



Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga

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

Arumäe, T., Lang, M. 2016. ALS-based wood volume models of forest stands and comparison with forest inventory data. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 64, 5–16. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. Airborne laser scanning (ALS) based standing wood volume models were analysed in two contrasting test sites with different forest types in Estonia. In Aegviidu test site main tree species are Scots pine and Norway spruce and Laeva test site is mainly dominated by deciduous species. ALS data measurements were carried out for Aegviidu in 2008 and for Laeva in 2013. Approximately 450 sample plots were established additionally to the forest inventory dataset in both test sites. Exclusive to the sample plots, 46 stands were measured in 2012 in Aegviidu for stand level model. The sample plot-based model standard error in Aegviidu was $S_e = 59.8 \text{ m}^3/\text{ha}$ (22%) and in Laeva $S_e = 69.2 \text{ m}^3/\text{ha}$ (29%). The stand-level model based on 46 measured stands from Aegviidu had $S_e = 38.4 \text{ m}^3/\text{ha}$. Based on the models a cross-validation between the two test sites was carried out and systematic differences between the two test sites were found. The reasons are related to differences in optical properties of trees, crown shapes, flight configuration and canopy cover even though the sample plot based models included ALS-based canopy cover variable. The ALS-based wood volume estimate was also compared to forest inventory (FI) data and systematically larger estimates compared to FI dataset in both test sites were found. This average systematic error increased substantially (by $100 \text{ m}^3/\text{ha}$) for stands with volume over $250 \text{ m}^3/\text{ha}$. It was also detected that a model developed on small point clouds drawn for sample plots may produce systematic errors when applied to stand-level point clouds.

Key words: airborne lidar data, standing wood volume, forest inventory data, point cloud size.

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

Sissejuhatus

Aerolidari (ALS) andmed on laialdast kasutust leidnud praktilises metsanduses – nii saab ALS andmetelt hinnata metsade puidu tagavara (Næsset, 2002; Salas *et al.*, 2010; Bouvier *et al.*, 2015), kõrgust (Næsset, 1997; Næsset & Bjercknes, 2001), võraalguse kõrgust (Arumäe & Lang, 2013) ja seeläbi planeerida majandustegevust. ALS-mõõdistamisega Eestis alustas Maa-amet aastal 2008. Kogu ala mõõdistatakse regulaarselt

nelja-aastase tsükliga, mis tähendab, et aastaks 2015 oli kogu riik kaetud korduva te laserandmetega (LiDAR kõrguspunktid, 2015).

Üksiku puu tagavara all mõistetakse enamasti puu tüve mahtu koos koorega, kännu kõrgusest ladvani, ilma okste mahuta (Krigul, 1972; Vaus, 2005). Puistu tagavara (M) on defineeritud kui kõigi elusate, üle 1,3 meetri kõrguste puude mahtude summa. Puistu tagavara on üks olulisemaid metsa struktuuri kirjeldavaid

tunnuseid metsade majandamise planeerimisel, majandusliku väärtuse hindamisel ning on otseselt kasutatav taimkattesesse seotud süsiniku hindamiseks (Neumann *et al.*, 2016). Puutüve mahu arvutamiseks kasutatakse erinevaid mudeleid, mille hinnangud ei lange alati kokku (Krigul, 1972; Ozolinš, 2002; Padari *et al.*, 2009). Kõige lihtsamal juhul võiks puutüve ette kujutada koonusena, mille mahu saab arvutada tüve rinnasläbimõõdu (d) ja kõrguse (h) järgi. Siiski erineb puu tüvi koonusest üsna palju ja seetõttu kasutatakse funktsioone, mis reaalsete puude tüve kuju paremini lähendavad (Ozolinš, 2002; Metsa korraldamise..., 2009). Puistu tüvemahu ehk puidu tagavara hindamine ALS punktivilvest põhineb selle pilve punktide meetrikute (Næsset, 1997; Lang *et al.*, 2012; Maack *et al.*, 2016) ja metsas mõõdetud proovitükkidelt saadud puistu takseertunnuste seostel. Punktivilve meetrikute (peegelduste kõrgusjaotuse protsentiilid, peegelduste suhteline vertikaalne jaotus jm) ning proovitükkidel mõõdetud puistu takseertunnustele tuginedes koostatakse mudelid, mida saab lausaliselt punktivilvel rakendada.

Aerolidari andmestik annab meile võimaluse uuendada kunagi kutseliste taksaatorite koostatud ja andmebaasidesse salvestatud takseerkirjeldusi, mis on olnud metsa majandamise kava aluseks. Metsa-majandusekava aluseks olevaid andmeid kontrollivad Keskkonnaagentuuri audiitorid (Metsaressursi arvestuse..., 2016) ja seejärel kantakse takseerkirjeldused Metsaressursi arvestuse riikliku registri andmebaasi (edaspidi Metsaregister; Metsaressursi arvestuse..., 2016). Kui andmed on registrisse lisatud, siis tavaliselt ei uuendata kirjeid peale planeeritud majandusotsuste teostamist, vaid alles peale järgmiste metsa majandamise soovitude koostamist. Keskmine vanus Metsaregistri kirjetel on viis aastat (Pärt, 2010), lisaks on takseerandmetes vigaseid kirjeid. Aerolidari andmed uuenevad Maa-ameeti lennuplaanide järgi iga 4–5 aasta järel

(LiDAR kõrguspunktid, 2015), mistõttu tagab see palju ajakohasema ülevaate meie metsaressurssidest.

