentokoneesta tai helikopterista käsin. Se perustuu laserkeilaimen lähettämiin valopulsseihin, jotka mittaavat etäisyyden kohteeseen ajassa. Koska valon nopeus, laserkeilaimen tarkka paikka ja pulssin lähetysuunta tunnetaan jokaiselle pulssille, voidaan määrittää koordinaatti (XYZ), jossa pulssi kohtaa maan pinnan tai esimerkiksi puun latvuksen. Metsien kartoituksessa ollaan yleensä kiinnostuneita pulssien korkeuksista suhteessa maanpinnan tasoon. Tällöin ensimmäinen vaihe on muodostaa laseraineistosta maanpinnan korkeusmalli (DTM, Digital Terrain Model) joka vähennetään alkuperäisistä ellipsoidi- tai ortometrisistä korkeuksista. Maanpinnan tasoon suhteutetut korkeus- ja tiheyshavainnot mahdollistavat metsikön puustotunnusten ennustamisen.

Inventointitiedon tuottamismenetelmät laserkeilainaineistosta voidaan jakaa kahteen lähestymistapaan: aluepohjaiset menetelmät ja yksinpuintulkinta. Aluepohjaisessa tulkinnassa käytetään laserpisteiden korkeus- ja tiheysjakaumia ennustamaan puustotunnuksia koeala-, mikrokuvio- tai kuvio- tasolla. Yksinpuintulkinnassa taas pyritään tunnistamaan yksittäiset puut hahmontunnistuksella, ennustamaan puutason tunnuksot jokaiselle puulle ja lopuksi koostamaan metsikkö yksittäisistä puista. Aluetason tulkinta edellyttää regressiomallien tai vaihtoehtoisesti ei-parametristen menetelmien hyödyntämistä. Regressiotekniikkaa laserkeilauk-

sen metsäsovelluksissa on eniten käytetty ja tutkittu Norjassa (Næsset ja Bjerknæs 2001, Næsset 2004, Næsset ym. 2004). Suomessa on puolestaan käytetty niin regressiotekniikkaa kuin myös ei-parametrisia malleja (Suvanto ym. 2005, Maltamo ym. 2006, 2007, Packalén ja Maltamo 2006, 2007). Aluepohjaisten lasertulkintamenetelmien eräs vahvuus on se, että käyttö ei vaadi kovinkaan tiheää laserpisteaineistoa, vaan esimerkiksi alle yksi pulssi neliometrille riittää (Næsset 2004, Suvanto ym. 2005). Tämän vuoksi regressiomenetelmä on operatiiviseen käyttöön toistaiseksi halvempi kuin tiheän laserpulsitiheyden vaativa yksinpuintulkinta (esim. Maltamo ym. 2004). Yksinpuintulkinta ei myöskään ainakaan vielä onnistune nuorissa ja käsittelemättömissä metsissä, joissa tiheydet ovat suuria ja puut yleensä pienikokoisia.

Viimeisen 10–15 vuoden aikana on tehty useita laserkeilaukseen perustuvia inventointeja nuorten ja varttuneiden kasvatusmetsien (valtapituus > 10 m) puustotunnusten ennustamiseksi. Næssetin ja Bjerknæs (2001) Norjassa tehdyssä tutkimuksessa on saatu lupaavia tuloksia myös taimikoiden (joissa valtapituus < 6 m) tiheyden ja puuston pituuden määrittämisestä laserkeilauksen avulla. Suomessa tähänastiset laserkeilauksinventoinnit on tehty lähinnä tutkimuskäyttöä varten, kun taas Norjassa käytännön metsäinventointeja on tehty laserkeilauksen avulla jo vuodesta 2002 lähtien (Næsset ym. 2004).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää miten luotettavasti laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmätietojen avulla on mahdollista määrittää varttuneissa kuusen taimikoissa (puuston valtapituuden ollessa 2–8 metriä) puuston pituus ja tiheys sekä voidaanko niiden avulla määrittää riittävän luotettavasti taimikonhoitotarve ja sen kiireellisyys. Taimikon tiheyden ja puuston pituuden määrittämiseen käytetään sekamalleja ja taimikonhoitotarpeen kiireellisyysluokitus tehdään joko suoraan laserpisteaineiston ja metsäsuunnitelmätietojen avulla erotteluanalyysillä tai laadittujen sekamallien perusteella lasketuilla puustotunnusestimaateilla. Taimikonhoitotarpeen kiireellisyys määritellään kolmeportaisella luokituksella (heti, 5 vuoden kuluessa ja ei hoitotarvetta) riippuen taimikon tiheydestä ja puuston pituudesta.

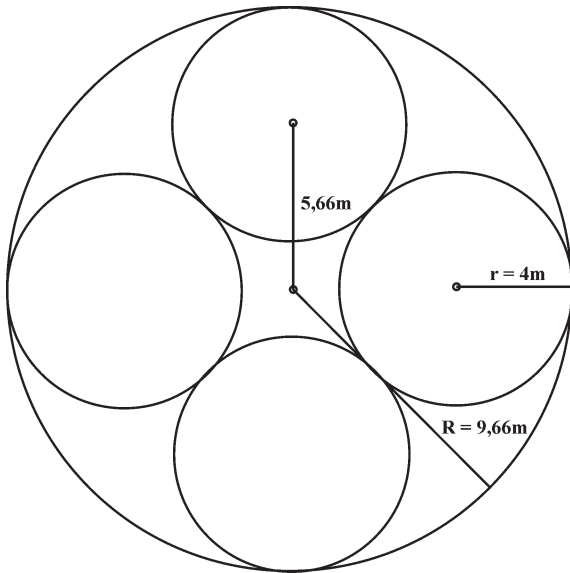
2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusaineiston maastoinventointi ja laserkeilaus

