

Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga

Mait Lang

Lang, M. 2010. Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 52, 5–17. ISSN 1406-9954.

Abstract. Tests were carried out in mature Scots pine, Norway spruce and Silver birch stands at Järvselja, Estonia, to estimate canopy cover (K) and crown cover (L) from airborne lidar data. Independent estimates K_c and L_c for K and L were calculated from the Cajanus tube readings made on the ground at 1.3 m height. Lidar data based cover estimates depended on the inclusion of different order returns significantly. In all the stands first order return based estimate K_1 was biased positively (3–10%) at the reference height of 1.3 m compared to ground measurements. All lidar based estimates decreased with increasing the reference height. Single return (K_y) and all return (K_k) based canopy cover estimates depended more on the stand structure compared to K_1 . The ratio of all return count to the first return count D behaved like crown cover estimate in all stands. However, in spruce stand D underestimated L_c significantly. In the Scots pine stand $K_1(1.3) = 0.7431$ was most similar canopy cover estimate relative to the ground estimate $K_c = 0.7362$ whereas $K_y(1.3)$ and $K_k(1.3)$ gave significant underestimates (>15%) of K . Caused by the simple structure of Scots pine stand – only one layer pine trees, the Cajanus tube based canopy cover (K_c), crown cover (L_c) and lidar data based canopy density $D(1.3)$ values were rather similar. In the Norway spruce stand and in the Silver birch stand second layer and regeneration trees were present. In the Silver birch stand $K_k(1.3)$ and $K_y(1.3)$ estimated K_c rather well. In the Norway spruce stand $K_y(1.3)$ and $K_1(1.3)$ were the best estimators of K_c whereas $K_k(1.3)$ underestimated canopy cover. Lidar data were found to be usable for canopy cover and crown cover assessment but the selection of the estimator is not trivial and depends on the stand structure.

Key words: airborne lidar, forest canopy cover, boreal forest.

Author's addresses: Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia; Tartu Observatory, 61602 Tõravere, Tartumaa, Estonia, e-mail: mait.lang@emu.ee

Sissejuhatus

Metsa ja lageda ala eristamiseks seal kasvavate puittaimede omaduste järgi on kasutusel teatud kriteeriumid, mis põhinevad puude arvul, kõrgusel ja/või maapinna katvusel. Need kriteeriumid erinevad riigiti ning seetõttu on FAO-s globaalse metsastatistika hinnangutes kasutusel metsa definitsioonis tingimus puittaimede võrastiku liitus (*tree canopy cover*) $\geq 10\%$ (Davis & Holmgren, 2000). Definitsiooni selgitustekstis on aga toodud hoopis tunnus võrade tihedus (*crown density*) (Davis & Holmgren, 2000). Samas tekstis toodud FAO 1998. aasta metsa definitsioonis on kasutusel seevastu võrade katvuse tingimus (*crown cover*). Kliimauuringutes soovib FAO metsa defineerimisel Marrakesh'i deklaratsiooni lisale (UN, 2002) viidates

kasutada definitsiooni, kus on ühe kriteeriumina vajalik 10–30%-line võrade katvus (*crown cover*) (Neeff *et al.*, 2006). Seega on ka globaaluuringutes ikkagi kasutusel erineva tähendusega tunnuseid, mille täpsemat definitsiooni ei esitata ja see tekitab tihti arusaamatusi. Võimalik, et ka Eesti metsaseaduses olevas metsa definitsioonis mõeldakse 30%-lise puuvõrade liitusekriteeriumi puhul (Metsaseadus, 2010) liituse all tegelikult katvust. Segadust on katvuse ja liituse definitsioonide kasutamisel ka teaduslikes artiklites ning tarkvarade dokumentatsioonis. Hea ülevaate metsa katvuse ja liituse hindamisest ning terminoloogiast leiab Jennings *et al.* (1999) ja Korhonen *et al.* (2006) töödest. Eestikeelsest vanemast kirjandusest on puuvõrade liituse täpse definitsiooni ja ka mõõtmisvõimalusi kirjeldanud Krigul (1972).

Nii katvus kui liitus on tunnused, mis kirjeldavad kasvuruumi kasutamist taimeelementide projektsioonide kaudu referentspinnale, milleks võetakse tavaliselt metssaalune maapind. Katvus metsas (*canopy cover*, K) on üksikpuude võraprojektsioonide ühendi (*union*) pindala ja referentspindala suhe. Liitus (*crown cover*, L) on üksikpuude võraprojektsioonide pindala summa ja referentspindala suhe. Katvuse arvutamisel loetakse seega võraprojektsioonide ülekatted ühekordselt ja definitsiooni kohaselt kehtib alati $K \leq L$. Katvuse hinnanguna on testitud ka metsanduse praktikas kasutatav puistu täiust, mis samuti kirjeldab antud puistu puude poolt kasutatavat kasvuruumi hulka (Nilson *et al.*, 1999).

Sõltuvalt kasutatavast võramudelist võime saada erinevaid projektsioone ning seega ka katvuse hinnanguid. Enamasti tehakse lihtsustav eeldus, et puude võrad on geomeetrilised pöördkehad, mille projektsiooniks maapinnal on ring. Sellise võraprojektsiooni pindala on proportsionaalne puu rinnaspindalaga ja sõltub puuliigist, puistu tihedusest ja puu suhtelisest diameetrist puistus. Mudeleid ringikujulise võraprojektsiooni raadiuse hindamiseks puu rinnasdiameetri ja kõrguse põhjal on avaldatud palju (Jakobsons, 1970; Widlowski *et al.*, 2003), kuid nende suurimaks puuduseks on puistu tiheduse arvestamata jätmine ja regressioonimudelitele omane lokaalsus, mis takistab nende kasutamist laialdasemates eksperimentides (Lang *et al.*, 2007). Looduses üritavad taimed võimaluste piires lehti ja okkaid paigutada parema valgustatusega ruumiossa ja nii erinevad naabrusest tingitud konkurentsisst maapealsed võraprojektsioonid tihti oluliselt ringist. Seetõttu saadakse ringikujulise võraprojektsiooni kasutamisel puude paiknemist arvestades näiteks kolmemõõtmelistes mudelites või kaardistatud proovitükiandmete põhjal katvuse alahinnang (Lang & Kurvits, 2007).

