

Puistu esimese rinde võrastiku alguse kõrguse hindamine lennukilidari mõõdistusandmete järgi

Tauri Arumäe^{1,2*} ja Mait Lang^{1,3}

Arumäe, T., Lang, M. 2013. A simple model to estimate forest canopy base height from airborne lidar data. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 58, 46–56. ISSN 1406-9954.

Abstract. Airborne laser scanner (ALS) measurements from two test sites in Estonia were used to estimate forest canopy-base height (H_{VL}). The ALS data was collected by Estonian Land Board using Leica ALS50-II scanner. The H_{VL} was estimated by using mode value and standard deviation of the ALS pulse reflection position height distribution. The pulse reflections which had height less than 0.5 m over the estimated digital terrain model were excluded from the analysis. In situ measurements of canopy base height (H_{VA}) were carried out in 20 mesotrophic Norway spruce and silver birch forest stands in Järvelja and in 45, mostly Scots pine dominant, mesotrophic forest stands in Aegviidu. Determination coefficients of linear regression between H_{VL} and H_{VA} for both test sites were over 0.8 and the residual standard errors of the models were less than two meters. The influence of forest understory vegetation to the estimation of H_{VL} was tested by excluding the near-to-ground vegetation reflections which had height less than 1.5 m. The test results revealed no significant impact of forest understory to the H_{VL} models. The cross validation showed that the H_{VL} models were independent of test sites and tree species composition. The Järvelja data based H_{VL} model had 1.3 m negative bias if applied to Aegviidu forests and the Aegviidu data based H_{VL} model had 1.4 m positive bias if applied to Järvelja forests. In the Aegviidu test site, difference of H_{VL} models of coniferous and deciduous stands was tested and the difference was found not to be significant.

Key words: airborne laser scanning, forest, canopy-base height.

Authors' addresses: ¹Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014, Estonia; ²State Forest Management Centre, 10149, Toompuiestee 24, Tallinn; ³Tartu Observatory, 61602, Tõravere, Tartumaa, Estonia, *e-mail: tauri.arumae@rmk.ee

Sissejuhatus

Lidar (*Light Detection And Ranging*) on kaugseires kasutatav seade, mis koosneb kolmest põhimõtteliselt osast: impulsi edastaja/saatja, salvesti/vastuvõtja ja opto-mehhaaniline seade. Lidar saadab kindlaks määratud suunas välja valgusimpulssse, mis sõltuvalt uuritava pinna või keskkonna omadustest kas peegelduvad tagasi, neelduvad või hajuvad edasisuunas. Tagasipeegeldunud signaali töötlemisel saadakse kolmemõõtmeline punktivarv, mille iga punkt kirjeldab

objekti pinda, millelt impulss tagasi peegeldus. Aerolidari impulsside peegelduste asukoha-koordinaadid (X, Y, Z) arvutatakse impulsi edasi-tagasi liikumiseks kulunud aja ning lennuki GPS süsteemi ja asendianduritest saadud andmete järgi. Maapealse punktituduse horisontaalpinnal määrab impulsisagedus, skanneri peegli võnkesagedus, lennukõrgus, lennuki kiirus, suurim vaatenurk nadiiri suhtes ja impulsi kohta registreeritavate peegelduste arv (Heritage & Large, 2009; Large & Heritage, 2009; Leica, 2007).

Lennukilt lidarite abil kogutav kolmemõõtmelised andmestikku kasutatakse peamiselt maapinna topoloogilisel kaardistamisel (Wehr & Lohr, 1999; Hodgson *et al.*, 2003), kuid ka arheoloogilistel uurinutel (Large & Heritage, 2009; Crutchley, 2009). Skandinaaviamaades ja ka Põhja-Ameerikas on viimase paarikümne aasta jooksul arendatud aerolidaril põhinevaid poolautomaatseid metsade inventeerimise süsteeme (Næsset, 1997a; Næsset, 1997b; Drake *et al.*, 2002; Patenaude *et al.*, 2004; Korhonen *et al.*, 2011).

Enamik topograafiliseks kaardistamiseks mõeldud aerolidareid kasutab lähifrapiirirõhke spektripiirkonna (NIR, *near infrared*) kiirgust. NIR lainepikkusel (0,78–1,3 µm) on roheline lehestik poolläbipaistev struktuur ja seega saadakse infot ka maapinna kõrguste kohta taimkatte all (Hodgson *et al.*, 2003). Samas tekivad laserimpulsi peegeldused ka võrastikult (Liang, 2004; Heritage & Large, 2009) ja toimub lidarimpulsi jagunemine ehk ühest impulsi mitme peegelduse teke. Jagunemist mõjutab metsas puude kõrgus ja võrastiku läbipaistvus (Næsset, 1997a; Jennings *et al.*, 1999; Drake *et al.*, 2002; Patenaude *et al.*, 2004; Disney *et al.*, 2010), aga ühe impulsi kohta registreeritav peegelduste arv sõltub konkreetsest lidarist.