Teisalt on statistilise metsainventuuri (SMI) raames selgunud, et Metsaregistris olevate takseeritud eraldiste tagavara on süstemaatiliselt alla hinnatud, võrrelduna SMI andmetega (Pärt, 2010). SMI käigus mõõdetakse Eestis aastas metsamaal umbes 2300 proovitükki (Adermann, 2010), eesmärgiga saada Eesti metsadest ja maa-kasutusest üldine ülevaade. SMI ja takseerimise tulemusel saadud puidu tagavara hinnangute süstemaatilise erinevuse põhjuseks on erinev meetodika – kui proovitükkidel põhinev SMI andmestik saadakse instrumentaalse mõõtmisega, siis takseerimisel tuginevad väljaõppinud taksaatorid võimalusel varasematele takseerandmetele ja silmamõõdulisele hinnangule (Raudsaar *et al.*, 2014). Varasemate takseerandmete kasutamine mõjutab aga paratamatult taksaatorit tema hinnangutes ja tulemus võib olla nihutatud (Raudsaar *et al.*, 2014). Võrreldes proovitükkide mõõtmisega kasutavad taksaatorid mõõteriistadest vajadusel vaid Bitterlichi relaskoopi rinnaspindala hindamiseks ja kõrgusmõõtjat, et mõnel mudelpuul mõõta kõrgus. Lisaks mõõdetakse mõnel mudelpuul rinnasdiameeter, kuid sellega üldjuhul mõõtmised piirduvad. Kuna ALS-andmetel põhinevad mahumudelid on lähendatud SMI-sarnase mõõtmismetoodikaga tehtud proovitükkidelt, siis võib eeldada Metsaregistri ja ALS-andmetel põhinevates tagavarade hinnangutes samuti süstemaatilisi erinevusi.

Uurimuse eesmärgiks on anda ülevaade aerolidari andmetel põhinevatest puistu tüvemahu hindamise mudelitest ning võimalikest probleemidest nende kasutamisel. Analüüsis võrreldi omavahel kahe erineva katseala, Laeva ja Aegviidu proovitükkide andmetel koostatud mudeleid ja rakendati neid mudeleid ka eraldiste kaupa ning võrreldi tulemusi takseerandmetes olevate puistute takseerimisel saadud tüvemahu hinnangutega.

Materjal ja meetodika

Katsealad

Antud uurimuses on kasutatud kahe katseala andmeid – Aegviidu (EPSG:3301, 6572701 N; 587333 E) ja Laeva (EPSG:3301, 6490854 N; 642472 E). Aegviidu katseala (joonis 1) rajati aastal 2008 (Anniste & Viilup, 2011). Katsealade suuruseks valiti 15×15 km. Aegviidus oli takseerandmetega kaetud 76% alast ning domineerivaks puuliigiks oli harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.). Kokku mõõdistati Aegviidu katsealal 452 ringproovitükki, raadiusega 8–15 meetrit. Laeva katseala (Lang *et al.*, 2014) rajati 2013. aastal sarnaselt Aegviiduga. Laeva katseala pindalast 52% on takseerandmetega mets ja domineerivateks puuliikideks on arukask (*Betula pendula* Roth) ning harilik haab (*Populus tremula* L.). Laeva katsealal mõõdeti 405 proovitükki. Mõlemal katsealal rajati proovitükid eraldise homogeensesse ossa, mis kirjeldaks eraldise keskmist kõige paremini. Proovitükid jagati puistutesse testala puistute liigilise koosseisu jagunemisega võrdeliselt.



Joonis 1. Laeva ja Aegviidu katsealad.
Figure 1. Laeva and Aegviidu test sites.

Lisaks 452 ringproovitükile tehti Aegviidu katsealal 2012. aastal uued mõõtmised eraldisepõhiseks analüüsiks. Valimis oli 46 eraldist, igasse eraldisse rajati 8–12 ringproovitükki sõltuvalt eraldise pindalast. Proovitükid olid raadiusega 8–15 meetrit lähtudes Bitterlichi lihtrelaskoobi loendist. Proovitükid olid paigutatud vähemalt 50-meetrite piki- ja külgvahedega määratud käigujoontele. Hiljem arvatati proovitükkide keskmistena eraldiste tagavarade hinnangud, mida kasutati eraldiste piiride järgi välja lõigatud punktipilvel põhineva mudeli lähendamiseks.

Aerolidari andmed

ALS-mõõtmised katsealadel tegi Maa-amet laserskanneri Leica ALS50-II. Aegviidu katseala skaneeriti 2008. aasta suvel (lennukuupäevad: 11.07, 27.07, 01.09). Andmetihedus laserandmetel oli 0,45 peegeldust/ m^2 , lennukõrgus oli 2400 m, proovitükkide esimeste peegelduste ja kõikide peegelduste suhtearv oli 0,71. Laeva katsealal lennati suvel 2013 (13.07) ja andmetihedus oli 2,0 peegeldust/ m^2 , lennukõrgus oli 1550 m, proovitükkide esimeste ja kõigi peegelduste suhtearv oli 0,78.

Aerolidari andmete töötlemiseks kasutati vabavara FUSION (McGaughey, 2014). Laserandmetest filtreeriti esmalt maapinnalähedased peegeldused, kasutades FUSIONi moodulit GroundFilter ning koostati mooduliga GridSurfaceCreate maapinna kõrgusmudel (DTM – digital terrain model). Seejärel lahutati DTM peegelduste üldisest punktipilvest ClipData mooduliga. Maapinna kõrguse suhtes normeeritud punktipilvest lõigati metsaeraldiste piiride või proovitüki tsentrite koordinaatide ning raadiuse järgi peegelduste andmes-tikud (moodul PolyClipData). Eraldatud pilvedele arvatati pilve kirjeldavad meetrikud mooduliga CloudMetrics. Aegviidus mõõdetud 46 eraldise piirid puhverdati 10 meetrit sisse välistamiseks tulemustes piirivigu.