Tutkimuksen maastoaineisto sijaitsi Metsämännut Oy:n hallinnoiman Suomen metsäsijoitus Oy:n ja Metsähallituksen omistamilla mailla Pohjois-Savossa Sonkajärven kunnan alueella. Maastokoealojen mittaukset suoritettiin heinä- ja elokuussa 2006. Tutkimusaineistoon otettiin mukaan ne taimikot, joiden pääpuulaji oli kuusi, kasvupaikka vähintään tuore kangas ja valtapituus yli kaksi metriä. Valtapituudeltaan alle kahden metrin taimikoita ei sisällytetty tutkimukseen sen vuoksi, että laserkeilauksessa maanpinnan tausta- ja pensaskerroksen heijastukset heikentävät tulosten luotettavuutta tätä lyhyemmillä puuston pituuksilla (Næsset 2004). Kuviotietokantatiedoista hyödynnettiin olemassa olevaa tietoa taimikonperustamisvuodesta (taimikon ikä) sekä tehdyistä maanmuokkaus- ja hoitotoimenpiteistä.

Koelaryypät pyrittiin sijoittamaan kullekin kuviolle mahdollisimman kattavasti. Kaiken kaikkiaan mitattiin 25 taimikkoa, joille tuli yhteensä 212 koelaryyvää. Alle yhden hehtaarin kuviolle sijoitettiin neljä kappaletta ryväskoaloja. Vastaavasti 1–3 hehtaarin kuviolle sijoitettiin kahdeksan ja yli kolmen hehtaarin kuviolle 12 koelaryyvää. Koalojen väliset etäisyydet määritettiin siten, että koalaverkosta tuli mahdollisimman tasainen. Taimikoiden väliset koalaetäisyydet voivat siis vaihdella, mutta yhden taimikon sisällä koalavälit pidettiin yhtä suurina.

Kukin koelaryvä (pinta-ala 201 m²) muodostui neljästä pienemmästä ympyräkoelasta, säteen ollessa neljä metriä ja koalan pinta-alan ollessa noin 50 m² (kuva 1). Koelaryypään muoto valittiin sen mukaan, että yksi henkilö pystyi sen metsässä mittaamaan. Koelaryypään ympyräkoalojen keskipisteet sijoitettiin pääilmansuuntien (pohjoinen, itä, etelä ja länsi) mukaan 5,66 metrin päähän koelaryypään keskipisteestä, millä vältettiin mittausten päällekkäisyys ja saatiin mitattua ryvä suhteellisen kattavasti. Ympyräkoelalta luettiin 4 metrin säteeltä kaikki puut puulajeittain. Lisäksi mitattiin puiden pituus puulajeittain käyttäen 0,5 metrin pituusluokkia. Koelaryypään keskipiste määritettiin differentiaalikorjatulla GPS:llä, mikä mahdollisti mitattujen koalatulosten myöhemmän vertaami-



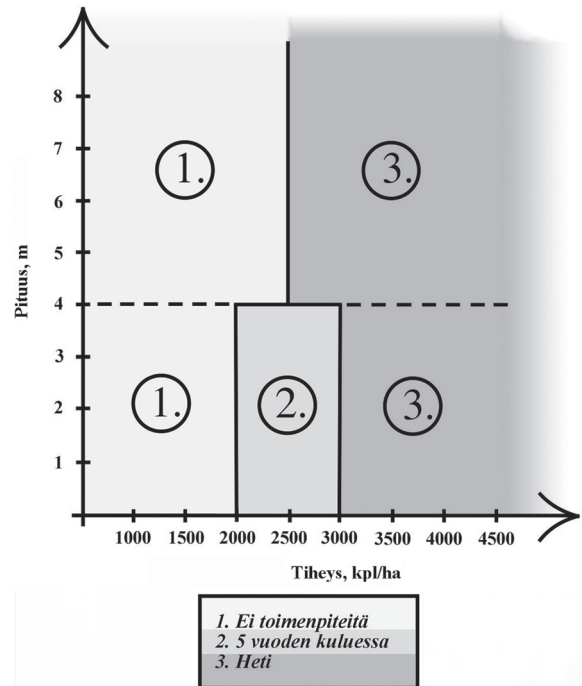
Kuva 1. Koealaryppään mittaamisperiaate.

sen laserkeilainaineistosta leikattuun saman paikan laserpisteaineistoon.

Kunkin koealaryppään neljän ympyräkoelalan mitatuista tunnuksista laskettiin keskiarvot, joiden oletettiin vastaavan yhdeksän metrin ympyräkoelalan tuloksia (taulukko 1). Näitä maastoaineistosta laskettuja keskitunnuksia tarvitaan regressiomalleilla estimoituihin tunnuksiin vertaamiseksi (taimikon tiheys ja puuston pituus).

Maastoaineiston perusteella laadittiin kolmiportainen taimikonhoidon kiireellisyysluokitus, johon eri luokittelumenetelmien vastaavia tuloksia verrataan (kuva 2). Kuusen taimikon puuston keskipituuden ja tiheyden perusteella <4 m:n pituutta ja alle 2000 tainta/ha edustavilla taimikoilla ei katsottu olevan taimikonhoitotarvetta. Myöskään >4 m:n keskipituutta ja alle 2500 tainta/ha edustavat taimikot eivät edellyttäneet taimikonhoitoa. Sen sijaan alle 4 m:n pituiset ja 2000–3000 tainta/ha tiheyttä edustavilla taimikoilla taimikonhoitotarvetta esiintyi seuraavan viiden vuoden kuluessa. Vastaavasti taimikon keskipituuden ollessa <4 m ja tiheyden ollessa >3000 tainta/ha tai pituuden ollessa >4 m ja tiheyden >2500 tainta/ha oli taimikonhoitotarve luokiteltu kiireelliseksi.