Metsa kõrgus on üks olulisemaid puistu struktuuri kirjeldavaid tunnuseid metsakorralduses, mille kohta on ka enim uurimusi (Krigul, 1972; Næsset, 1997a; Næsset, 2002; Vaus, 2005; Heurich, 2008). Metsa läbipaistvus omakorda on seotud võrastiku tihedusega ja seeläbi puistu rinnaspindalaga ja katvusega, mis omakorda on seoses täiusega (Howard, 1991; Nilson & Kuusk, 2004; Frey, 2009; Lang, 2010; Lang, 2012). Varasemates uurimustes on selgunud (Hall *et al.*, 2005; Dean *et al.*, 2009; Lang *et al.*, 2010), et tüüpiline lidarimpulsside peegeldumise kõrgusjaotus metsas on kahemodaalne. Jaotuse esimene mood asub võrastiku tihedaimas osas ning teine mood maapinna lähedal. Niisugune jaotuse kuju on hästi kooskõlas

kiirgust peegeldavate ja hajutavate elementide ja pindade ruumilise jaotusega metsas. Peegelduste kõrgusjaotuse mood, mis asub võrastikus, võiks seega olla lähtepunktiks puistu võrastiku alguse kõrguse hindamiseks.

Erinevalt puistu kõrgusest ja läbipaistvusest on puistu võrastiku alguse kõrgus meil üsna vähe uuritud tunnus, mis aga võiks anda ülevaate metsa elujõulisuse (võrade pikkuse ja puistu kõrguse suhe), puistu sortimentidest (oksavaba palgi osa) ja rinnasdiameetrist, mis on otseses seoses võra diameetriga ja puu kõrgusega (Krigul, 1968; Zarnoch *et al.*, 2004; Nilson, 2005; Kato *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2011). Lisaks on näiteid, kus puistu võrastiku alguse kõrgust kasutatakse metsade tuleohutuse kaardistamiseks (Riaño *et al.*, 2004), biomassi hindamiseks (Marklund, 1987) ja info allikana harvendusraiate planeerimisel (Popescu & Zhao, 2008; Dean *et al.*, 2009). Põhimõtteliselt saab aerolidari andmetest tuvastada ka puu liiki eeldusel, et erinevat liiki puude võrade struktuur ja profiilid on tuvastatavad kolmemõõtmelisest punktiparvest (Holmgren & Persson, 2004; Yao *et al.*, 2012).

Käesoleva töö eesmärgiks oli testida puistu võrastiku alguse kõrguse hindamist aerolidari impulsi peegelduste kõrgusjaotuse moodi ja standardhälbe järgi. Uuriti ka kuni 1,5 m paksuse maapinnalähedase kihi peegelduste eemaldamise (filtreerimise) mõju peegelduste kõrgusjaotusele, mis on aluseks võrastiku alguse kõrguse hindamisel. Analüüsiti saadud mudelite sõltuvust testala asukohast ja puistu peapuuliigist.

Materjal ja meetodika

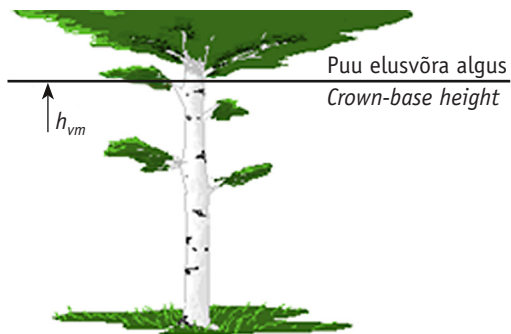
Testalad

Uuringus kasutati kahe katseala andmeid. Lõuna-Eestisse Järvseljale rajati 2010. aastal katseala (Arumäe, 2011) tsentrikoordinaatidega 6463392,6 N, 694362,9 E (EPSG:3301), kus oli 12 kuusikut ja 8 kaasikut. Puistute keskmine vanus oli kuusikutel 52 aastat ja kaasikutel 61 aastat (tabel 1). Puistud asusid

peamiselt jänesekapsa-mustika, mustika ja jänesekapsa-kõdusoo (Lõhmus, 2004) kasvukohatüüpides, kus alusmets oli hõre ning põõsa ja rohuline madalakasvuline. Puistute üldkirjeldus on tabelis (1).

Igas puistus mõndeti vähemalt kümne puu elusa võra alguskõrgus (h_{vm}) ja rinnasdiameeter (d_m), mille keskmised võeti puistu hinnanguteks (puistu võraalguse kõrgus (H_{VA}), puistu ruutkeskmise rinnasdiameeter (D_m)). Puude elusvõra alguse kõrguse mõõtmiseks kasutati Vertex III kõrgusemõõdjat ja T3 transponderit. Kõrguse lugem võeti suurema lehemassiivi algusest, mis on ka antud artikli kontekstis elusvõrastiku alguskõrguse piiriks (joonis 1).

Põhja-Eestis Aegviidu katsealal (Anniste & Viilup, 2010), mille tsentrikoordinaadid on 6573468,3 N, 587991,8 E (EPSG:3301) tehti 2012. aastal lisamõõtmisi ja puistu elusvõrastiku alguse kõrguse analüüsiks saadi andmed 45 metsaeraldise. Puistud asusid peamiselt angervaksa, mustika ja jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüüpides. Alusmets neil proovitükkidel oli hõre ja alustaimestik madalakasvuline, kui välja arvata angervaksa kasvukohatüübi puistud. Puude elusvõra alguse kõrguse mõõtmiseks ning puistu võrastiku alguse kõrguse hinnangu saamiseks rajati igasse eraldisse vähemalt 10 juhuslikult asetse-



Joonis 1. Puu elusvõra alguse (crown-base height) kõrguse (h_{vm}) määratlemine (Arumäe, 2011).