Puistu tagavara (M) hindamiseks aerolidari andmetest kasutati puistu kõrgusel

(H), rinnaspindalal (G) ja vormiarvul (F) põhineva tüvemahu hindamise valemi (Krigul, 1972)

$$M = G H F \quad (1)$$

analooigi varasemast uuringust (Lang *et al.*, 2012)

$$M_{ALS} = (a P_{80}^b + c P_{25}) K^d, \quad (2)$$

kus P_{80} – lidari peegelduspilve kõrgusjaotuse 80-protseentil;

P_{25} – lidari peegelduste kõrgusjaotuse alumine kvartiil;

K – katvuse hinnang (Lang, 2010) arvatuna 1,3 meetri kõrgusel referentsnivool;

a, b, c, d – katseala proovitükkidelt lähendatud mudeli parameetrid.

Võrreldes Lang *et al.* (2012) uurimusega, täpsustati Aegviidu puistute kõrguskõveraid proovitükkidel, mistõttu lähendati ka uued parameetrid tüvemahu mudelile (2). Parameetrite lähendamiseks kasutati tarkvara R programmi nls (R Core Team, 2014).

Mahumudeli vigade analüüsiks võrreldi esmalt 46 Aegviidu eraldise aerolidari andmetest hinnatud metsa kõrgust (H_{ALS}) ja mõõdetud metsa kõrgust, kuna punktipilve kõrgusjaotuse ülemised protseentilid on mahumudelis (2) kõige olulisema kaaluga. H_{ALS} arvutamiseks kasutati P_{80} analoogselt Lang *et al.* (2012) uurimusele ja metsa kõrgus ALS-andmetelt arvatati valemiga

$$H_{ALS} = a P_{80} + b. \quad (3)$$

Aegviidu uuendatud proovitükkide andmete põhjal lähendati puistu kõrguse mudelile (3) samuti uued parameetrid $a = 0,99$ ($S_{e,a} = 0,02$) ja $b = 1,11$ ($S_{e,b} = 0,27$) ning saadi mudel determinatsioonikordajaga $R^2 = 0,94$ ja lähendi jääkviga $S_e = 1,53$ m. Võrdlusandmetena kasutatud 46 eraldise mõõdetud kõrgused arvatati 2012. aastast kasvumudelitega (formis.emu.ee, mudel 9; Kiviste, 1999) 2008 aastasse, mil tehti lidar-mõõdistus.

Takseerandmestik

Metsaregistri andmestik Laeva katsealale pärineb aastast 2013 ning Aegviidu katsealale aastast 2011. Mõlemal katsealal korrigeeriti puistute tagavara lasermõõdistuse aastasse juurdekasvu mudeliga (formis.emu.ee, mudel 179; Metsa korraldamise juhend, 2006). Keskmise aastane tüvepuudu juurdekasv Laeva eraldistel oli 5,9 m³/ha/a ja Aegviidus 5,1 m³/ha/a. Aegviidu katseala takseerandmestikus oli kokku 11631 eraldise kirjet ning Laeva katseala jaoks olid 4549 eraldise andmed. Eraldise tagavara (M_{Mreg}), mida võrreldi M_{ALS} -ga, arutati I ja II rinde mahtude summana.

Andmetest eemaldati enne võrdlust ilmselgete vastuolude ja vigadega kirjed (piiriveast tingitud erinevused, vananenud andmed, osaliselt uuendamata vms), kus erinevused takseeritud tüvemahu ja ALS-põhise hinnangu vahel olid väga suured (Aegviidus ca 1000 kirjet, Laeva katsealal ca 300 eraldise kirjet).

Veahinnangud

Keskmine hinnangu viga (MEE) on arvatud valemiga

$$MEE = \sum(XY)/N, \quad (4)$$

kus X on argument, Y on funktsioonitunus ja N on valimi maht.

Ruutkeskmise viga ($RMSE$) on arvatud valemiga

$$RMSE = \sqrt{\sum(X - Y)^2 / N}, \quad (5)$$

kus X on argument, Y on funktsioonitunus ja N on valimi maht.

Eraldi katsena mõlemal testalal koostati mudelite valideerimiseks 1000 mudelit võttes iga mudeli koostamiseks juhuslikult umbes pooled proovitükkidest. Mudelit valideeriti iga kord samal katsealal valimist välja jäänud proovitükkidel. Igale uuele mudelile arvatati hinnangu keskmine viga ja ruutviga ja kõikide katsete põhjal saadi vigade 95%-lised usalduspiirid.

Tulemused

ALS-mudelid tagavara hindamiseks

Aegviidu ja Laeva katsealal hinnati proovi-tükkide põhjal mudelile (2) parameetrid ja saadi vastavalt mudelid M_{ALS_Aegv} ja M_{ALS_Laeva} (tabel 1). Aegviidus mõõdetud 46 eraldisele lähendati eraldi mahumudeli (2) parameetrid ja saadi mudel M_{ALS46} .