Laserkeilauksen suoritti Blom Kartta Oy 27.7.2006 Optech ALTM3100 -laserkeilaimella. Laserkeilauk-



Kuva 2. Taimikonhoidon kiireellisyysluokat määritettiin kolmeen luokkaan taimikon tiheyden ja puuston keskipituuden mukaan: 1. Ei toimenpiteitä, 2. Taimikonhoidon tarve viiden vuoden kuluessa ja 3. Taimikonhoidon tarve kiireellinen (heti).

ssa käytettiin Piper Navajo -lentokonetta, jonka nopeus oli noin 75 m/s ja lentokorkeus keskimäärin 2300 metriä maanpinnan yläpuolella. Avauskulma nadiirista lentosuuntaa vastaan oli ± 17 astetta. Lentolinjojen väleiksi tuli maastossa 1070 metriä ja lentolinjojen keskinäisiksi sivupeitoiksi 24 prosenttia. Laserkeilaus suoritettiin harvapulssisella tiheydellä, jolloin laserpulsseja tuli noin 0,5 pulssia/m².

2.2 Laserpisteaineiston analysointi ja regressiomallien laadinta

Regressiotekniikan lähtökohtana on käyttää regressioyhtälöitä pinta-alaperusteisesti koealakohtaisten metsikkötunnusten ennustamiseen. Yleisimmät laserpisteaineiston regressiopohjaisessa laskennassa käytetyt puustoa kuvaavat tunnuksien arvot ovat laserpisteiden korkeusjakauman prosenttipisteet, joiden avulla pyritään kuvaamaan mitattavan alueen puuston

Taulukko I. Taimikkoaineiston keskitunnukset ja niiden vaihteluvälit eri tavoin muokatuilla (maanmuokkaus: laikutus/äestys, mätästys ja auraus) ja hoidetuilla (ei käsitelty, perattu, harvennettu) koealoilla. Lisäksi taulukossa on esitetty taimikoiden lukumäärä eri tiheysluokissa sekä pelkän kuusen että kaikkien puulajien osalta.

Hoitotoimenpide	Puulaji	Keskitiheys (tainta/ha)	Tiheysvaihtelu (tainta/ha)	Keskipituus (m)	Pituusvaihtelu (m)	Taimikon tiheys, tainta/ha		
						<1500	1500–2000	>2000
Laikutus/äestys								
Ei käsitelty (7 koealaa)	Kuusi	1750±171	1600–2100	3,4±0,3	2,9–3,8		6	1
	Kaikki	3321±414	2700–3850	3,2±0,3	2,8–3,5			7
Mätästys								
Perattu (32 koealaa)	Kuusi	1656±362	900–2700	3,9±1,1	2,4–6,1	8	20	4
	Kaikki	5811±4245	2100–19500	3,2±0,8	2,0–5,5			32
Harvennettu (4 koealaa)	Kuusi	1975±156	1800–2150	3,4±0,4	2,9–3,8		2	2
	Kaikki	2113±206	1850–2300	3,4±0,4	2,8–3,6		1	3
Auraus								
Ei käsitelty (44 koealaa)	Kuusi	1581±402	700–2500	5,1±1,3	2,6–7,6	16	20	8
	Kaikki	3728±1508	1800–7650	4,9±1,2	3,1–7,6		1	43
Perattu (88 koealaa)	Kuusi	1597±384	450–2300	4,6±1,1	2,6–7,9	26	48	14
	Kaikki	3969±2342	1400–12800	3,9±0,9	2,1–7,5	1	3	84
Harvennettu (20 koealaa)	Kuusi	1358±447	300–2250	4,4±1,1	2,1–5,9	14	4	2
	Kaikki	2270±370	1650–3400	4,5±1,0	3,0–6,0			20
Yhteensä								
(195 koealaa)	Kuusi	1592±392	300–2700	4,5±1,2	2,1–7,9	64	100	31
	Kaikki	3982±2611	1400–19500	4,0±1,1	2,0–7,6	1	5	189

rakennetta ja kokoa. Tässä työssä prosenttipisteiksi valittiin 5, 10, 20, ..., 90 ja 95 prosentin korkeudet ($h_{5...95}$) ja tiheydet ($p_{5...95}$). Koska maaston epätasaisuudesta ja pintakasvillisuudesta voi aiheutua virhepulsseja (Næsset 2004), asetettiin laserpisteille 0,3 metrin korkeusrajoite, jonka yläpuolelle osuneet pisteet tulkittiin puustoon osuneiksi pisteiksi. Tämän perusteella voitiin määrittää kasvillisuusosuus (*veg*), joka laskettiin jakamalla kaikkien yli korkeusrajoitteen yläpuoliselle korkeudelle osuneiden laserpulssien lukumäärä koko koealalle osuneiden laserpulssien kokonaismäärällä (Næsset 2004). Kasvillisuusosuudella pyritään kuvaamaan taimikon suhteellista tiheyttä: mitä suurempi on kasvillisuusosuus, sitä tiheämpää on taimikko. Lisäksi laskettiin korkeusrajoitteen yläpuolisten laserpisteiden korkeuksien keskiarvo (*ave*) ja keskihajonta (*std*). Kaikki tunnukset laskettiin erikseen sekä ensimmäisen (*f*) että viimeisen (*l*) kaiun havainnoille ja niitä käytettiin selittävinä muuttujina sekä puustotunnusten regressiomalleissa (puuston keskipituus tai tiheys) että erotteluanalyyseissä.

Maastossa mitatuista 212 koealarypäästä vain 195

koealarypään tiedot soveltuivat lopulta hyödynnettäväksi, sillä 17 koealarypääseen oli tallentunut liian alhainen määrä korkeusrajoitteen ylittäviä paluupulsseja (minimirajoite 20 pulssia/koeala). Laserpisteaineistosta rajattiin yhdeksän metrin säteiset ympyräkoalat jotka vastasivat sijainniltaan maastossa mitattuja koealoja.