Figure 1. The definition of the tree live crown base height (h_{vm}) according to Arumäe (2011).

vat ringproovitükki raadiusega 8–12 m. Proovitükil klupiti kõik puud ning mõndeti kuni kolme mudelpuu kõrgus ja elusvõra alguse kõrgus Vertex III kõrgusemõõdja ja T3 transponderi abil. Hiljem arvutati Eesti Metsakorralduskeskuses väljatöötatud mudelite (Pärt, 2013) abil proovitükkide ja metsaeraldiste takseerikirjeldused. Katseala puistute liigiline jaotus ja põhilised takseertunnused on esitatud tabelis 1.

Lidarimõõdistuste andmed

Lasermõõdistuse tegi mõlemal testalal Eesti Maa-amet aerolidariga Leica ALS50-II,

Tabel 1. Aegviidu ja Järvelja katsealade proovitükkide jagunemine puuliikide järgi. Järvelja puistute kõrgusandmed pärinevad 2010. aasta takseerikirjeldusest.

Table 1. The distribution of sample plots in the Aegviidu and Järvelja test sites according to the main species. Järvelja data is from the forest inventory database from the year 2010.

Katseala	Peapuuliik	Puistute arv	Keskmine vanus (a)	Puistute keskmine kõrgus (m)	Teise rinde kõrgus (m)
Test site	Main species	Stands	Average age (y)	Stand average height (m)	Second layer height (m)
Aegviidu	Haab (<i>Common aspen</i> L.)	3	57	24,3	13,80
	Kask (<i>Silver birch</i> Roth)	11	45	18,7	9,76
	Kuusk (<i>Norway spruce</i> L.)	9	59	19,8	10,00
	Sanglepp (<i>Common alder</i> L.)	2	64	19,8	9,60
	Mänd (<i>Scots pine</i> L.)	20	79	21,6	11,10
Järvelja	Kask (<i>Silver birch</i> Roth)	8	52	29,3	-
	Kuusk (<i>Norway spruce</i> L.)	12	61	28,6	-

mis registreerib kuni neli peegeldust ühe impulsi kohta (Leica, 2007). Aegviidu andmestik koguti aastal 2008 (Anniste & Viilup, 2010) ning Järvelseljal lennati aastal 2010. Lennu kõrgus mõlemal katsealal oli keskmiselt 2400 meetrit, mis koos skanneri muude seadistustega tagas umbes 0,5 peegeldust ruutmeetri kohta. Lidarandmete töötluks kasutati programmi FUSION/LDV (v 3.20) erinevaid mooduleid (McGaughey, 2010).

Esimene etapp lidarandmete töötluks oli maapinna kõrgusmodeli loomine, milleks eraldati üldisest punktivarvest *Groundfilter* mooduli abil eeldatavalt maapinnalt tekkinud peegeldused. Seejärel tükeldati lidariandmestik puistute kaupa *PolyClipData* mooduliga, kasutades selleks eraldise piiride vektorpolügoone. Järgnevalt eemaldati *Clipdata* mooduliga andmestikust maapinna lähedased punktid ($h_r < 0,5$ m, kus h_r on peegelduse kõrgus maapinnast). Järele jäänud peegelduste alusel arvutati protseduuri *Cloudmetrics* abil iga eraldiste punktivarvede statistikud.

Võimalike alustaimestikult tekkinud peegelduste mõju uurimiseks võrastiku alguse kõrguse hinnangule H_{VL} rakendati punktivarvele enne kõrgusjaotuse arvutamist lisaks esialgsele filtrile ($h_r \leq 0,5$ m) veel filtringimusi $h_r \leq 1$ m ja $h_r \leq 1,5$ m.

Kõikides testides arvutati lidarandmetest puistu võrastiku alguse kõrguse H_{VL}

hinnang valemiga

$$H_{VL} = H_{Mood} - \frac{H_{Stdev}}{2}, \quad (1)$$

kus H_{Mood} ja H_{Stdev} on vastavalt peegelduste kõrgusjaotuse mood ja standardhälve. Peegelduste kõrgusjaotuse mood ja standardhälve on mõlemad FUSIONi mooduli *CloudMetrics* poolt arvutatud parameetrid. Moodväärtuse leidmiseks jagab *Cloudmetrics* peegeldused 64 kõrgusklassi (McGaughey, 2010).

Maapealsete mõõtmiste järgi hinnatud H_{VA} ning lidarandmetest mudeliga (1) arvutatud puistu võrastiku alguse kõrguse seost lähendati vähimruutude meetodil lineaarse mudeliga $H_{VL} = aH_{VA} + b$, kus a ja b on võrrandi hinnatavad parameetrid. Seoseid uuriti testala kaupa, testalal puuliigiti ning erinevate h_r filtringimuste korral.

Tulemused

Maapinnalähedaste peegelduste eemaldamise järel edasiseks analüüsiks kasutatud peegelduste ühemodaalsete kõrgusjaotuste näited on joonisel (2), kus on esitatud Aegviidu katsealalt näited kaasiku, männiku ja kuusiku kohta.