Tüvemahu mudelite mõju tagavara hinnangule

Aegviidu katseala takseeritud tüvemahu (M_{Mreg_Aegv}) ja aerolaserskaneerimise and-

metelt arvatud tüvemahu (M_{ALS_Aegv}) võrdlusest (joonis 2a) selgus, et takseeritud mahud on süstemaatiliselt alla hinnatud ja alates puistute tüvemahust 250 m³/ha see vahe suureneb. Keskmise M_{Mreg_Aegv} ja M_{ALS_Aegv} erinevus alla 250 m³/ha tagavaraga eraldistes oli 29 m³/ha ja üle 250 m³/ha tagavaraga eraldistes 158 m³/ha. Ka Laeva puistute takseeritud tagavara (M_{Mreg_Laeva}) oli võrreldes ALS-andmetelt arvatutuga (M_{ALS_Laeva}) süstemaatiliselt väiksem (joonis 2b). Laeva katsealal olid erinevused vastavalt alla ja üle 250 m³/ha tüvemahuga eraldistes 18 m³/ha ja 116 m³/ha. Sarnast

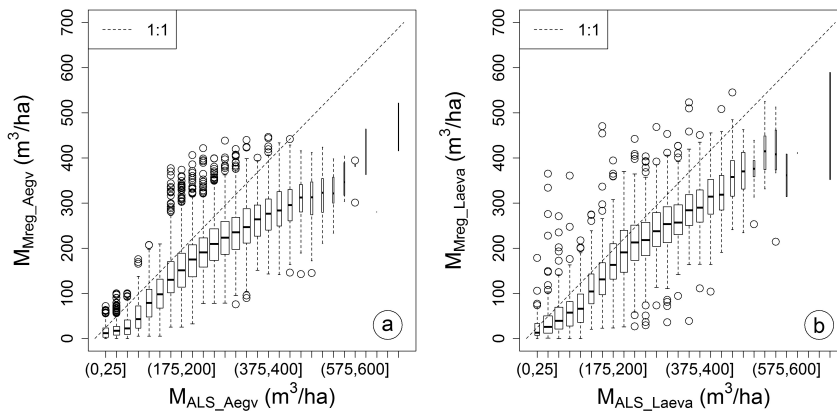
Tabel 1. Aegviidu ja Laeva puistute ALS-põhise mahumudeli (2) parameetrid ja standardvead (S_e).

Table 1. Parameters and standard errors (S_e) of wood volume model (2) for Aegviidu and Laeva test sites.

Katseala / Test site	Mudel / Model	S_e , m ³ /ha ⁻¹	Parameetrid / Parameters							
			<i>a</i>	<i>S_e</i>	<i>b</i>	<i>S_e</i>	<i>c</i>	<i>S_e</i>	<i>d</i>	<i>S_e</i>
Aegviidu	<i>M_{ALS_Aegv}</i>	59,8	3,48	0,96	1,55	0,08	9,22	1,76	1,08	0,07
Laeva	<i>M_{ALS_Laeva}</i>	69,2	0,58	0,26	1,91	0,12	9,06	1,27	0,17	0,12
Aegviidu 46 eraldist	<i>M_{ALS46}</i>	38,4	2,10	1,35	1,71	0,18	3,99	4,41	0,91	0,20

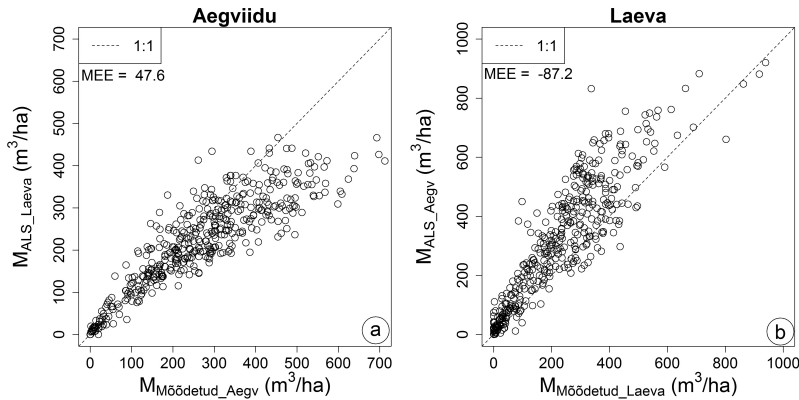
* Kursiivis toodud parameetrid on statistiliselt mitteolulised ($p > 0,05$).

* Parameters in italic are not statistically significant ($p > 0.05$).



Joonis 2. Karpdiagrammidel ilmneb nii Aegviidu (a) kui Laeva (b) metsade takseeritud tagavara (M_{Mreg_Aegv} , M_{Mreg_Laeva}) süstemaatiline erinevus ALS-põhiselt hinnatud puistute tüvemahust (M_{ALS_Aegv} , M_{ALS_Laeva}).

Figure 2. There is a systematic difference of Aegviidu (a) and Laeva (b) forest management inventory data-base stand volume (M_{Mreg_Aegv} , M_{Mreg_Laeva}) from ALS-based stand volume estimates (M_{ALS_Aegv} , M_{ALS_Laeva}).



Joonis 3. Mudelite (M_{ALS_Laeva} , M_{ALS_Aegv}) ristvalideerimine Aegviidu (a) ja Laeva (b) katseala proovitükkidel mõõdetud tüvemahu andmetel ($M_{Möödetud_Aegv}$, $M_{Möödetud_Laeva}$).

Figure 3. Cross-validation of Aegviidu (a) and Laeva (b) models (M_{ALS_Laeva} , M_{ALS_Aegv}) by using measured standing wood volume from sample plots ($M_{Möödetud_Aegv}$, $M_{Möödetud_Laeva}$).

süsteematilist erinevust võrreldes Metsaregistri andmetega on käsitlenud ka Lang *et al.* (2014) ja Raudsaar *et al.* (2014).