Koska regressiomallien laadinta-aineistossa oli hierarkkinen rakenne, eli yksittäiseltä taimikkokuviolta oli mitattu useita koealoja, koealakohtaisten tulosten laskentaa varten laadittiin ns. sekamalleja, joita kutsutaan myös varianssikomponenttimalleiksi. Sekamalli ottaa huomioon mallin muuttujissa tapahtuvan koeala- ja kuviotason vaihtelun ja jakaa vaihtelun kahteen erilliseen varianssikomponenttiin (Lappi 1993, Kangas 2001), ja voidaan esittää muodossa:

$$y_{ki} = \mu + b_k + \varepsilon_{ki} \quad (1)$$

missä alaindeksi *k* viittaa luokkaan eli tässä tapauksessa taimikkoon ja alaindeksi *i* liittyy luokan sisällä olevaan yksittäiseen havaintoyksikköön, eli

taimikossa olevaan koelaan. Mallin termi b_k on kuvion satunnaisvaikutus; $E(b_k)=0$ ja $\text{var}(b_k)=\delta_b^2$. Vastaavasti ε_{ki} on kuviolla olevan koelan satunnaisvaikutus; $E(\varepsilon_{ki})=0$ ja $\text{var}(\varepsilon_{ki})=\delta_\varepsilon^2$. Mallin (1) termi μ on kiinteä ja kuvaa populaatiosta laskettua odotusarvoa. Mikäli odotusarvo tuotetaan joidenkin selittävien muuttujien funktioina, μ vastaa tavallisen regressiomallin kiinteää osaa (Kangas 2001). Laserpisteaineiston tunnusten lisäksi malleissa oletettiin, että kuvion historiatiedoista käytettävissä ovat taimikonperustamisvuosi (taimikon ikä) ja mahdolliset maanmuokkaus- ja hoitotoimenpiteet. Ennen sekamallien laadintaa tehtiin selittävien muuttujien valinta lineaarisella regressiolla käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää.

Laadittujen regressiomallien hyvyyden arviointiin käytettiin mallin keskivirhettä (RMSE) ja harhaa (b):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (3)$$

Keskivirheestä ja harhasta laskettiin myös suhteelliset virheet, jolloin perusmuodossa saatu tulos jaettiin havaitulla vastemuuttujan y keskiarvolla.

2.3 Taimikonhoidon kiireellisyysluokitus

Taimikonhoidon kiireellisyysluokitus määritettiin kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisessä menetelmässä luokat määritettiin laserpisteaineistosta erotteluanalyysin avulla (ks. Tabachnick ja Fidell 1989). Toisessa menetelmässä sekamalleilla ennustettuja puuston keskipituutta ja tiheyttä käytettiin kiireellisyysluokkien määrittämiseen. Molemmissa menetelmissä ennustettuja luokkia verrattiin maastossa määritettyihin kiireellisyysluokituksiin virhematriisien avulla. Erottelu- ja luokittelumenetelmässä pyrittiin erottefunktiolla luokittelemaan havainnot oikeisiin ryhmiin. Maastoinventoinnin perusteella tiedettiin ennalta, mihin ryhmään kunkin havainnon tulisi kuulua. Näiden tietojen perusteella laskettiin

kuinka monta prosenttia havainnoista sijoittui oikein. Mitä suurempi joukko havaintoja ennustettiin oikein, sitä parempi oli erottefunktiio. Taimikonhoidon kiireellisyysluokittelun selittäjinä toimivat sekä laserpisteaineisto että metsätaloussuunnitelman kuviotiedot.

Vertailujen tulokset koottiin virhematriisiin, jonka avulla laskettiin oikeinluokitusprosentti laskemalla yhteen matriisin lävistäjällä olevien alkioiden arvot ja jakamalla saatu tulos kaikkien alkioiden arvojen summalla:

$$\text{Oikeinluokitus} - \% = \frac{n.\text{oikein}}{n} \times 100 \quad (4)$$

missä $n.\text{oikein}$ on niiden koalojen määrä, joilla malleilla estimoitujen arvojen luokitus on sama kuin maastomittausten perusteella tehty luokitus ja n on kaikkien koalojen lukumäärä yhteensä. Oikeinluokitusprosentin lisäksi luokituksen onnistumista kuvaamaan laskettiin myös kappa-arvo (kaava 5), joka ottaa huomioon lävistäjälukujen lisäksi myös rivin ja sarakesummat (Kangas ym. 2003):

$$\hat{\kappa} = \frac{n \times \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (5)$$

missä r on virhematriisin rivien ja sarakkeiden lukumäärä, x_{i+} on rivisumma rivillä i , x_{+i} on sarakesumma rivillä i , n on havaintojen lukumäärä ja x_{ii} on havaintojen lukumäärä rivillä i ja sarakkeella i .

Kappa-arvon ollessa lähellä nollaa ei luokitus ole paljoa parempi kuin satunnainen luokitus, kun taas jos arvo on taas lähellä ykköstä, kertoo se luokituksen onnistuneen hyvin. Landis ja Kochin (1977) mukaan luokituksen voi katsoa onnistuneeksi hyvin jos kappa-arvo on yli 0,4. Vastaavasti jos kappa-arvo on yli 0,75, luokitus on onnistunut erinomaisesti.