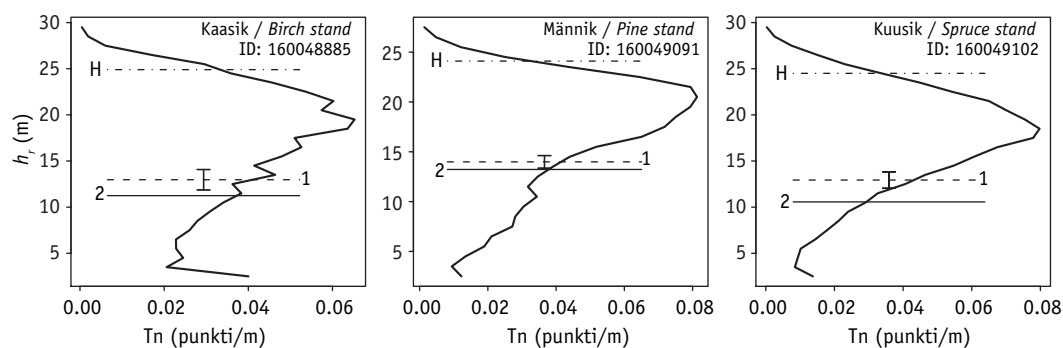
Maapinna lähedaste peegelduste väljajätmise katsest selgus (tabel 2), et peegel-

Tabel 2. Maapinnalähedaste peegelduste filtreerimine ei avaldanud olulist mõju mõõdetud ja lidarandmetest arvutatud puistu võrastiku alguse kõrguse seose parameetritele ega jääkhälbele.

Table 2. The exclusion of near to ground reflections did not significantly influence the estimated parameters for the relationship $H_{VL} = aH_{VA} + b$, where H_{VL} is estimated using Eq.(1) and H_{VA} is the measured canopy base height.

Katseala Test site	Filter Filter	Katse number Test number	R^2 R^2	H_{VL} mudeli parameetrid Parameters of H_{VL} model		Standardviga (m) Standard error (m)	Olulisus Significance
				a	b		
Järvelselja	$F_{h>0,5 \text{ m}}$	H_{VL_1}	0,874	0,8511	-1,5553	2,20	***
	$F_{h>1,0 \text{ m}}$	H_{VL_2}	0,867	0,8309	-1,4177	2,27	***
	$F_{h>1,5 \text{ m}}$	H_{VL_3}	0,869	0,8431	-1,4104	2,25	***
Aegviidu	$F_{h>0,5 \text{ m}}$	H_{VL_4}	0,795	0,7707	0,9955	1,62	***
	$F_{h>0,8 \text{ m}}$	H_{VL_5}	0,791	0,7698	0,9906	1,63	***
	$F_{h>1,5 \text{ m}}$	H_{VL_6}	0,801	0,7710	0,8951	1,59	***

*** $p < 0,05$



Joonis 2. Punktiparve kõrgusjaotused kolmest Aegviidu puistust. Katkendlik joon „1” – lidarandmetest arvatud puistu elusvõrastiku alguskõrgus mudeli H_{VL_6} (tabel 2) abil, pidevjoon „2” – puistus mõõdetud elusvõrastiku alguskõrgus, h_r – peegelduste kõrgus (m), H – puistu esimese rinde mõõdetud kõrgus, Tn – tõenäosus.

Figure 2. Examples of the lidar pulse return height distribution in three Aegviidu test stands. The returns with height $h_r \leq 1.5$ m from the ground were excluded. X-axis – probability (returns per meter), dashed line “1” is the crown-base height according to model H_{VL_6} (Table 2), continuous line “2” is the measured stand crown-base height, H is the average height of the stand, and h_r is the pulse reflection height.

dused, mis jäävad madalamale kui 1,5 m, ei avalda lidariandmetest arvatud ja maa-peal mõõdetud puistu elusvõrastiku alguse kõrguse seosele olulist mõju. Lineaarse regressioonimudeli parameetrid ja lähendi R^2 oluliselt ei muutunud. Parimaid tulemusi andis Aegviidu katsealal filter $h_r \leq 1,5$ m ja Järveljal esialgne filter $h_r \leq 0,5$ m, kuid statistiliselt olulist erinevust kõrgusfiltrid ei põhjustanud.

Järvelja mudeliga H_{VL_3} Aegviidu puistutele ennustatud võrastiku alguse kõrgus osutus keskmiselt 1,33 meetri võrra mõõdetust madalamaks. Vastupidises katses saadi Aegviidu mudeliga H_{VL_6} Järveljal keskmiselt 1,42 meetrit suurem võrastiku alguskõrguse hinnang. Erinevuste põhjuste selgitamiseks võrreldi katsealade puistute ruutkeskmise rinnasdiameetri (D_m) ja puistute elusvõrastiku alguskõrguse (H_{VA}) seost (joonis 3), arvestades, et puistu võrastiku alguse kõrgus on seoses puistu kõrgusega, mis omakorda on seoses diameetriga (Valentine & Mäkelä, 2005). Ilmnes, et Järvelja ja Aegviidu metsade

vahel olulist erinevust selle võrdluse põhjal ei olnud ja võrastiku alguse kõrguse H_{VL} mudeleid saab kasutada asukohast sõltumatusena. Üheks süstemaatilise vea põhjuseks on arvatavasti see, et Aegviidu katseala lidarandmed on neli aastat maapealsest mõõtmistest vanemad.

Et selgitada okas- ja lehtpuupuistute eristamise vajadust lidarmõõdistuse andmete alusel puistute võrastiku alguse kõrguse hindamiseks, lähendati mudelid H_{VL_3} ja H_{VL_6} puuliigist lähtuvalt. Selgus, et mõlemal katsealal suudeti täpsemalt hinnata võraalguse kõrgust okaspuupuistutes – parimate mudelite $R^2 > 0,88$ (tabel 3). Joonisel 4 on esitatud eraldi Aegviidu ja Järvelja okas- ning lehtpuupuistute regressioonimudelid ning tabelis 3 vastavad korrelatsioonikordajad ning tõusude hinnangud ning usalduspiirid. Kuna leht- ja okaspuude mudelite tõusu alumine ja ülemine 95% usalduspiir peaaegu kattusid ja vabaliikmed ei olnud mudelis statistiliselt olulised, siis võime järeldada, et eelnevalt ei ole vaja eristada eraldi peapuuliigiti.