Selgitamaks mahumudeli rakendatavust väljaspool katseala, ristvalideeriti Aegviidu ja Laeva ALS-põhiseid tagavara mudelid. Selgus, et Aegviidus mõõdetud proovitükkide tagavarad ($M_{Möödetud_Aegv}$) on neile Laeva mudeliga (M_{ALS_Laeva}) arvatust süsteematiliselt suuremad ($MEE = 47 \text{ m}^3/\text{ha}$) ja keskmine ruutviga ($RMSE$) on $92 \text{ m}^3/\text{ha}$ (joonis 3a). Võrdluseks sama katseala piires koostatud ja rakendatud ALS-põhised tagavara mudelite veahinnangute 95%-lised usalduspiirid olid $55RMSE66 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja $11MEE11 \text{ m}^3/\text{ha}$. Laeva katsealal mõõdetud proovitükkide tagavarad ($M_{Möödetud_Laeva}$) olid süsteematiliselt väiksemad ($MEE = 87 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja $RMSE = 128 \text{ m}^3/\text{ha}$) neile Aegviidu mudeliga (M_{ALS_Aegv}) saadud hinnangutest. Võrdluseks sama katseala piires koostatud ja rakendatud ALS-põhised tagavara mudelite veahinnangute 95%-lised usalduspiirid olid $65RMSE78 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja $12MEE13 \text{ m}^3/\text{ha}$.

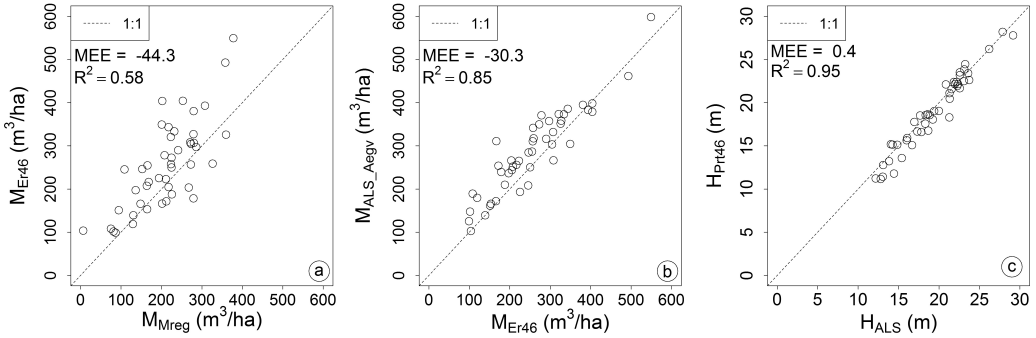
Nii nagu ainult proovitükkidele tugineva mudeli puhul, olid Aegviidus mõõdetud 46 eraldise tagavarad (M_{Er46}) suuremad eraldise takseeritud tagavarast (M_{Mreg})

($MEE=44,3 \text{ m}^3/\text{ha}$). Kui neile 46 eraldisele arutati tüvemahud mudeliga M_{ALS_Aegv} siis saadi süsteematiliselt suurem hinnang võrreldes mõõdetuga ($MEE = 30,3 \text{ m}^3/\text{ha}$) (joonis 4b). Rakendades aga nende 46 eraldise piires tehtud punkt pilve väljavõtetel koostatud mudelit Aegviidu katseala kõikidel proovitükkidel, saadi vastupidine süsteematiline tüvemahu hinnangu nihe.

Tüvemahu hindamisel võib süsteematiline viga tekkida, kui metsa kõrgus on ühesuunaliselt ja pidevalt alla või üle hinnatud. Aegviidu katsealal 46 puistu kõrgus (H_{Pri46}) on aga tugevas korrelatsioonis ($R^2 > 0,95$) aerolidarilt saadud metsa kõrguse hinnanguga (H_{ALS}) ja kahe hinnangu kooskõla kinnitab ka üsna väike $MEE = 0,4$ meetrit (joonis 4c).

Arutelu

Uurimuse tulemustest selgus, et proovitükkide lasermõõdistuse andmetel põhinevad tüvemahu mudelid annavad sarnaselt SMI tulemustega Metsaregistri takseerandmetes olevast tüvemahust süsteematiliselt suuremaid hinnanguid. Põhjused on paljuski samad, kuid aerolidari andmete



Joonis 4. Aegviidu 46 eraldise andmetel tehtud võrdlused: a) mõõdetud (M_{Er46}) ja takseeritud tagavara (M_{Mreg}); b) ALS-põhine mudel (M_{ALS_Aegv}) (tabel 1) ja mõõdetud tagavara (M_{Er46}); c) eraldistel mõõdetud kõrgus (H_{Prt46}) ja ALS-põhine puistu kõrgus (H_{ALS}).

Figure 4. Aegviidu 46 stands: a) measured (M_{Er46}) and forest inventory database (M_{Mreg}) wood volume; b) ALS-based (Table 1) (M_{ALS_Aegv}) and measured wood volume (M_{Er46}); c) measured stand height (H_{Prt46}) and predicted stand height (H_{ALS}) with test site model.

kasutamisel tuleb arvesse võtta veel muidki võimalikke veaallikaid.

Esimene võimalik veaallikas on mudelite koostamiseks kasutatud proovitükide asukohatäpsus. Siiski on põhjust arvata, et proovitükile tema raadiuse ja tsentri asukoha koordinaatide järgi eraldatud aerolidari punktipilve asukohaviga on juhuslikku laadi ning tõenäoliselt selle vea tulemusel muutuvad mudelite lähendite jääkhälbed suuremaks ja hinnangutes olulisi süstemaatilisi vigu ei teki. Kui võtta lisaks arvesse eeskiri, millest lähtuvalt paigutati kõik mõõdetud proovitükid eraldise homogeensesse ossa ja piirist oluliselt sissepoole, siis tsentri asukoha 5–10 meetrise vea korral kõrgushinnangud oluliselt ei varieeru (Lang *et al.*, 2012).