Katvust ja liitust võime hinnata vaadeldaval alal paikneva piisavalt suure punktvaatluste hulgaga, kus iga punkti puhul registreeritakse tema paiknemine võraprojektsioonil (Krigul, 1972; Rautiainen *et al.*, 2005). Võraprojektsioonile sattunud punktide arvu suhe kogu vaatluste arvu annab katvuse hinnangu. Liituse hindamiseks võetakse vaatluse väärtuseks võraprojektsioonil kattuvuste arv ($n_k \geq 1$). Vaatluste väärtuste summa suhe vaatluste koguarvu annab liituse hinnangu. Kriguli (1972) kirjeldatud punktmeetod annab tulemuseks katvuse mitte liituse. Punktvaatlusi võib teha Cajanuse toru abil (Rautiainen *et al.*, 2005). Punktmeetodi puhul on oluline, kas vaatluse positiivseks lugemine tähendas vaatluse sattumist puuvõra ringprojektsioonile, oksatippe piirava kumera katte (*convex*) projektsioonile (ebakorrapärane võra) või ainult taimeelemendile (oksale või lehele). Viimasel juhul peetakse puuvõra poolläbipaistvaks ja saadakse efektiivne katvuse K_{eff} või liituse L_{eff} hinnang (Rautiainen *et al.*, 2005). Kuna looduses ei ole võrad tavaliselt läbipaistmatud, siis kehtib $K_{eff} \leq K$ ja $L_{eff} \leq L$.

Üheks tänapäevaseks kaugseiresüsteemiks, mis järjest rohkem leiab kasutust metsa struktuuri kirjeldamisel, on lennukile paigaldatud laserskanner (lidar), mida kasutatakse tavaliselt kaardistamistööl maapinna kõrguse mõõtmiseks ja kõrgusmudeli loomiseks (Næsset *et al.*, 2004).

Lidar on aktiivne süsteem, mis sarnaselt radariga toodab sondeerimiseks vajaliku energia ise ning on seega kasutatav ka näiteks öösel. Erinevalt radarist töötab lidar mikrolaineala asemel spektri nähtavas ja lähiinfrapunases piirkonnas (Asner, 2004). Lidari peamiseks tulemusandmestikuks on kolmemõõtmeline ruumis kindla paigutusega (näiteks Eesti põhikaardi koordinaatsüsteemis) olev punktivarv, mis tekib tagasi peegeldunud ja registreeritud signaalist. Laserskanneri tööpõhimõte on järgmine. Laserist kiiratakse impulss ja registreeritakse tekkinud tagasipeegeldusi. Hetkevaatevälja suurus peegeldaval objektil on määratud kauguse ning laserkiirte kimbu hajuvusega – nimelt ei ole laserkiirte kimp paralleelne vaid veidi koonusjas. Seega ei ole väljasaadetud impulss punktproov, vaid katab maapinnal mingi suurusega ala. Kuna energia jaotumine kiirtekimbu ristlõikes ei ole ühtlane vaid pigem normaaljaotuse lähedane – võimsus on suurem kimbu keskel ning keskpunkti kaugenedes kaheneb, siis ei ole hajuvuse määramine lihtne. Lidarite puhul antakse kiirtekimbu hajuvuse ja hetkevaatevälja suurus skanneri väljundoptikast kindlal kaugusel oleval ristlõikel ulatusega, kus signaali tugevus on kahanenud väärtuseni $1/e^2 = 0,1353$ maksimumist. Väljasaadetud kiirgus peegeldub tagasi hetkevaatevälja jäävatelt objektidelt – taimedelt ja maapinnalt ehitistelt jne. Kui need objektid on väiksemad hetkevaateväljast ja asuvad skannerist erinevatel kaugustel, siis võib signaal jaguneda ja tekib mitu peegeldust. Peegeldus registreeritakse, kui vastuvõetud signaali tugevus ületab mingit läve. Tagasipeegelduva energia hulk aga sõltub samas peegeldava objekti optilistest omadustest kasutatava signaali lainepikkusel ning selle objekti pindalast hetkevaateväljas. Täisspektri (*full waveform*) laserite puhul saadakse tulemuseks taimkattes elementide kõrgusjaotus vaatesuunas, kuid tavaliselt salvestavad skannerid esimese ja viimaste olemasolu korral ka teise, kolmanda ja viimase peegelduse (Kasischke *et al.*, 2004).

Lidariandmetest puistute takseertunnuste hindamiseks on Skandinaavias välja töötatud regressioonimeetodid (Næsset, 2004; Næsset *et al.*, 2004; Suvanto & Maltamo, 2010), kus mudelid koostatakse uuritavale alale rajatud proovitükkide mõõtmisandmetest. Samuti on uuritud võimalusi hinnata lidari andmetest selliseid taimkatte olulisi tunnuseid nagu lehepinnaindeks ning katvus. Peamiseks analüüsimeetodiks on maapealse proovitüki alalt mingis raadiuses laserpeegelduste statistikute arvutamine ning nende seostamine proovitüki takseerandmetega või poolsfääripildidelt saadud läbipaistvuse või katvuse hinnangutega (Riaño *et al.*, 2004; Morsdorf *et al.*, 2006). Tulemusi mõjutab laserpunkte sisaldava ala suuruse valik. Eesti metsades on teadaolevalt lidari kasutamist metsainventeerimisel uuringud metsainventeerimisfirma TerraPro ning 2009. aastal Keskkonnateabe Keskus (siis Metsakaitse- ja Uuenduskeskus), kuid tulemusi pole kahjuks publitseeritud.

Käesolevas artiklis analüüsitakse SA Järvselja Öppe- ja Katsemetskonna territooriumil oleva keskealise männiku, kuusiku ja kaasiku põhjal lidari andmetest katvuse hindamise võimalusi. Selleks tehti puistutes maapeal Cajanuse toru abil mõõtmisi ning võrreldi neid lidarimõõtmise andmete põhjal erinevate peegeldusjärkude abil hinnatud katvustega.