3 Tulokset

3.1 Laserpisteaineistoon ja metsätaloussuunnitelmatietoon perustuvat sekamallit

Kun taimitiheydelle laadittiin mallit sekä pelkkien laserpisteiden (kaava 6) että laserpisteiden ja metsätaloussuunnitelmatietojen pohjalta (kaava 7), selittäväksi muuttujaksi metsätaloussuunnitelmatiedoista tuli ainoastaan ikä.

$$\ln(\text{tiheys}) = 10,183 + 0,018 \times \text{lveg} + 0,332 \times \ln _h_{90} - 0,046 \times f_p_{30} - 0,391 \times f_h_{20} + \delta^2/2 \quad (6)$$

$$\ln(\text{tiheys}) = 10,389 + 0,021 \times \text{lveg} + 0,604 \times \ln _ikä - 0,216 \times f_h_{60} - 1,089 \times \ln f_p_{20} + \delta^2/2 \quad (7)$$

Koska logaritmisilla muuttujilla lasketut tunnuksset, kuten RMSE, eivät sellaisenaan kerro mallin hyvyydestä, ennustetut arvot oli palautettava ennen vertaamista mitattuun arvoon. Luonnollisen logaritminmuunnoksen takia mallien käytössä oli otettava huomioon myös harhattomuuskorjaukset. Kaavassa 6 esitetyn mallin virhetermit olivat (δ_b^2) 0,04419 ja (δ_ε^2) 0,06790 joten harhattomuuskorjaus oli $\delta^2 = 0,05951$. Vastaavasti kaavassa 7 esitetyn mallin virhetermit olivat (δ_b^2) 0,05498 ja (δ_ε^2) 0,06404 ja harhattomuuskorjaus oli $\delta^2 = 0,056045$. Molempien tiheysmallien residuaalien kuvaajat olivat myös symmetrisiä ja arvot tasaisesti nollan molemmilla puolilla.

Kuten taimikon tiheydelle, myös koealojen puustojen keskipituudelle oli tarkoitus laatia mallit sekä pelkän laserpisteaineiston (kaava 8) että laserpisteiden ja metsätaloussuunnitelman pohjalta. Yksikään metsätaloussuunnitelmatiedoista ei kuitenkaan tullut merkittäväksi selittäjäksi.

$$\ln(\text{pituus}) = 0,996 + 0,112 \times f_h_{40} + 0,159 \times \ln _h_{20} + \delta^2/2 \quad (8)$$

Pituusmallin (kaava 8) virhetermit olivat (δ_b^2) 0,010 ja (δ_ε^2) 0,011 ja harhattomuuskorjaus $\delta^2 = 0,0105$. Myös pituusmallin residuaaliarvot olivat tasaisesti nollan molemmiin puolin.

Maastossa mitatun ja mallilla ennustetun puuston keskipituuden välinen keskivirhe oli 0,63 metriä ja suhteellinen keskivirhe 15,9 prosenttia (taulukko 2).

Taulukko 2. Koealakohtaisten tulosten laskennassa käytettyjen regressiomallien luotettavuustunnukset. Maastoaineiston puuston keskipituus oli 4,0 m ja puuston keskimääräinen tiheys 3 982 tainta/ha.

Muuttujat	Malliennusteen keskiarvo	RMSE (yks.)	RMSE (%)	Harha (yks.)	Harha (%)
Pituus (m)	3,98	0,63	15,93	0,04	1,03
Tiheys (tainta/ha), laser	3941	1782	45,20	40,28	1,01
Tiheys (tainta/ha), laser + suunnitelma	4038	1608	39,83	-56,45	-1,42

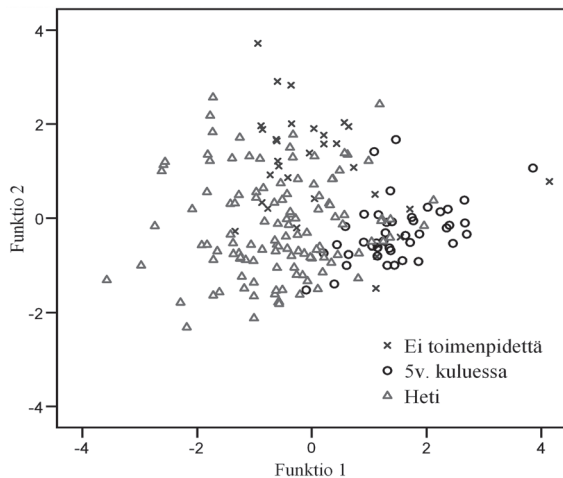
Puuston pituuden malli oli lähes harhaton. Kun taimitiheyden selittäjinä käytettiin pelkästään laserpisteitä, mitatun ja ennustetun tiheyden suhteellinen keskivirhe oli noin 45,2 prosenttia. Vastaavasti kun mallin selittäjiksi otettiin myös metsätaloussuunnitelmatiedoista ikä, suhteellinen keskivirhe oli 39,2 prosenttia. Molemmat tiheysmallit olivat myös lähes harhattomia.

3.2 Erottelumenetelmän ja regressiomalleilla ennustettujen tunnusten perusteella lasketut luokitustulokset

Taulukossa 3 on esitelty paras erotteluanalyysin luokitustulos, missä selitettävänä luokkina käytettiin kuvassa 2 esitettyjä luokkia ja selittävinä tunnuksina toimivat koealojen laserpisteaineiston tunnuksset ja

Taulukko 3. Erotteluanalyysin absoluuttiset ja suhteelliset (%) luokitustulokset virhematriisissa. Taulukon lävistäjärivillä on esitetty oikeinluokittuneiden koealojen lukumäärä ja niiden %-osuudet.

Maastoinventointiluokka	Ennustettu luokitus, lkm ja %			
	Ei toimenpidettä	5 v:n kuluessa	Heti	Yhteensä
Lkm				
Ei toimenpidettä	21	8	4	33
5 v:n kuluessa	2	36	4	42
Heti	24	13	83	120
%				
Ei toimenpidettä	63,6	24,2	12,1	100
5 v:n kuluessa	4,8	85,7	9,5	100
Heti	20	10,8	69,2	100



Kuva 3. Taimikonhoidon kiireellisyyden erottelufunktiot.

metsätaloussuunnitelmatiedot. Koealoilla, joille ei maastoinventoinnin perusteella suunniteltu tehtäväksi taimikonhoitoa lainkaan, luokitui oikein 63,6 prosenttia ja virheellisesti 24,2 prosenttia ”5 v:n kuluessa” -luokkaan ja 12,1 prosenttia ”Heti”-luokkaan. Koealoista, joille suositellaan taimikonhoitoa viiden vuoden kuluessa, luokitui oikein 85,7 prosenttia, kun taas koealoilla, joilla suositeltiin heti taimikonhoitoa, luokitui oikein 69,2 prosenttia koealoista. Sen sijaan koealoista ”Ei toimenpidettä” -luokkaan luokitui virheellisesti 20 prosenttia. Koska taimikonhoidon kiireellisyysluokkia oli kolme, niiden luokittamiseen sekä luokkakeskusten paikan määrittämiseen käytettiin kahta erottelufunktiota; parhaiden erottelufunktioiden luokitus tulos ja luokkakeskusten sijainti on esitetty kuvassa 3.