Teine veaallikas on proovitükkide punktipilvede põhjal arvatud peegelduste kõrgusjaotuse protsentilide ja katvuse hinnangute võimalik süstemaatiline erinevus võrreldes suurte punktipilvede samade meetrikutega. Varasemas uuringus rakendasid Arumäe & Lang (2016) proovitükkidelt lähendatud metsa kõrgusmudelit 50 ha suurustele punktipilvedele ning tulemustest selgus, et see põhjustab kõrgushinnangutes süstemaatilise erinevuse.

Peamiseks põhjuseks toodi suure punktipilve heterogeensus –50 ha suurusega punktipilve jääb nii lagedaid alasid kui 30-meetrise kõrgusega metsi, ning kõrgusprotsentiili abil selle pilve kirjeldamine ei pruugi olla kõige parem lahendus. Punktipilve suuruse mõju tuli ilmsiks ka antud uurimuses (joonis 4b). Lisaks punktipilve suurusele avaldab arvatavasti mõju ka erinev mõõtmismetoodika proovitükil ja eraldisel. Kui kogu testala mudeli koostamiseks rajatud proovitükid paigutati eraldise sisse, homogeensesse ossa, siis Aegviidu 46 eraldises paigutati proovitükid kindla vahemaa järgi, olenemata asukoha homogeensusest. Seejärel arvutati mõõdetud proovitükkide pealt eraldiste keskmised takseertunnused. Kui aga proovitükid paigutada metsa nii, et välditakse häile, siis võibki mudelisse tekkida positiivne viga tüvemahu ennustamisel. See ga tuleks suurtele aladele läheneda pigem rastripõhiselt, kus igale väiksele pikslile saab takseertunnuseid arvutada väikse pilve mudeliga, sest väiksematel punktipilvedel väljavõtetel kajastub metsa heterogeensus täpsemalt.

Mudelite eraldiste kaupa rakendamisel mõjutavad tulemust piirivead. Teadaolevalt

võivad eraldiste piirivead olla kuni 10 meetrit ning näiteks paari meetri kõrguse noorendiku kõrval olevad kõrged puud võivad tekitada aerolidari andmetelt kõrguse hindamisel positiivse vea. Sarnaselt mõjuvad noorendikesse jäetud üksikud seemne- ja säilikpuud. Niisamuti võivad piiri- ja asukohavead väikese pindalaga või väga kitsaste ja ebakorrapäraste eraldiste kõrgushinnangut süstemaatiliselt kahandada, kui kõrval peaks olema lage ala. Kuna aerolidari mahumudel (2) on kõige olulisema kaaluga P_{80} ehk 80-kõrgusprotsentiil, siis on meetodika tundlik kõrgushinnangu vigadele (ühe meetrine kõrguse ülehindamine tähendab hektari tagavara hinnangu kasvu mudeliga M_{ALS_Aegv} 25 kuupmeetri võrra). Punktipilve kõrgusjaotuse hinnangut mõjutab kauduvalt puistu tihedus ja sellest tulenev võrastiku katvus. Näiteks kui sajast aerolidari impulsi peegeldusest kümme pärinevad piirivea tõttu naabereraldisel kõrgematelt puudelt, siis P_{80} sellest tõenäoliselt ei muutu, kuid P_{90} puhul saavad just need kümme punkti määravaks. Katvuse hinnanguid mõjutavad aga ka peegelduste valik (Lang 2010) kui ka skaneerimisnurk (Korhonen *et al.*, 2011) ja impulsi jagunemine. Katvuse stabiilse hinnangu saamine eeldab vähemalt 300 punkti proovitüki kohta (Rautiainen *et al.*, 2005), mis standardse Maa-ameti ALS andmetiheduse juures nõuaks vähemalt 25 m suuruse piksli kasutamist. Samas suuremate piksli puhul tekivad puistute servades piirivigade probleemid. Metsakorralduse tarbeks tehtavate ortofotode saamiseks lennatakse kõrgemat, punkte on seetõttu hõredamalt (*ca* 0,2 peegeldust/ m^2) ja seega puistupõhine lähenemine on õigustatud.

Kõrgushinnangute võrdluse katses 46 eraldisel selgus aga, et mõõdetud ja aerolidarilt hinnatud kõrgused on omavahel tugevas korrelatsioonis (joonis 4c) ja arvutatud keskmine H_{ALS} oli keskmiselt ainult 0,4 meetrit mõõdetust kõrgem. See muudab kõrguse hinnangutest tingitud suure süstemaatilise vea vähetõenäoliseks. Lisaks

on aerolidaril põhinevasse puistu tüvema-hu mudelisse (2) lisatud võrastiku katvuse hinnang (K), mille eesmärgiks on puistu tihedusega arvestamine. Kuigi Laeva katsealal selgus, et katvus on mudelis väheoluline (tabel 1), ei ole katvuse mudelist välja jätmise mudeli loogikast lähtuvalt põhjendatud. Mudeli standardviga katvuse välja jätmisel oluliselt ei muutunud ning on alust arvata, et see aitab ka piirivigadest tingitud puistute kõrgushinnangute vigu vähendada.