Materjal ja metoodika

Puistud

Uurimisobjektideks valiti kolm keskealist erineva struktuuriga puistut, kuhu 2007. aastal oli rajatud 100×100 m suurused proovitükid, millel kaardistati kõik puud. Proovitükkide andmeid kasutatakse rahvusvahelises kiiruslevimudelite võrdluskatses RAMI (RAMI 2010). Testpuistuteks olid siirdesoomännik (JS081-7), mustika-kuusik (JS162-4) ning naadikaasik (JS228-1) (Kuusk *et al.*, 2009a, Kuusk *et al.*, 2009b). Kasvukohatüübid on antud Lõhmuse (2004) järgi. Siirdesoomännikus koosnes puistu praktiliselt ainult esimese rinde mändidest ning esines vaid üksikuid madalaid alusmetsa kaski. Naadikaasikus oli esimeses rindes ka sangleppa ja haaba, teise rinde moodustasid lehtpuud ning esines järelkasvukuuski. Kuusiku esimeses rindes esines üksikuid kaski, teise rinde ja alusmetsarinde moodustasid kuused. Testalade puistute struktuuriandmed ning keskpunkti koordinaadid on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Puistute üldkirjeldus (Kuusk *et al.*, 2009b). N = puude arv hektaril, H = elemendi kõrgus (m), $D_{1,3}$ = rinnasdiameeter (cm), L = elemendi võrapikkus (m), R_{cr} = võraraadius(m).

Table 1. Description of test sites (Kuusk *et al.*, 2009b). N = number of trees per hectare, H = mean tree height, m, $D_{1,3}$ = mean breast-height-diameter, cm, L = mean length of live crown, m, R_{cr} = mean maximum radius of crown.

Liik / Species	N	H	$D_{1,3}$	L	R_{cr}
Männik / Pine stand, 58°18'41,2" N 27°17'48,6" E					
Vanus 124 aastat, siirdesoo / Age 124 years, transitional bog					
Esimene rinne / Upper layer					
<i>Pinus sylvestris</i>	1115	15,9	18,0	4,2	1,5
Alusmets / Understory					
<i>Betula pendula</i>	6	4,1	5,5	2,9	0,8
Kaasik / Birch stand, 58°16'49,9" N 27°19'51,2" E					
Vanus 49 aastat, naadi / Age 49 years, Aegopodium					
Esimene rinne / Upper layer					
<i>Betula pendula</i>	399	26,5	20,7	9,2	1,6
<i>Alnus glutinosa</i>	176	23,4	22,4	9,8	2,0
<i>Populus tremula</i>	78	26,8	21,6	8,2	2,0
Teine rinne / Second layer					
<i>Tilia cordata</i>	205	15,9	12,8	8,1	1,9
<i>Betula pendula</i>	66	17,9	10,5	5,6	1,0
<i>Fraxinus excelsior</i>	30	15,4	10,9	4,0	1,6
<i>Alnus glutinosa</i>	20	17,5	13,1	8,5	1,4
<i>Acer platanoides</i>	16	15,7	11,3	4,3	1,9
Järelkasv / Regeneration layer					
<i>Picea abies</i>	39	8,9	8,9	4,8	1,2
Kuusik / Spruce stand, 58°17'43,0" N 27°15'22,0" E					
Vanus 59 aastat, mustika / Age 59 years, Vaccinium myrtillus					
Esimene rinne / Upper layer					
<i>Picea abies</i>	624	23,2	23,5	10,8	1,8
<i>Betula pendula</i>	143	24,5	17,9	8,5	1,5
Teine rinne / Second layer					
<i>Betula pendula</i>	152	17,5	9,3	4,5	0,9
<i>Picea abies</i>	517	13,8	11,1	6,3	1,2
Järelkasv / Regeneration layer					
<i>Picea abies</i>	157	8,0	6,9	4,4	1,1
Alusmets / Understory					
<i>Picea abies</i>	89	5,3	5,2	3,7	1,1

Maapealsed mõõtmised

Igas puistus mõõdeti liitust ja katvust Cajanuse toru abil. See on seade, mis koosneb vertikaalsest kitsast torust, mille all on peegel läbi toru seniidi suunas lugemite tegemiseks. Kui peeglist paistis taevas, oli lugemi väärtus 0, kui oks või leht, siis oli lugemi väärtus positiivne (Rautiainen *et al.*, 2005). Juhul kui naaberpuude oksad või lehed vertikaalsuunas kattusid, oli lugemi väärtuseks nende puude arv. Positiivsete lugemite arv jagatuna lugemite koguarvuga andis katvuse hinnangu. Lugemite väärtuste summa kogu lugemite arvu andis liituse hinnangu. Mõõtmiskõrgus oli 1,3 m.

Laserskanneri andmed

Laserskaneerimise tegi Eesti Maa-amet lidariga ALS50-II 30. juulil 2009. Lidari kiire hajumisnurk on $1/e^2$ energia kriteeriumi järgi 0,22 milliradiaani. Skaneerimise ajal oli lennukõrgus 500 m, punktide vahekaugus risti lennusuunda 0,24 m ja piki lennusuunda 0,73 m. Punktitihe nadiiri läheduses oli 11 p m^{-2} ja skaneerimisnurk ulatus RAMI testaladel 11 kraadini. Iga puistu kohal tehti kaks teineteisega risti olevat lendu, mis andis punktitiheks kokkuvõttes 20 p m^{-2} .

Laserskanneri andmete töötlemiseks kasutati vabavara FUSION/LDV (McGaughey, 2010). Punktiparvedest lõigati *PolyClipData* abil välja täpselt mõõtmisalasse jäävad punktid ning *MergeData* abil liideti kaks lendu üheks parveks. Peegelduste tiheduseks saadi $30\text{--}31 \text{ p m}^{-2}$, mis tähendab, et veidi vähem kui iga teine impulss jagunes ehk andis mitu peegeldust. Eeldatavalt maapinnale jõudnud punktid eraldati mooduliga *GroundFilter* kasutades vaikimisi seadeid. Maapinna kõrgusmudel koostati *GridSurfaceCreate* abil ning peegelduste kõrgused maapinna suhtes saadi *ClipData* abil punktiparvest kõrgusmudelit lahutades. Peegeldumiste statistikud arvutati mooduliga *CloudMetrics*. Jagunemata peegelduste arv saadi lidarifailidest eraldi SQL päringuga peale andmesalvestusvormingu teisendamist, kuna FUSION/LDV abil jagamata peegeldusi ei ole võimalik leida.