Taimikon tiheydelle ja puuston keskipituudelle ennustettujen tunnusten perusteella tehtiin uusi taimikonhoidon kiireellisyysluokitus, jonka luotettavuutta arvioitiin vertaamalla regressiomalleilla esimoitujen taimikkokoealojen tiheyden ja puuston keskipituuden mukaan luokitettuja tuloksia maastomittausten pohjalta tehtyihin luokituksiin taimikonhoidon kiireellisyydestä. Koealoista, jotka eivät tarvitse taimikonhoitotoimenpiteitä luokitui oikein vain 6,1 prosenttia, kun virheellisesti luokasta luokitui ”5 v:n kuluessa” -luokkaan 15,2 prosenttia ja ”Heti”-luokkaan jopa 78,8 prosenttia (taulukko 4). Koealoilla, joilla taimikonhoito olisi ollut todelli-

Taulukko 4. Regressiomalleilla ennustettujen tunnusten avulla määritettyjen luokkien absoluuttiset ja suhteelliset (%) luokitus tulokset Taulukon lävistäjärivillä on esitetty oikeinluokituneiden koealojen lukumäärä ja niiden %-osuudet.

Maastoinventointiluokka	Ennustettu luokitus, lkm ja %			Yhteensä
	Ei toimenpidettä	5 v:n kuluessa	Heti	
Lkm				
Ei toimenpidettä	2	5	26	33
5 v:n kuluessa	3	21	18	42
Heti	1	7	112	120
%				
Ei toimenpidettä	6,1	15,2	78,8	100,0
5 v:n kuluessa	7,1	50,0	43,9	100,0
Heti	0,8	5,8	93,3	100,0

suudessa syytä tehdä viiden vuoden kuluessa, luokitui oikein puolet, mutta virheellisesti 43,9 prosenttia luokkaan ”Heti”. Sen sijaan koealat, joilla taimikonhoito olisi tarpeellinen heti, luokitui oikein 93,3 prosenttisesti. Erotteluanalyysin oikeinluokitusprosentit ja kappa-arvot olivat 71,8 prosenttia ja 0,54. Regressiomalleilla esimoitujen tunnusten perusteella tehdyn luokituksen oikeinluokitusprosentti oli puolestaan 69,2 ja kappa-arvo 0,34.

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin harvapulssisella laserkeilausaineistolla pystytään tuottamaan inventointitietoa varttuneista kuusentaimikoista (puuston pituusvaihtelu 2–8 m) ja pystytäänkö näille taimikoille määrittämään taimikonhoidon kiireellisyys luotettavasti. Puuston pitiuden ja tiheyden ennustaminen malleilla antoi samansuuntaisia tuloksia kuin ainoa aiemmin aiheesta tehty tutkimus (Næsset ja Bjerknes 2001), jossa tutkittiin pituudeltaan < 6 m:n taimikoiden puuston pitiuden ja tiheyden ennustamista noin yhden pulssin per neliometri sisältävästä laseraineistosta muodostetuilla regressiomalleilla. Heidän tutkimuksessaan puuston pitiuden suhteellinen keskivirhe oli 15 pro-

senttia ja tiheyden noin 29 prosenttia. Tässä tutkimuksessa puuston keskipituuden suhteellinen keskivirhe oli 15,9 prosenttia, kun vastaavasti mallilla ennustetun puuston tiheyden suhteellinen keskivirhe oli noin 40 prosenttia käytettäessä tiheysmallissa laserpisteaineiston lisäksi metsäsuunnitelmätiedoista selittävänä muuttujana taimikon ikää. Toisaalta, kun puuston tiheyttä mallinnettiin pelkkien laserpisteaineiston selittäville muuttujilla, tiheyden suhteellinen keskivirhe nousi hieman (45,2 prosenttiin).

Vertailtaessa tämän työn tuloksia Næssetin ja Bjerknesein (2001) tutkimukseen ainoana suurehkona erona on tässä työssä saatu suurempi taimikotiheyden keskivirhe, mitä voi tosin selittää ainakin osittain eri tutkimuksissa inventoitujen taimikoiden puuston pituus- ym. erot (esim. tässä tutkimuksessa taimikon valtipituus < 8 m ja Næsset ja Bjerknesein (2001) < 6 m). Laserkeilaus oli heidän tutkimuksessaan tehty myös hieman tiheämpää pulssia käyttäen (yksi pulssi per neliometri) kuin tässä tutkimuksessa (0,5 pulssia per neliometri).

Tarkasteltaessa oikeinluokitusprosentteja ja kappa-arvoja voidaan todeta, että erotteluanalyysillä kyettiin luokittelemaan alkuperäiset taimikonhoitokiireellisyysluokat oikein jopa 71,8-prosenttisesti, jolloin kappa-arvoksi tuli 0,54. Jos pidetään $\kappa=0,4$ rajapyykkinä luokituksen onnistumiselle, voidaan todeta luokituksen onnistuneen hyvin. Taulukosta 3 nähdään, että parhaiten luokittuivat taimikot, joilla taimikonhoitotarve on lähimmän viiden vuoden kuluessa (85,7 prosenttia). Toiseksi parhaiten luokittuivat taimikot, joissa taimikonhoitotarve oli välitön (69,2 prosenttia). Nämä ovatkin tärkeimmät luokat ajateltaessa tulevan taimikon kehitystä, sillä ajallaan tehty taimikonhoito antaa parhaat edellytykset tuotantopuuston kehitykselle. Toisaalta, osa taimikoista joilla hoitotarvetta olisi ollut heti, oli luokitunutta 20 prosenttia luokkaan ei kiirettä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että luokituksen mukaan toimittuna 20 prosenttia kiireellistä taimikonhoitoa kaipaavista taimikoista jäisi kokonaan hoitamatta. Lisäksi taimikot, joilla ei havaittu toimenpidetarvetta, luokittuivat huonoiten (63,6 prosenttia). Toisaalta, pienempi kustannus syntyy siitä, kun käydään turhaan tarkastamassa taimikko, kuin siitä, että jätetään taimikonhoitoa kaipaava taimikko kokonaan hoitamatta.