Tabel 3. Lehtpuupuistute (LP) ja okaspuupuistute (OP) elusvõrastiku alguse kõrguse mudelite H_{VL_3} ja H_{VL_6} tõusude võrdlus Aegviidu ja Järvelja katsealal.

 Table 3. The comparison of the crown-base height models H_{VL_3} and H_{VL_6} for coniferous stands (OP) and deciduous stands (LP) in the Aegviidu test site and Järvelja test site.

Testala Test site	Liik Main species	Mudeli tõusu hinnang Model gain	R^2	Hinnangu standardviga (m) Standard Error (m)	t-statistik t-stat	Olulisuse tõenäosus p-value	Usalduspiirid Confidence intervals 5% 95%
Aegviidu	LP	1,39	0,799	0,13	10,49	***	1,1 1,67
	OP	0,96	0,884	0,09	11,01	***	0,78 1,14
Järvelja	LP	0,89	0,908	0,12	7,26	***	0,58 1,21
	OP	0,82	0,913	0,09	9,4	***	0,62 1,01

 *** $p < 0,05$

 Joonis 3. Puistu ruutkeskmise rinnasdiameetri (D_m) ja puistu elusvõrastiku alguse (H_{VA}) suhe Järvelja ja Aegviidu katsealal, mis näitab, et katsealade metsad omavahel oluliselt ei erine.

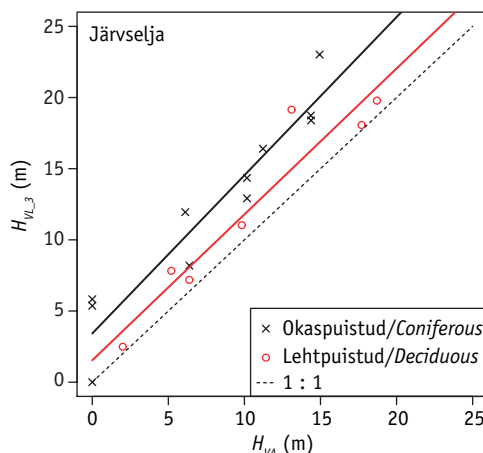
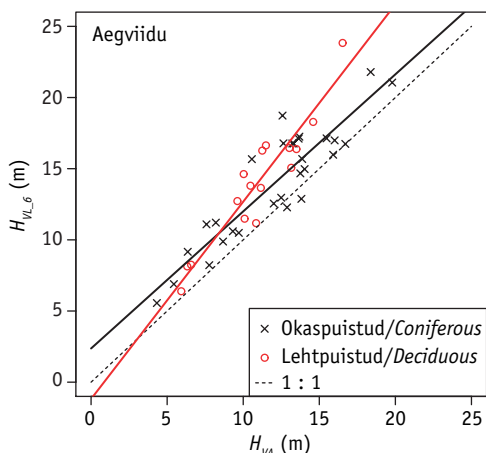
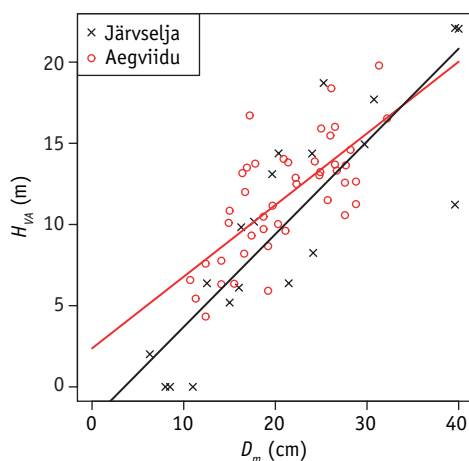
 Figure 3. The relationship of stand mean breast height diameter (D_m) to crown-base height (H_{VA}) in the Järvelja and Aegviidu test sites are similar.

 Joonis 4. Mõõdetud elusvõrastiku alguskõrguse ja mudelite H_{VL_3} ning H_{VL_6} puuliigiti lähendite võrdluskatse Aegviidu ja Järvelja katsealal.

 Figure 4. The comparison of the measured and estimated with model H_{VL_3} and H_{VL_6} (Table 2) crown-base height by main species in Aegviidu and Järvelja test site.

Arutelu

Puistu võrastiku alguse kõrguse hindamiseks on näiteks Zhao *et al.* (2011) pakunud mudeli, millel on neli argumenti: kõikide peegelduste kõrgusjaotuse 1-protsentiil, esimeste peegelduste kõrgusjaotuse 98-protsentiil ning maapinnast mõõtes kõrguste vahemikkesse 15–20 m ja 20–25 m jääv suhteline osa kõikide peegelduste arvust. Zhao *et al.* (2011) mudeli kasutamisel eeldatakse, et andmestikus on iga teise peegelduse jaoks leitav vastava impulsi esimene peegeldus. Zhao *et al.* (2011) mudeli kasutamine Eestis on problemaatiline, kuna Maa-amet väljastab lidarandmeid tavaliselt kaardilehtede kaupa mitte algsete lennuribade järgi ja peegeldusi ei ole üldiselt enam võimalik konkreetse impulsi seostada. Peegelduste kõrgusjaotuse 1-protsentiili mõjutab üsna oluliselt alusmetsa tiheus ja kõrgus ning fikseeritud kõrgusvahemiku kasutamise tõttu võivad ennustustesse tekkida järsud muutused ja müra. Käesolevas töös välja pakutud mudelis (1) kasutatakse maapinnalähedaste peegeldusteta punktisarve kõrgusjaotuse moodi ja standardhälbe hinnangut. See mudel ei pruugi sobida metsades, kus peegelduste kõrgusjaotuse mood pole hästi eristuv.