Katvuste arvutamine lidari andmetest

Lidari andmetes oli eristatud erinevad peegeldusjärgud (P): esimene – P_1 , teine – P_2 , kolmas – P_3 , ja viimane P_v . Erinevaid peegeldusjärke ja nende kõrgusi (h_p) aluseks võttes saadi katvuse K hinnanguks valitud referentspinna kõrgusel z juures kõiki peegeldusi arvestav katvuse hinnang $K_k(z)$

$$K_k(z) = \sum (P | h_p > z) / \sum P, \quad (1)$$

vaid esimestel peegeldustel põhinev katvuse hinnang $K_1(z)$

$$K_1(z) = \sum (P_1 | h_p > z) / \sum P_1, \quad (2)$$

ja jagunemata peegeldustele tuginev katvuse hinnang $K_y(z)$ eeldusel, et igal teisel peegeldusel on registreeritud ka esimene peegeldus

$$K_y(z) = \frac{\sum (P_1 | h_p > z) - \sum P_2}{\sum P_1 - \sum P_2}. \quad (3)$$

Lisaks arvutati võrastiku kihi suhteline tihedus $D(z)$

$$D(z) = \sum (P | h_p > z) / \sum P. \quad (4)$$

Lidariandmetest arvutati $K_k(z)$, $K_1(z)$, $K_y(z)$ ja $D(z)$ väärtused referentspinna z kõrgustele $0,2 \leq z \leq 10,0$, kus kõrgus 0 vastab maapinnale.

Tulemused

Cajanuse toru abil saadud liitused (L_c) ja katvused (K_c) on toodud tabelis 2. Katvuste hinnangutele on binoomjaotuse järgi arvatatud 95%-lised usalduspiirid. Männikus on katvuse ja liituse erinevuse põhjuseks esimese rinde võrade ülekatted. Kaasikus ja kuusikus annab teise rinde esinemine puistu kohta tervikuna katvusest oluliselt suurema liituse.

Tabel 2. Cajanuse toruga 2007. aastal mõõdetud katvuse ja liituse hinnangud kõigi rinnete summana. Katvusele on binoomjaotuse järgi arvatatud 95%-lised usalduspiirid.

Table 2. Canopy cover and crown cover estimates calculated from Cajanus tube readings. For canopy cover 95% confidence intervals are given according to the binomial distribution.

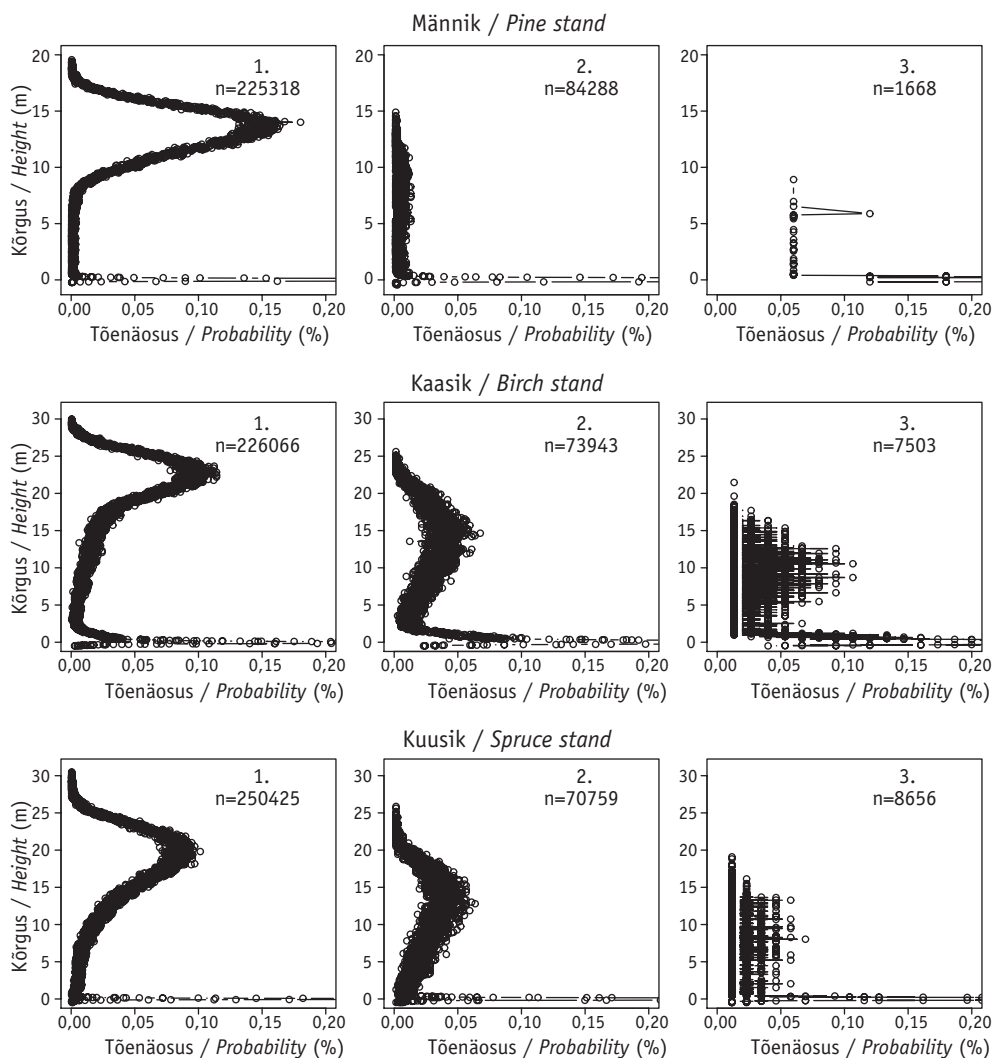
Puistu / Stand	Liitus (L_c) / Crown cover	Katvus (K_c) / Canopy cover	Vaatluste arv / Count
Männik / Pine stand	0,7884	0,7362 (0,6863 – 0,7819)	345
Kaasik / Birch stand	1,0939	0,7972 (0,7519 – 0,8375)	360
Kuusik / Spruce stand	1,2705	0,8962 (0,8601 – 0,9257)	366

Laserandmete puhul vaatleme esmalt tagasipeegelduste jaotusi kõrguse järgi. Männikus domineerivad esimest ja teist järku peegeldused (joonis 1). Kolmandat järku peegelduste arv on tühine (1668). Esimest järku peegeldused algavad alates 19 m ja esinevad suurima tõenäosusega võrastikus kõrgusel veidi alla 15 m. Alla 7,5 m, kus võrad männikus lõpevad, on esimest järku peegeldumise tõenäosus väike. Teist järku peegeldused algavad võrastiku ülaosast ning üldiselt esinevad sama tõenäosusega kuni maapinnani. Kuna skaneerimisnurk ulatus kuni 11 kraadini, siis on tegemist peegeldustega nii võrade seest kui ka kuivadelt okstelt ja tüvedelt.