Kahe katseala mudelite ristvalideerimisel selgus, et lehtpuu- ja okaspuumetsade jaoks ei sobi ühiseks mudeliks ei Laeva ega Aegviidu andmetel lähendatud mudel. Kui katseala siseselt olid mudeli valideerimisel veahinnanguid väikesed, siis teisele katsealale rakendades veahinnangud suurenesid oluliselt. Põhjuseks võib eelkõige välja tuua Laeva tihedad metsad, kus proovtükkidel arvutatud ALS-põhine keskmine võrastiku katvus oli 77%, aga Aegviidus oli keskmine ALS-põhine katvuse hinnang 66% ja erinevus on statistiliselt oluline ($p < 0,001$). Katvuse hinnangu küllastumisest tingituna on mudelis M_{ALS_Laeva} katvuse hinnang statistiliselt ebaoluline võrrelduna Aegviidu metsadega (tabel 1). Niisamuti on erinevatel liikidel erineva kujuga võrad, mis muudavad peegelduse tekkimist (Næsset, 2002). Seega oleks ALS andmetele tugineva tüvema-hu mudeli rakendamisel eelnevalt teada vaadeldava puistu liigilist koosseisu. Liigilise koosseisu määramist multispektraalsetelt satelliidipiltidelt näitasid Lang *et al.* (2014). Katvuse ja muude meetrikute hinnanguid võivad mõjutada nii puistute erinev keskmine peegeldustegur, mis skanneri Leica ALS50-II laserimpulsi sagedusel (1064 nm) on okasmetsas 0,15–0,20 ja lehtmetsas 0,30 (Kuusk *et al.*, 2013). Niisamuti mõjutab meetrikuid lennukõrgus, mis määrab impulsi suuruse maapeal (*footprint*) (Nicholas *et al.*, 2006). Lisaks kasutatakse ALS-mõõdistustel skanneri seadistustes automaatset tundlikkuse kontrolli (*automatic gain control* – AGC) (Vain *et al.*, 2010; Korpela

et al., 2013), mille mõju metsa jaoks saadud ALS-meetrikutele pole praktiliselt uuritud.

Omaette probleem on takseerandmete ja laser mõõdistamiste ajaline kokkusobivus. Takseerandmetes olev tüvemahu ennustati mahu juurdekasvu mudeli abil laser mõõdistamise aastasse, arvestades puistute inventeerimiskuupäevi. Selle tulemusel takseerandmetes oleva tüvemahu hinnangu ja aerolidari andmetelt saadud tüvemahu keskmine erinevus (*MEE*) ka hanes 25 m³/ha. Võib muidugi kahtlustada, et ka tüvemahu juurdekasvu mudel hindab mahu juurdekasvu alla. Siiski on näiteks Aegviidu 46 täpsemalt mõõdetud eraldise jaoks arvutatud juurdekasv 6,0 m³/ha/a isegi veidi suurem kui Raudsaar et al. (2014) avaldatud Eesti puistute keskmine (5,2 m³/ha/a).

Päris kõrvale ei saa jätta ka võimalust, et aerolidari andmete aluseks olevate proovitükkide mõõtmistes esinevad vead, mille tagajärjel saadakse süstemaatiliselt suurem tüvemahu hinnang, mis omakorda kandub edasi mudelisse. Sellised probleeme tekitavad vead võivad olla näiteks vale tüveläbimõõdu mõõtmise kõrgus, vead puistu kõrguskõveras või proovitüki piiripealsete puude kaasamises. Laeva ja Aegviidu katseala proovitükke mõõtsid paljud erinevad mõõtjad ja samasuunalise vea tekkimine on vähetõenäoline.

Käesolevas uurimuses välja töötatud mudelid sobivad eelkõige kasutamiseks Laeva ja Aegviiduga piirkonnaga sarnastes metsades ning Maa-ameti suvistel lendudel tehtud mõõtmisandmetel, kuna kevadistel topograafilistel lendudel on lehtpuumetsades oluliselt teistsugused peegeldusomadused. Niisamuti võib oletada, et mudelid võivad anda süstemaatilise veaga prognoosi Lääne-Eestis, kus metsadel on oluliselt teistsugune vormiarv (Padari, 1993).

Kokkuvõte

Töö tulemustest lähtuvalt saab teha kolm järgmist järeldust.

- Metsaregistris esitatud metsa tagavara on süstemaatiliselt alla hinnatud, võrreldes aerolidari andmetelt arvutatud tagavaraga. Allahindamine kasvab oluliselt eraldistes, kus tagavara on 250 m³/ha või enam. Peamiste põhjustena on välja toodud takseerimisandmete silmamõõduline hindamine ning aerolidari andmete puhul proovitükkide põhiste mudelite rakendamine suurematele aladele.
- Väikestel lidari punktipilvedelt saadud mudelid võivad eraldiste kaupa tehtud punktipilve väljavõtetele rakendades anda süstemaatilise veaga hinnanguid.
- ALS-andmetelt tuletatud metsa tagavara mudelid on soovitatav kasutada lokaalselt või sarnastele metsatüüpidele. Antud uurimuses leiti Laeva lehtpuupuistute ja Aegviidu okaspuupuistute vahel olulised erinevused metsade võrastike katvuses (Laeva metsade keskmine katvus oli 11% suurem), mistõttu mudelite ristvalideerimisel ilmnisid ka olulised metsa tagavara hinnangu erinevused.

Tänuavaldused. Aegviidu ja Laeva katseala andmete kogumist toetas Riigimetsa Majandamise Keskus. Andmeanalüüsi toetas Haridusministeeriumi institutsionaalne uurimustoetus IUT21-4. Autorid tänavad kolme anonüümset retsensenti kasulike märkuste eest. Tänu Lauri Korhonenile ingliskeelse teksti kommenteerimise eest.