Mudeli (1) järgi leitud laserimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse kvantiili sobivust võrastiku alguse kõrguse hindamiseks kinnitas mõlemal katsealal mõõdetud ja lidarandmetest ennustatud võrastiku alguse kõrguse lineaarseose determinatsioonikordaja väärtus $R^2 > 0,8$. Maapinna lähedaste peegelduste eemaldamise filtri ($h_r \leq 1,5$ m) mõjul muutus katseala piires võrastiku alguse kõrguse mudeli jääkstandardviga maksimaalselt 12 cm, aga mudelid omavahel oluliselt ei erinenud. Ligilähedased olid nii seose $H_{VL} = aH_{VA} + b$ parameetrid kui ka R^2 (tabel 2) kolme testitud maapinnalähedaste peegelduste eemaldamise filtri ($h_r \leq 0,5$ m, $h_r \leq 1,0$ m, $h_r \leq 1,5$ m) puhul. Arvestades, et alustaimestik ja alusmets näiteks angervaksa kasvukohas võib olla kuni 2 meetri kõrgune, siis võib metsa esi-

mese ja teise rinde võrastiku alguse kõrguse hindamisel jätta lidarimpulsside peegelduste kõrgusjaotusest välja alla 1,5 kuni 2 meetri kõrgusel olevad peegeldused. Esialgu pole selge, kuivõrd sobib selline reegel näiteks noorendike võraalguse kõrguse hindamisel.

Mõningane erinevus ilmnis Aegviidu ja Järvelja mudelite võrdlemisel, nii oli mudeli jääkstandardviga Järveljal kuni 0,6 m suurem kui Aegviidu katsealal. Samuti saime mudelite risttesti tulemusel Aegviidu katsealal võrastiku alguse kõrguse 1,33 meetrise alahinnangu ning Järveljal 1,42 meetrise ülehinnangu. Järvelja ja Aegviidu katsealade puistute keskmise rinnasdiameetri ja elusvõrastiku alguse kõrguse suhte võrdluse põhjal võib väita, et need metsad olid sarnased, seega võraalguse kõrguse mudelite võrdluses tekkinud erinevuse põhjuseid tuleks otsida mujalt. Näiteks Aegviidu laserandmete ja mõõtmiste vahel oli nelja aastane paus, mille jooksul puistud kasvasid keskmiselt 0,5–1 m võrra kõrgemaks vastavalt Kiviste (1997) mudelile. Samas vahemikus oli arvatavasti ka muutus võrastiku alguse kõrguses (Valentine & Mäkelä, 2005), mis võis tingida Aegviidus võrastiku alguskõrguse alahindamise. Lisaks võisid tulemustele mõju avaldada teise rinde kasv ning maapealse mõõtmismetoodika erinevus kahel katsealal või mõõtmisvead – elusvõra alguspiir võib kohati olla hägune ja õige kõrguse defineerimine on üsna subjektiivne. Samuti tuleks arvestada laser-skanneri enda seadistuste erisuste mõju ja võimalikku tundlikkuse muutust aja jooksul.

Tulevikku silmas pidades on laserandmete kõrvale vaja kindlasti juurde teha maapealseid tugimõõtmisi, sest pole teada, kuidas mõjutab võrastikust tekkivate peegelduste kõrgusjaotust näiteks skanneri automaatne tundlikkuse kontroll (AGC – *Automatic Gain Control*) (Vain *et al.*, 2010). Kolmemõõtmelisest punktisarvedest arvutatud statistikutel põhinevate mudelite kaliibrimiseks võiks edaspidi hästi sobida ka statistilise metsainventuuri andmekogu

(Adermann, 2010). See võiks märgatavalt suurendada laserandmete kasutusvõimalusi. Samas annab käesolevas uuringus ilmnenud Aegviidu ja Järvelja puistute mudelite sarnasus lootust, et põhimõtteliselt on võimalik isegi Eesti mandriosa metsade jaoks universaalse lidarandmetele tugineva võraalguse kõrguse mudeli koostamine.

Kokkuvõte

Aegviidu ja Järvelja andmete põhjal selgus, et lidarimpulsside peegelduste kõrgusjaotuse moodväärtusel ja standardhälbel põhinev mudel (1) on sobilik puistu elusvõrastiku alguse kõrguse hindamiseks. Maapealsete mõõtmiste ja laserimpulsi peegelduste järgi hinnatud puistu elusvõrastiku alguse kõrguse regressioonimudeli standardviga oli 1,85 m, determinatsioonikordaja $R^2 > 0,8$ ja seosed olid kõik olulised. Okas- ja lehtpuupuistute mudelid olid sarnased.

Alusmetsa ja alustaimestiku peegelduste eemaldamisel ei olnud märkimisväärset mõju filtreerimiskõrguste vahemikus $h_r \geq 0,5$ –1,5 m. Parimaid, aga mitte oluliselt erinevaid, tulemusi andis Aegviidu katsealal $h_r \leq 1,5$ m ja Järveljal $h_r \leq 0,5$ m. Kokkuvõttes filterkõrguse valik mudelite parameetrite hinnanguid oluliselt ei mõjuta, eeldusel, et alusmets ja rohurinne on rakendatud filtri-kõrgusest madalamad.