Kaasikus domineerivad sarnaselt männikuga samuti esimest järku peegeldused, mis algavad 30 m kõrguselt ja esinevad suurima tõenäosusega u 22,5 m kõrguseni, millest allapoole tõenäosus järsult kahaneb kuni kõrguseni 15 m (joonis 1). Allapoole liikudes tõenäosus kahaneb aeglaselt kuni 0,8 m kõrguseni, kus tekib arvatavasti tiheda ja kõrge rohu ning puhmaste tõttu veidi suurem esimese peegelduse tõenäosus enne maapinda. Teist järku peegeldused algavad u 25 m kõrguselt, esinevad suurima tõenäosusega 15 m kõrgusel, kust alates tõenäosus kahaneb kuni 2,5 m kõrguseni, millest allapoole tõenäosus alustaimestiku tõttu järsult kasvab. Kolmandat järku peegeldusi esines praktiliselt 10 korda vähem ($n = 7503$) kui teist järku peegeldusi. Kolmandat järku peegeldused algavad u 18 m kõrguselt, esinevad suurima tõenäosusega 10 m kõrgusel, kust allapoole tõenäosus sarnaselt teist järku peegeldustega kahaneb kuni alustaimestikuni, kus peegeldumise tõenäosus jällegi kasvab.

Kuusikus oli võrreldes männiku ja kaasikuga esimest järku peegeldusi ca 10% rohkem. Põhjuseks arvatavasti veidi väiksem lennukõrgus ja suurem vaatlustiheus. Samas teist järku peegelduste arv oli väikseim (joonis 1) ning kolmandat järku peegelduste arv suurim. Seega, kui impulss jagunes, siis veidi suurema tõenäosusega esines ka kolmandaid peegeldusi. Esimest järku peegeldused algasid veidi üle 30 m kõrguselt, esinesid suurima tõenäosusega veidi alla kahekümne meetri tasemel, kust allapoole tõenäosus hüperboolselt kahanes. Teist järku peegeldused algasid 26 m kõrguselt, esinesid suurima tõenäosusega 13 m kõrgusel, kust allapoole tõenäosus ühtlaselt kahanes. Kolmandat järku peegeldused tekkisid alla 20 m kõrguselt ning esinesid üldiselt veidi suurema tõenäosusega 7,5 m kõrgusel.

Laserandmest katvuse arvutamisel selgus, et sõltuvalt kasutatavast peegeldus-

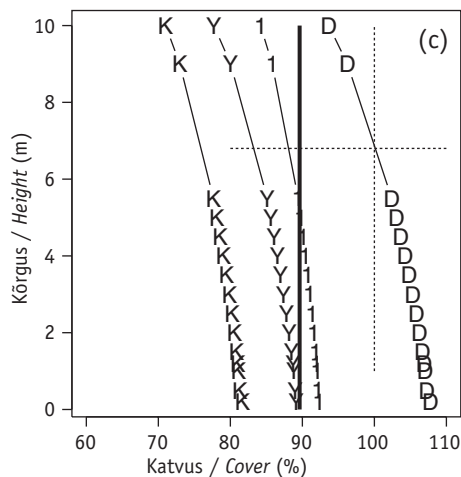
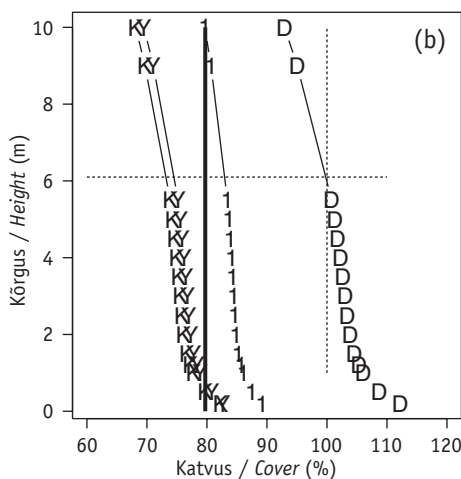
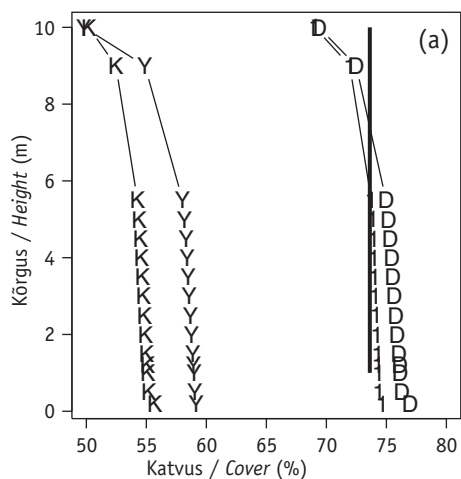


Joonis 1. Tagasipeegelduste esinemise tõenäosus puistutes peegelduse järgu ja kõrguse järgi millimetri kohta. n on peegelduste arv.

Figure 1. Distribution of return probability per millimeter height by return order (first, second, third). n is the return count.

järgust on tulemused üsnagi erinevad. Kõikides puistudes kehtis seaduspära $K_k \leq K_y < K_1$. Kõiki peegeldusi arvestav K_k andis väikseima katvuse hinnangu. Jagamata peegelduste (K_y) põhjal saadi suurem katvuse hinnang ning ainult esimesed peegeldused andsid suurima katvuse hinnangu kõikidel uuritud kõrgustel ($0,2 \leq z \leq 10,0$). Kehtis ka seaduspära, et mida kõrgemal oli referentspind, seda väiksemad olid katvuse hinnangud kõigis kolmes puistus (joonised 2a–2c).

Männikus andis Cajanuse toru abil saadud katvusele K_c kõige sarnasema hinnangu esimeste peegelduste põhjal saadud katvus $K_1(1,3)$. Jagamata peegeldustel $K_y(1,3)$ ja kõikidel peegeldustel $K_k(1,3)$ põhinevad katvuse hinnangud olid teistest



Joonis 2. Katvuse hinnangud männikus (a), kaasikus (b) ja kuusikus (c). 'K' = $K_k(z)$, 'Y' = $K_y(z)$, '1' = $K_1(z)$, 'D' = $D(z)$. Pideva vertiaaljoonega on näidatud Cajanuse toru abil saadud katvuse hinnang K_c . Punktiirjoon märgib $D = 100\%$ väärtust.