Asettamalla maastossa mitatut alkuperäiset luokat ja laserpisteistä regressiomalleilla estimoitujen

tunnusten luokat virhematriisiin, voitiin tarkastella taimikonhoidon kiireellisyysluokituksen onnistumista. Maastoinventoinnin perusteella tehtyyn kiireellisyysluokituksen verrattuna estimoidun luokituksen oikeinluokitusprosentti oli 69,2, mitä voidaan pitää hyvänä. Kappa-arvo oli tosin vain 0,34, minkä mukaan luokitus onnistui satunnaiseen luokituksen verrattuna vain kohtalaisesti. Parhaiten luokitettiin tässäkin tapauksessa välitöntä taimikonhoitoa tarvitsevat koealat, eli jopa 93,3 prosenttia luokista luokitettiin oikein. Toisaalta, heikoiten luokitettiin koealat, joilla ei ollut taimikonhoitotarvetta (vain 6,1 prosenttia luokitettiin oikein), ja 78,8 prosenttia koealoista luokitettiin välittömästi taimikonhoitoa tarvitseviin. Virhematriisitarkastelun perusteella voidaan tehdä se johtopäätös, että regressiomalli tuotti yliarvioita taimikon tiheydelle mikä aiheutti sen, että osa taimikoista, joilla todellisuudessa taimikonhoitotarvetta ei ollut, luokitettiin virheellisesti taimikonhoitoa tarvitseviin. Kuitenkin tärkeimpänä luokittelun onnistumisen kriteerinä voitaneen pitää kiireellistä ja ylipäättänsä taimikonhoitoa tarvitsevien kohteiden tunnistamista, sillä työpanosten suunnittaminen sitä eniten tarvitseville kohteille parantaa kustannustehokkuutta metsien hoidossa.

Regressiomallien perusteella tehty taimikonhoidon kiireellisyysluokitus antoi hieman huonompia tuloksia kuin erotteluanalyysi. Tämä tulos oli toisaalta odotettavissa, sillä sekamallit ottavat huomioon aineiston hierarkkisyyden, mutta heikentävät hieman mallin selitysväkyä. Taimikon tiheyden regressiomalli tuotti myös yliarvioita pienillä tiheyksillä. Toisaalta erotteluanalyysin luokitusmenetelmät perustuvat regressiotekniikkaan, joka ei ota aineiston hierarkkisyyttä huomioon, mikä taas voi vääristää todellista tulosta. Kappa-arvoja vertailtaessa erottelumenetelmän luokitus toimi kuitenkin selvästi paremmin kuin regressiomallien avulla tehty luokitus. Regressiomalleilla saadut virhematriisien heikommat kappa-arvot selittyvät osin myös sillä, että sekamallien avulla estimoidut luokat antoivat yliarvioita tiheydelle suurilla puuston pituuksilla. Tämä johti siihen, että koealoja luokitettiin virheellisesti taimikonhoitoa tarvitseviin luokkiin. Tämän perusteella voidaan todeta, että taimikon tiheyksien sekamallit eivät ehkä sittenkään ole täysin luotettavia, vaikka mallien selitysväkyt olivat kohtalaisia ja mallit olivat lähes harhattomia.

Verrattaessa tämän tutkimuksen tuloksia Pesosen

ym. (2007) tutkimustuloksiin, jossa Landsat TM-satelliittikuvien perusteella luokiteltiin kivennäismaiden taimikonhoitotarvetta, voidaan todeta, että laserkeilausaineiston avulla saatu oikeinluokitusprosentti oli molemmilla menetelmillä hieman suurempi, kappa-arvo erotteluanalyysin tapauksessa samaa luokkaa mutta regressiomalleilla heikompi. Tuloksia verrattaessa täytyy kuitenkin muistaa, että tässä tutkimuksessa tarkastelutaso oli koeala ja Pesosen ym. (2007) tutkimuksessa kuvio.

Laserpisteaineistosta sekamalleilla ennustetut taimikon tiheys ja puuston keskipituus toteutuivat koealatasolla myös melko hyvin. Kuviotasolla laskettaessa vastaavat tulokset olisivat varmasti olleet vielä parempia, sillä kuviotasolla koealakohtaiset tulokset keskiarvoistuvat. Myös luokittelumenetelmän tuloksista voidaan päätellä, että laserpisteaineiston perusteella voidaan määrittää taimikonhoitotarvetta varsin hyvin. Toisaalta, tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin hyvä pitää mielessä, että laserpisteaineistosta leikatussa yhdeksän metrin säteen ympäräkoelalla, johon maastoaineistoa verrattiin, oli mukana mittaamatonta aluetta. Maastomittauksissa on siis otosvirhettä, mikä voi hieman vaikuttaa tuloksiin. Myöskään käytössä olleella paikannuslaitteella (differentiaali-GPS) ei päästä täysin virheettömään tarkkuuteen paikantamisen suhteen, mikä on myös yksi virhelähteistä. Ottaen huomioon käytetyn harvan laserpulsitiheyden, puiden pienen koon ja taimikoiden peitteisyyden sekä epätasaisuuden, tämän tutkimuksen tulosta voitaneen pitää hyvänä ja saatua tarkkuutta riittävänä taimikon inventointiin ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittämiseen.