Uurimuse tulemusena selgus ka, et Aegviidu ja Järvelja katsealadel saadud mudelid ei ole kohaomased, kuigi mudelite risttestimisel kaasnes Aegviidul 1,33 meetrine võrastiku alguse alahindamine ja Järveljal samas suurusjärgus võraalguse ülehindamine. Vahe võis olla tingitud lasermõõtmiste ja maapealsete mõõtmiste ajalisest vahest või erinevatest võrastiku peegeldusomadustest ning skaneerimistingimustest, kuna puistute keskmise diameetri ja elusvõrastiku alguse kõrguse seosed mõlemal katsealal olid tegelikult sarnased.

Tänuavaldused. Aegviidu katseala andmete analüüsimist toetas Riigimetsa Majandamise Keskus. Teema on seotud Eesti Teadusfondi grandiga ETF8290 ja riikliku sihtfinantseerimise grantidega SF0180009Bs11 ja SF0170014s08 ning institutsionaalse uurimistoetusega IUT21-04 (B21004MIMK). Andmete kogumisel oli suureks abiks Keskkonnateabekeskus eesotsas Enn Pärldiga. Autorid tänavad Andres Kuuske ja anonüümset retsensenti kasulike märkuste ja soovitude eest.

Kasutatud kirjandus

- Adermann, V. 2010. Development of Estonian National Forest Inventory. – Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R.E. (eds.). National Forest Inventories. Springer, 171–184.
- Anniste, J., Viilup Ü. 2010. Metsa takseertunnuste määramisest laserskaneerimise abil. (Determination of forest characteristics with the laser scanning). – Artiklid ja uurimused, 10, 38–53. Luua Metsanduskool. (In Estonian with English summary).
- Arumäe, T. 2011. Laserskanneri andmete kasutamine takseertunnuste hindamiseks. (Using lidar data to assess forest characteristics). MSc thesis. Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool. Tartu. 45 pp. (In Estonian with English summary).
- Crutchley, S. 2009. Using LIDAR in Archaeological Contexts: The English Heritage Experience and Lessons Learned. – Heritage, G.L., Large, A.R.G. (eds.). Laser Scanning for the Environmental Sciences. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, 180–200.
- Dean, T.J., Cao, Q.V., Roberts, S.D., Evans, D.L. 2009. Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature even-aged loblolly pine stand. – Forest Ecology and Management, 257, 126–133.
- Disney, M.I., Kalogerou, V., Lewis, P., Prieto-Blanco, A., Hancock, S., Pfeifer, M. 2010. Simulating the impact of discrete-return lidar system and survey characteristics over young conifer and broadleaf forests. – Remote Sensing of Environment, 114, 1546–1560.
- Drake, J.B., Dubayah, R.O., Clark, D.B., Knox, R.G., Blair, J.B., Hofton, M.A., Chazdon, R.L., Weishampel, J.F., Prince, S.D. 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. – Remote Sensing of Environment, 79, 30–319.

- Frey, T. 2009. Stand structure links up canopy processes and forest management. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 51, 40–48.
- Hall, S.A., Burke, I.C., Box, D.O., Kaufmann, M.R., Stoker, J.M. 2005. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. – *Forest Ecology and Management*, 208, 189–209.
- Heritage, G.L., Large, A.R.G. 2009. Principles of 3D Laser Scanning. – Heritage, G.L., Large, A.R.G. (eds.). *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, 21–34.
- Heurich, M. 2008. Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park. – *Forest Ecology and Management*, 255, 2416–2433.
- Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B. 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS level 1 and level 2 DEMs. – *Remote Sensing of Environment*, 84, 295–308.
- Holmgren, J., Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. – *Remote Sensing of Environment*, 90, 415–423.
- Howard, J.A. 1991. *Remote Sensing of Forest Resources. Theory and application*, London, Chapman & Hall. 420 pp.
- Jennings, S.B., Brown, N.D., Sheil, D. 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. – *Forestry*, 72, 59–74.
- Kato, A., Moskal, L.M., Schiess, P., Swanson, M.E., Calhoun, D., Stuetzle, W. 2009. Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data. – *Remote Sensing of Environment*, 113, 1148–1162.
- Kiviste, A. 1997. Eesti riigimetsa puistute kõrguse, diameetri ja tagavara vanuseridade diferentsumudel 1984–1993. a. metsakorralduse takseerikirjelduste andmeil. (Difference equations of stand height, diameter and volume depending on stand age and site factors for Estonian state forests on the basis of 1984–1993 forest inventory data). – *Teadustööde kogumik, Eesti Põllumajanduslikool*, 189, 63–75. (In Estonian with English summary).
- Korhonen, L., Korpela, I., Heiskanen, J., Maltamo, M. 2011. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. – *Remote Sensing of Environment*, 115, 1065–1080.
- Krigul, T. 1968. *Laasimise rakendamisest metsamajanduses. (Practicing pruning in Forest Management)*. – *Eesti Põllumajanduse Akadeemia teaduslike tööde kogumik*, 50, 121–137. (In Estonian).
- Krigul, T. 1972. *Metsatakseerimine. (Forest mensuration)*. Tallinn, Valgus. 358 pp. (In Estonian).
- Lang, M. 2010. Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga. (Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 52, 5–17. (In Estonian with English summary).
- Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J. 2012. Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia. (Lennukilidari ja spektraalse kaugeireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 56, 27–41.
- Large, A.R.G., Heritage, G.L. 2009. *Laser Scanning – Evolution of the Discipline*. – Heritage, G.L., Large, A.R.G. (eds.). *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, 1–20.
- Leica. 2007. *Leica ALS50-II. Airborne laser scanner product specifications (760344en-V.07-INT)*. Leica-Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland. 12 p.
- Liang, S. 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 543 pp.
- Lõhmus, E. 2004. *Eesti metsakasvukohatüübid. (Estonian habitation types)*. Eesti Loodusfoto, Tartu. 80 pp. (In Estonian).
- Marklund, L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey, Report 43.
- McGaughey, R.J. 2010. *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. March 2010 – FUSION, Version 2.80. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.
- Næsset, E. 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52, 49–56.
- Næsset, E. 1997b. Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data. – *Remote Sensing of Environment*, 61, 246–253.
- Næsset, E., Økland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. – *Remote Sensing of Environment*, 79, 105–115.
- Nilson, A. 2005. Fitness of allometric equation $N = aD^b$ and equation $N = (a + bD)^{-2}$ for modelling the dependence of the number of trees N on their mean diameter D in yield tables. (Allomeetria võrandi $N = aD^b$ ja võrandi $N = (a + bD)^{-2}$ sobivusest puude arvu N ja nende keskmise diameetri D seose kirjeldamiseks metsa kasvukäigu tabelites). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 43, 159–172.
- Nilson, T., Kuusk, A. 2004. Improved algorithm for estimating canopy indices from gap fraction data in forest canopies. – *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 157–169.