Figure 2. Crown cover estimates in pine stand (a), birch stand (b) and spruce stand (c). The labels are: 'K' = $K_k(z)$, 'Y' = $K_y(z)$, '1' = $K_1(z)$, 'D' = $D(z)$. Solid vertical line marks the Cajanus tube estimate made from the ground K_c . Dotted line marks value $D = 100\%$.

hinnangutest väärtuselt oluliselt ($>15\%$) ja usaldusväärselt (tabel 1, joonis 2a) väiksemad. Kõige väiksema katvuse hinnangu andis kõikide peegelduste kasutamine (joonis 2a).

Kaasikus oli esimestel peegeldustel põhinev katvuse hinnang $K_1(1,3)$ oluliselt ja usaldusväärselt suurem nii Cajanuse toru abil saadust ($\sim 10\%$) kui ka kõikidel peegeldustel või jagamata peegeldustel põhinevatest hinnangutest (joonis 2b). $K_y(1,3)$ ja $K_k(1,3)$ väärtused olid samas omavahel üsna lähedased ning lähedased ka Cajanuse toru abil saadud katvuse hinnangutele.

Kuusikus andis Cajanuse toru abil saadud hinnangule K_c kõige lähema väärtuse jagunemata peegeldustel $K_y(1,3)$ põhinev hinnang (joonis 2c). Kõikide peegelduste kaasamisel oli katvuse hinnang u 10% väiksem ja erinevus maapealsetest katvuse hinnangust oli statistiliselt usaldusväärne. Vaid esimesi peegeldusi arvestav $K_1(1,3)$ andis ca 3% Cajanuse toru abil saadust suurema hinnangu, mis jäi siiski maapealse hinnangu 95% usalduspiiride sisse.

Üsna huvitav on laserandmetest arvatatud võrastiku kihi suhtelise tiheduse väärtuse D ja katvuse K_l omavaheline seos ning võimalik seos tegeliku katvusega, mille parimaks hinnanguks on Cajanuse toru abil saadud K_c . Männikus, kus puudus teine rinne, võrad olid suhteliselt hõredad ning teist liiki peegeldusi võrastikus oli vähe, andsid K_l , K_c ja D üsna lähedase ja K_c usalduspiire arvestades sarnase hinnangu (0,73–0,77) kuni võrade alguse kõrguseni (~6–8 m) (joonis 2a). Kaasikus ja kuusikus aga kasvas $D(z)$ väärtus alates seitsmest meetrist madalamal, kus domineeris teine rinne, üle 100%, mis välistab selle tunnuse kasutamise katvuse hindamiseks nendes puistutes. Samas paistis nii kaasikus kui ka kuusikus, kus K_l hindas pigem katvust üle ning K_y oli Cajanuse toru abil saadud hinnangule üsna lähedal, et kõrgusel, kus $D(z) = 100\%$, on K_l tegeliku katvuse K_c väärtusele lähemal kui maapinnal (joonised 2b–2c). Niisiis võiks tingimusel $D(z) = 100\%$ sarnastes puistutes määrata katvuse hindamise referentskõrguse z . Kahjuks pole teada tegelik peegelduste esindatav pindala, sest tagasi peegeldunud signaali tugevus sõltub nii peegeldava pinna suuruselt kui ka peegeldusvõimest. Seega ei saa kriteeriumi $D(z) = 100\%$ kasutada ka K_l referentspinna kõrguse määramisel. Oma olemuselt on D pigem liituse (L) hinnang kõigis kolmes puistus. Männikus oli $D(1,3)$ lähedane katvusele ja liitusele ning kaasikus ja kuusikus oli D katvusest oluliselt suurem sarnaselt Cajanuse toru abil saadud L ja K hinnangutega (tabel 1). Kuusikus hindas D liitust võrreldes maapealsete mõõtmistega alla. Lasermõõtmistel sõltub D väärtus oluliselt ka sellest, kui tihe ja sile on võrastiku kõige ülemine kiht lidari impulsi jaoks ning kui palju tekib kõrgemat järku peegeldusi võrade sees aladel, kus ei ole kahe puu võrade omavahelist ülekattet.

Arutelu

Järvelja kolmest testpuistust kogutud andmestik oli üle u. 10 korda suurema punktitiheusega tavaliselt kaardistusotstarbel kogutavast andmestikust, kus punktitiheus on 0,5–2 punkti ruutmeetrile. Seega võib sarnane katse suurema puistute arvuga arhiivimaterjalil anda siinsest erinevaid tulemusi. Mõju avaldavad suurema lennukõrguse tõttu suurem skaneerimisnurk (punkt pole maapinnal ringikujuline ja teepikkus läbi võrastiku kasvab) ning hetkevaatevälja suurenemine maapinnal, mis mõjutab suuremat järku peegelduste tekkimist. Siiski näitas käesolev analüüs, et lidariandmestikust on võimalik hinnata võrastiku katvust ning ka liitust, kuigi väga kindlat eeskirja katvuse arvutamisel signaali peegeldusjärgude kaasamiseks kahjuks anda ei saa. Samas olid uuritavad puistud oma struktuurilt üsna erinevad ning see mõjutas erinevatel peegeldusjärgudel põhinevaid katvuse hinnanguid ning avaldus peegelduste arvu jaotustes kõrguse järgi. See omakorda tähendab, et erinevate peegeldusjärgude jaotused kannavad infot puistu struktuuri kohta. Ka Næsset (2004) leidis, et peegelduste kõrguse jaotuse info kaasamine puistu takseertunnuste ennustamisel regressioonimudelites suurendas hinnangute täpsust.