Mallitusaineiston koealarypäistä 17 eli n. 8% jouduttiin hylkäämään liian vähäisen laserpisteaineiston takia. Toisaalta määrä on isohko, mutta toisaalta jos laserkeilausaineistosta lasketaan kuviokohtaisia tuloksia systemaattisen hilan (esim. Packalén ja Maltamo 2007) avulla, sattuu jo hehtaarin suuruiselle kuviolle 40 solua käytettäessä tämän tutkimuksen mallituskoelaa vastaavaa hilasolukokoa (16 m × 16 m). Jos näistä soluista joudutaan hylkäämään keskimäärin neljä kappaletta, jää kuviotason toimenpide-ehdotuksen estimointiin kuitenkin varsin paljon aineistoa. Toisaalta tulkinnassa olisi kuitenkin hyvä erottaa taimikossa esiintyvät puuttomat kohdat niistä soluista, joille tulkintaa ei voida tehdä vähäisen laserpistemäärän takia.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voitaneen olettaa, että laserkeilaus voisi tulevaisuudessa soveltua myös nuorten metsien inventointiin ja hoitotarpeen määrittämiseen, sillä ainakin varttuneissa kuusen taimikoissa puuston pituudet saadaan hyvin määritettyä laserkeilausaineiston avulla. Puuston tiheydenkin määrittämisessä saadaan suuntaa antavaa tietoa riittävästi, toisaalta tiheysmallien parantamiseksi tulisi vastaisuudessa testata erilaisia selittävien muuttujien yhdistämistä ja niiden variaatioita sekä erilaisia mallirakenteita.

Taimikoninventointiin ja taimikonhoidon kiireellisyyden luotettavaan määrittämiseen laserkeilausaineiston avulla tarvittaisiin tulevaisuudessa tueksi edelleen muulla menetelmällä tuotettua puulajikohtaista tietoa, sillä laserkeilauksen suurin tämän hetkinen ongelma on se, että eri puulajeja ei vielä pystytä tunnistamaan harvapulsista laserkeilausaineistoa hyödyntäen. Varsinkin lehtipuuston määrän luotettava ennustaminen olisi tärkeää määriteltäessä havupuuvaltisten taimikoiden hoitotarvetta, sillä etenkin kuusen taimikoissa nopeakasvuisempi lehtipuusto haittaa usein kuusen varhaiskehitystä. Ainakin siinä tapauksessa, ettei käytössä ole metsäsuunnitelmätietoja, joista käy ilmi kuvioiden puulajisuhteet, tarvitaan niiden selvittämiseksi muu ratkaisu, kuten ilmakuvioiden hyödyntäminen. Ilmakuvioiden avulla saadaan nuorissa metsissä puulajisuhteita eroteltua, mutta toisaalta taimien pituuksien ja taimikon tiheyksien määrittäminen tuottaa ongelmia.

Packalénin ja Maltamon (2006 ja 2007) ovat viime aikoina selvittäneet myös mahdollisuutta hyödyntää ilmakuviasta saatua spektristä informaatiota yhdistettynä laserkeilausaineistoon. Heidän mukaansa lehtipuuston osuus saatiin aineistosta eroteltua tällä menetelmällä, mikä tarkoittaa sitä että tämän kaltainen menetelmä voisi toimia myös tulevaisuudessa määrittäessä taimikoiden lehtipuuston osuuden avulla taimikonhoitotarvetta havupuuvaltaisessa taimikossa. Laserkeilauksen ja ilmakuvatulkinnan yhdistäminen nuorten metsien inventoinnissa (myös muut puulajit kuin kuusi) ja hoitotoimenpiteiden määrittämiseksi kaipaa kuitenkin edelleen jatkotutkimusta. Kuitenkaan taimikoiden, joiden pituus on alle 1,5 metriä, inventointiin ei laserkeilaus soveltune tulevaisuudessakaan, koska maanpinnan epätasaisuudet, kuten kivet ja kannot, aiheuttavat virhettä tätä pienemmällä puuston pituuksilla.

Kirjallisuus

- Hyvän metsänhoidon suositukset. 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 59 s.
- Kangas, A. 2001. Tilastollinen malli. Julkaisussa: Maltamo, M. & Laukkanen, S. (toim.). Metsää kuvaavat mallit. *Silva Carelica* 36. s. 1–29.
- , Päivinen, R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2003. Metsän mittaus ja kartoitus. 2. uudistettu painos. *Silva Carelica* 40. 228 s.
- Landis, R.J. & Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159–174.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Maltamo, M., Mustonen, K., Hyypä, J., Pitkänen, J. & Yu, X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791–1801.
- , Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006. Non-parametric estimation of stem volume using laser scanning, aerial photography and stand register data. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 426–436.
- , Korhonen, K.T., Packalén, P., Mehtätalo, L. & Suvanto A. 2007. A test on the usability of truncated angle count sample plots as ground truth in airborne laser scanning based forest inventory. *Forestry* 80: 73–81.
- Næsset, E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- & Bjercknes, K-O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing on Environment* 78: 328–340.
- , Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 428–499.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2006. Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. *Forest Science* 56: 611–622.
- & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method in the prediction of species specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109: 328–341.
- Pesonen, A., Korhonen, K.T., Tuominen, S., Maltamo, M. & Lukkarinen, E. 2007. Taimikonhoitotarpeen arviointi valtakunnan metsien inventoinnin metsävarakartan pohjalta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2007: 77–86.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Tabachnick, B.G. & Fidell, L.S. 1989. Using multivariate statistics. HarperCollins Publishers. 746 s.
- Tuomola, T. 2007. Numeeristen ilmakuvien käyttö havupuutaimikoiden perkaustarpeen määrittämisessä. Pro gradu -tutkielma. Metsänarvioimistiede. Helsingin yliopisto. 77 s.

17 viitettä