- Pärt, E. 2013. Personaalne vestlus Keskkonnaagentuuri metsaosakonna juhatajaga. (Interview with The Estonian Environment Agency forest department chairman).
- Patenaude, G., Hill, R.A., Milne, R., Gaveau, D.L.A., Briggs, B.B.J., Dawson, T.P. 2004. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. – *Remote Sensing of Environment*, 93, 368–380.
- Popescu, S.C., Zhao, K. 2008. A voxel based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. – *Remote Sensing of Environment*, 112, 767–781.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Condés, S., González-Matesanz, J., Ustin, S.L. 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. – *Remote Sensing of Environment*, 92, 345–352.
- Vain, A., Yu, X., Kaasalainen, S., Hyypä, J. 2010. Correcting airborne laser scanning intensity data for automatic gain control effect. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 511–514.
- Valentine, H.T., Mäkelä, A. 2005. Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. – *Tree Physiology*, 25, 769–779.
- Vaus, M. 2005. Metsatakseerimine. (Forest mensuration). OÜ Halo kirjastus, Tartu. 178 pp. (In Estonian).
- Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68–82.
- Yao, W., Krzystek, P., Heurich, M. 2012. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. – *Remote Sensing of Environment*, 123, 368–380.
- Zarnoch, S.J., Bechtold, W.A., Stolte, K.W. 2004. Using crown condition variables as indicators of forest health. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 1057–1070.
- Zhao, K., Popescu, S., Meng, X., Pang, Y., Agca, M. 2011. Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. – *Remote Sensing of Environment*, 115, 1978–1996.

A simple model to estimate forest canopy base height from airborne lidar data

Tauri Arumäe and Mait Lang

Summary

Airborne laser scanning (ALS) is widely used for topological mapping, urban planning (Large & Heritage, 2009) and even archeological studies (Crutchley, 2009). During the last two decades ALS has been used to estimate forest structural characteristics (Næsset, 1997a; Næsset, 1997b; Lang, 2010).

ALS data (Leica ALS50-II) from Järvelja (flight in 2010), South-East Estonia, and Aegviidu (flight in 2008), North-Estonia, test sites (Table 1) was used. Field measurements of tree crown base height were carried out in 2010 in Järvelja and in 2012 in Aegviidu. The lidar data based estimate of canopy base height (H_{VL}) for each forest stand was calculated with the model (1) using the mode value (H_{Mood}) and half of the standard deviation (H_{Stddev}) of the lidar pulse reflection height distribution. The near to ground reflections with the height $h_r \leq 0.5$ m were excluded, to ensure a unimodal height distributions (Figure 2). In Järvelja, the stand canopy base height (H_{VA}) was calculated as the average of the crown-base height (h_{vm} , Figure 1) of ten sample trees. The H_{VA} in Aegviidu was calculated using two or three h_{vm} per sample plot, with the total of eight to twelve sample plots per

stand. Simple linear regression was then used to analyze relationships between the measured stand H_{VA} and lidar data based H_{VL} . The influence of forest understory vegetation to the H_{VL} estimations was tested by using reflections with height $h_r \geq 0.5$ m, $h_r \geq 1.0$ m and $h_r \geq 1.5$ m. The dependence of the H_{VL} to H_{VA} relationship on the stand main species (coniferous or deciduous) was analyzed. The regression models were cross-validated on test sites.

The stand canopy base height (H_{VL}) had strong linear relationship to H_{VA} , since coefficient of determination was over 0.8. There was no significant impact on H_{VL} if the lower reflections of point cloud were excluded with the additional filters (Table 2). The H_{VL} was not dependent on main species of forest (Table 3, Figure 4).

The cross-validation of models H_{VL_3} and H_{VL_6} (Table 2) revealed the 1.33 m overestimation of H_{VL} in Aegviidu and the 1.42 m underestimation of H_{VL} in Järvelja. It was, however, concluded that the models are not site specific (Figure 4). This hypothesis is confirmed by the relationship similarities of forest stand canopy base height and stand mean diameter in both test-sites. The differences may have been caused by the four years time gap between the lidar measurements and in-situ data gathering.

Received November 11, 2013, revised January 20, 2014, accepted March 5, 2014