Testmännikuga sarnanevates puistutes, kus puudub teine rinne ning võrastikus on teist järku peegeldusi vähe, andis esimest järku peegelduste kasutamine maapeal mõõdetud katvusega kõige sarnasema kuigi veidi suurema tulemuse. Kuusikus ja kaasikus, kus esines palju teise rinde puid, andis esimeste peegelduste kasutamine pigem ülehinnangu ning mõõdetuga lähedase tulemuse sai jagunemata peegelduste põhjal. Morsdorf *et al.* (2006), kes võrdlesid väikese hajuvusega lidari andmetest ning poolsfääripildidelt saadud katvuse hinnanguid männikutes Šveitsi rahvuspargis Ofenpass'is, järeldasid samuti, et esimese peegelduse kasutamine annab mõningase katvuse ülehinnangu. Põhjus on arvatavasti selles, et võraelementide piiridele

sattuvate impulsside puhul tekivad esimesed registreeritavad peegeldused ka väiksema kui poole hetkevaatevälja suuruse peegeldava pinna olemasolul. Seega tuleb lidari kasutamisel metsa katvuse ja liituse hindamiseks koguda ka proovialadel kalibratsiooniandmestik uuritava ala jaoks (Morsdorf *et al.*, 2006). Ainult lidarile tuginevate usaldusväärsete ja väikese hajuvusega hinnangute saamine lihtsal viisil on üsna küsitav, sest signaali mõjutavad kaks teineteist kompenseerivat suurust 1) peegeldava pinna suurus ning 2) optilised omadused. Samas on esimeste peegeldumiste jaotuse ülemine osa seotud väga hästi puistu kõrgusega, mis on näiteks standarditabeli mahu lähendusvalemi ainuke sisend. Kindlasti vajaks edaspidi rohkem tähelepanu juba praegu Eestis rutiinsete kaardistustööde jaoks korraldatavate lendude käigus arhiividesse koguneva lidariandmestiku kasutamine koos multispektraalsete ülesvõtetega takseertunnuste arvutamiseks.

Kokkuvõte

Kolmes keskealises puistus – siirdesoomännikus, naadikaasikus ja mustikakuusikus olevatel 100×100 m testaladel oli lennukilidariga ALS50-II kahe risti ülelennu summas skanneerimistiheduseks keskmiselt 22 p m⁻². Cajanuse toru abil tehtud maa-pealsete mõõtmiste põhjal jäi liitus puistutes vahemikku 0,7884–1,2705 ja katvus vahemikku 0,7362–0,8962. Lidariandmestikust eraldati testaladele jäävad signaali peegeldused, koostati maapinna kõrgusmudel ning arvutati erinevat järku peegeldustel põhinevad katvuse ja liituse hinnangud. Analüüsis puistuelemente ei eristatud.

Selgus, et puistu struktuur mõjutab peegeldusjärgkude arvu. Võrreldes naadikaasiku ja mustikakuusikuga oli lihtsa struktuuriga ilma teise rindeta siirdesoomännikus kolmandat järku peegeldusi neli korda vähem. Teist järku peegelduste arv siirdesoomännikus oli sarnane mustikakuusikule ning naadikaasikule, kuid peegeldused tekkisid pigem maapinnalt kui võrastikust.

Lidariandmetest arvutatud katvuse ja liituse hinnangud sõltusid kasutatava referentspinna (virtuaalse maapinna) kõrgusest ja kahanesis kõrguse suurenedes. Lidariandmete põhjal andsid võrreldes maa-pealsete mõõtmistega kõige väiksema hajuvusega (kuid mitte alati kõige täpsema) katvuse hinnangu esimesed peegeldused. Kõige vähemtäpsemaks tuleb pidada kõiki peegeldusjärke arvestavat katvuse hinnangut. Liituse hindamiseks testitud kõikide peegelduste ja esimeste peegelduste arvu suhe sobis männikus ja kaasikus, kuid keerulise struktuuriga kuusikus andis alahinnangu.

Katvuse hindamine lidarmõõtmiste abil paljusid Eesti keskealisi ja vanemaid metsi esindavate kolme Järvselja puistu näitel on võimalik. Siiski raskendab ainult lidariandmetele tuginevate hinnangute kasutamist nende sõltuvus puistu struktuurist.

Tänuavaldused. Artikli valmimisel ja andmete kogumisel olid toeks Keskkonna-investeeringute Keskuse Metsanduse 2010. aasta programmi projekt 4, Eesti Teadusfondi grantid ETF8290, ETF7725 ja riikliku sihtfinantseerimise grantid SF0060115s08 ja SF0170014s08.

Kasutatud kirjandus

- Asner, G.P. 2004. Biophysical remote sensing signatures of arid and semiarid ecosystems. – Ustin, S.L. (ed.). *Remote Sensing for natural resource management and environmental monitoring. Manual of remote sensing*. John Wiley & Sons, Inc, 60–61.
- Davis, R., Holmgren, P. 2000. FRA 2000. On definitions of forest and forest change. – Forestry Department Food and Agriculture Organization of the United Nations. Working Paper 33. Rome. 15pp.
- Jakobsons, A. 1970. The correlation between the diameter of tree crown and other tree factors – mainly the breast height diameter. – Research notes 14, Department of Forest Survey, Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden. 75 pp. (In Swedish with English summary).
- Jennings, S.B., Brown, N.D., Sheil, D. 1999. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. – *Forestry*, 72, 59–73.
- Kasischke, E.S., Goetz, S., Hansen, M.C., Ozdogan, M., Rogan, J., Ustin, S.L., Woodcock, C.E. 2004. Temperate and Boreal Forests. – Ustin, S.L. (ed.). *Remote Sensing for natural resource management and environmental monitoring. Manual of remote sensing*. John Wiley & Sons, Inc, 235–238.
- Korhonen, L., Korhonen, K.T., Rautiainen, M., Stenberg, P. 2006. Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. – *Silva Fennica*, 40(4), 577–588.
- Krigul, T., 1972. Forest mensuration. Tallinn, Valgus, 145–146. (In Estonian).
- Kuusk, A., Kuusk, J., Lang, M. 2009a. A dataset for the validation of reflectance models. – *Imaging Spectroscopy: Innovative tool for scientific and commercial environmental applications*, Proc. 6th EARSeL SIG IS workshop, 16–19 March 2009, Tel-Aviv (CD-ROM). 11 pp.
- Kuusk, A., Kuusk, J., Lang, M. 2009b. A dataset for the validation of reflectance models. – *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 889–892.
- Kuusk, A., Lang, M., Kuusk, J., Lükk, T., Nilson, T., Möttus, M., Rautiainen, M., Eenmäe, A. 2009c. Database of optical and structural data for the validation of radiative transfer models. Technical Report Version 09.2009. Tartu Observatory 52 pp. [WWW document]. – URL http://www.aai.ee/bgf/jarvselja_db/jarvselja_db.pdf.
- Lang, M., Kurvits, V. 2007. Restoration of tree crown shape for canopy cover estimation. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 46, 23–34.
- Lang, M., Nilson, T., Kuusk, A., Kiviste, A., Hordo, M. 2007. The performance of foliage mass and crown radius models in forming the input of a forest reflectance model: A test on forest growth sample plots and Landsat 7 ETM+ images. – *Remote Sensing of Environment*, 110, 445–457.
- Lõhmus, E. 2004. Estonian forest site types. Tartu, Eesti Loodusfoto. 80pp. (In Estonian).
- McGaughey, R.J. 2010. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. July 2010 – FUSION Version 2.90. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.
- Metsaseadus. 2010. Estonian forest law. – *Elektrooniline Riigi Teataja*, RT I 2006, 30, 232. (In Estonian).
- Morsdorf, F., Kötz, B., Meier, E., Itten, K.I., Allgöwer, B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint laser scanning data based on gap fraction. – *Remote Sensing of Environment*, 104, 50–61.
- Næsset, E., 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. – *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(2), 164–179.
- Næsset, E., 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(6), 482–499.
- Neeff, T., von Luepke, H., Schoene, D. 2006. Choosing a forest definition for the Clean Development Mechanism. – *Forests and Climate Change Working Paper 4*. FAO. 18pp.
- Nilson, T., Kuusk, A., Lang, M., Lükk, T. 1999. Forest reflectance model as an interface between satellite images and forestry database. – Zawila-Niedzwiecki, T., Brach, M. (eds.). *IUFRO Conference on Remote Sensing and Monitoring*. Luxembourg Office of Official Publications of the European Communities, 462–476.
- RAMI. 2010. RADIATION transfer Model Intercomparison. [WWW document]. – URL <http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/RAMI-IV/RAMI-IV.php>. [Accessed 30 August 2010].
- Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. 2005. Estimating canopy cover in Scots pine stands. – *Silva Fennica*, 39(1), 137–142.
- Riaño, D., Valladares, F., Condés, S., Chuvieco, E. 2004. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. – *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3–4), 269–275.

- Suvanto, A., Maltamo, M. 2010. Using mixed estimation for combining airborne laser scanning data in two different forest areas. – *Silva Fennica* 44(1), 91–107.
- UN. 2002. The Marrakesh Ministerial Declaration. FCCC/CP/2001/13/Add.1. 69 pp.
- Widlowski, J.-L., Verstraete, M., Pinty, B., Gobron, N. 2003. Allometric relationships of selected European tree species. – Technical report, EC Joint Research Centre, Ispra, Italy. 61 pp.

Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data

Mait Lang

Summary

Many of the forest definitions include a criterion based on the share of ground covered by tree crowns. However, the lack of a clear definition for the share and mixing of the terms is common in laws and documentation causing the variables canopy cover (K) and crown cover (L) to be used loosely (Jennings *et al.*, 1999). Different methods exist to estimate K and L (Korhonen *et al.*, 2006). Airborne lidar data are now widely used for estimation of forest inventory variables via regression methods (Næsset, 2004; Næsset *et al.*, 2004; Suvanto & Maltamo, 2010), leaf area index, LAI (Riaño *et al.*, 2004; Morsdorf *et al.*, 2006) and are an attractive source to estimate canopy cover and crown cover.

Tests were carried out in mature Scots pine, Norway spruce and Silver birch stands (Table 1) which are used also for RAMI experiment (RAMI, 2010) in Järvselja, Estonia, to study the options for estimating canopy cover from airborne lidar data. Lidar data were collected with Leica ALS50-II on 30th July 2009 at 500 meter over ground. The scanner beam divergence at $1/e^2$ energy criterion was 0,22 mrad. Scan angle ranged up to 11 degrees and with two perpendicular flights the final point density on the ground was 20 p m^{-2} (Kuusk *et al.*, 2009c). Lidar data were processed with FUSION/LDV (McGaughey, 2010) to extract data from sample plot area, create digital terrain model and to calculate return height statistics. Canopy cover was estimated from lidar data by using all returns (Eq 1), using first returns only (Eq 2) or using single returns (Eq 3). For crown cover estimate the ratio of all returns to first returns D , was calculated (Eq 4). Reference height z was varied in the range $0.2 \text{ m} \leq z \leq 10.0 \text{ m}$. Results were compared to the canopy cover estimates (K_c) calculated from the Cajanus tube (Rautiainen *et al.*, 2005) readings from the ground corresponding to the $z = 1.3 \text{ m}$ (Table 2).

Lidar return distributions by height (Figure 1) were different in studied stands. Næsset (2004) recommended to use the height distribution information of return counts in regression models for predicting forest inventory variables. Cover estimates from lidar data depended significantly on the estimator (K_l , K_k , K_y) and stand structure (Figure 2). The value of all lidar based estimators decreased with increasing reference height z (Figure 2). Compared to K_c $K_l(1.3)$ was positively biased (3–10%) in all stands. However, only in the birch stand the $K_l(1.3)$ estimate was outside the confidence intervals of K_c (Table 2, Figure 2). The single return (K_y) and all return (K_k) based canopy cover estimates depended more on the stand structure compared to K_l .

In the Scots pine stand $K_1(1.3)$ gave most similar canopy cover estimate to the ground estimate K_c whereas $K_y(1.3)$ and $K_k(1.3)$ underestimated K_c significantly (>15%). The pine stand structure was rather simple – only one layer of pine trees having minor overlaps between crowns. Therefore the Cajanus tube based estimates of canopy cover K_c , crown cover L_c and lidar data based canopy cover estimate D values were rather similar. In Norway spruce and Silver birch stands second layer and regeneration trees were present. In the Silver birch stand $K_k(1.3)$ and $K_y(1.3)$ gave similar estimates within confidence intervals of K_c (Figure 2). In the Norway spruce stand $K_y(1.3)$ was the best estimator of K_c , $K_y(1.3)$ was within confidence limits of K_c whereas K_k underestimated canopy cover. In all stands the ratio of all returns to first returns (D) behaved like a crown cover estimate but this is concluded from the small sample size ($n = 3$). The differences between tested canopy cover estimators K_y , K_1 and K_k are probably caused by the fact that the reflected energy is a function of the surface optical properties and the surface area within the instantaneous field of view. Hence, the actual area represented by a returned signal is hardly known. The tests confirmed that lidar data are usable for canopy cover and crown cover assessment but the selection of the estimator (an order or a combination of returns) is not trivial and depends on the stand structure.

Received September 1, 2010, revised October 22, 2010, accepted November 5, 2010