Kasutatud kirjandus

- Adermann, V. 2010. Estonia (National forest inventory report). – Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R.E. (eds.). National forest inventories: pathways for common reporting (NFI reports section). Heidelberg, Springer, 171–184.
- Anniste, J., Viilup, Ü. 2011. Determination of forest characteristics with the laser scanning. (Metsa takseertunnuste määramisest laserskanneerimise abil). – Artiklid ja uurimused. Luua Metsanduskool, 10, 38–53. (In Estonian).
- Arumäe, T., Lang, M. 2013. A simple model to estimate forest canopy base height from airborne lidar data. (Puistu esimese rinde võrastiku alguse kõrguse hindamine lennukilidari mõõdistusandmete järgi). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 58, 46–56.
- Arumäe, T., Lang, M. 2016. A validation of coarse scale global vegetation height map for biomass estimation in hemiboreal forests in Estonia. – *Baltic Forestry*, 22(2). (In press).
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., Renaud, J.P. 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. – *Remote Sensing of Environment*, 156, 322–334.
- Kiviste, A. 1999. Estonian forest growth models. (Eesti puistute kasvumudelitest). – *Transactions of the Faculty of Forestry, Estonian Agricultural University, Continuous Forest Management Planning. (EPMÜ Metsandusteadukonna toimetised, Pidev metsa korraldus)*, 32, 28–36. (In Estonian).
- 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.
- Korpela, I., Hovi, A., Korhonen, L. 2013. Backscattering of individual LiDAR pulses from forest canopies explained by photogrammetrically derived vegetation structure. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 81–93.
- Krigul, T. 1972. Forest mensuration. (Metsatakseerimine). Tallinn, Valgus. 348 pp. (In Estonian).
- Kuusik, A., Lang, M., Kuusk, J. 2013. Database of optical and structural data for the validation of forest radiative transfer models. – *Kokhanovsky, A. (ed.). Light Scattering Reviews*, 7, Berlin, Heidelberg, Springer, 109–148.
- Lang, M. 2010. Estimation of crown and canopy cover from airborne lidar data. (Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga). – *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 kaugseireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal). – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 56, 27–41. (In Estonian with English summary).
- Lang, M., Arumäe, T., Lükk, T., Sims, A. 2014. Estimation of standing wood volume and species composition in managed nemoral multi-layer mixed forests by using nearest neighbour classifier, multispectral satellite images and airborne lidar data. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 61, 47–68.
- LiDAR kõrguspunktid. 2015. (LiDAR heightpoints). [WWW document]. – URL <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/LiDAR-korguspunktid-p499.html> [Accessed 15 March 2016]. (In Estonian).
- Maack, J., Lingenfelder, M., Weinacker, H., Koch, B. 2016. Modelling the standing timber volume of Baden-Württemberg – A large-scale approach using a fusion of Landsat, airborne LiDAR and National Forest Inventory data. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49, 107–116.
- McGaughey, R.J. 2014. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. March 2014 – FUSION, version 3.42. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.
- Metsa korraldamise juhend. 2009. (Forest management guide). Riigi Teataja, RT I, 24.11.2015, 6. (In Estonian).
- Metsaressursi arvestuse riikliku registri põhimäärus. 2016. (State register for accounting of forest resource). Riigi Teataja, RT I, 12.01.2016, 2. (In Estonian).
- Næsset, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 52, 49–56.
- Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. – *Remote Sensing of Environment*, 80, 88–99.
- Næsset, E., Bjerknæs, K.O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. – *Remote Sensing of Environment*, 78, 328–340.
- Neumann, M., Moreno, A., Mues, V., Härkönen, S., Mura, M., Bouriaud, O., Lang, M., Achten, W.M.J., Thivolle-Cazat, A., Bronisz, K., Merganič, J., Decuyper, M., Alberdi, I., Astrup, R., Mohren, F., Hasenauer, H. 2016. Comparison of carbon estimation methods for European forests. – *Forest Ecology and Management*, 361, 397–420.
- Nicholas, R.G., Nicholls, C.C., Culvenor, D.C. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. – *Remote Sensing of Environment*, 103, 140–152.
- Ozolinš, R. 2002. Forest stand assortment structure analysis using mathematical modelling. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 37, 33–42.

- Padari, A. 1993. Relationship between distance from sea and stand variables of Scots pine in Hiiumaa. (Hiiumaa männikute takseertunnuste sõltuvusest mere kaugusest). BSc Thesis, Estonian Agricultural University. (In Estonian).
- Padari, A., Muiste, P., Mitt, R., Pärn, L. 2009. Estimation of Estonian wood fuel resources. – *Baltic Forestry*, 15, 77–85.
- Pärt, E. 2010. Overview of Estonian forests. (Ülevaade: Eesti metsavarud). [WWW document]. – URL http://www.envir.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/eestimetsavarud2.pdf [Accessed 15 March 2016]. (In Estonian).
- R Core Team. 2014. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. [WWW document]. – URL <http://www.rproject.org> [Accessed 15 March 2016].
- Raudsaar, M., Pärt, E., Adermann, V. 2014. Overview of Estonian forests. (Ülevaade Eesti metsavarudest). – Keskkonnaagentuur (ed.). Aastaraamat Mets 2013. (Yearbook Forest 2013). Tartu, OÜ Paar, 1–2. (In Estonian).
- Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. 2005. Estimating canopy cover in scots pine stands. – *Silva Fennica*, 39, 137–142.
- Salas, C., Ene, L., Gregoire, T.G., Næsset, E., Gobakken, T. 2010. Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: a comparison of spatial statistical models. – *Remote Sensing of Environment*, 114, 1277–1285.
- Vain, A., Yu, W., Kaasalainen, S., Hyypää, J. 2010. Correcting airborne laser scanning intensity data for automatic gain control effect. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 511–514.
- Vaus, M. 2005. Forest mensuration. (Metsatakseerimine). Tartu, OÜ Halo Kirjastus. 178 pp. (In Estonian).

ALS-based wood volume models of forest stands and comparison with forest inventory data

Tauri Arumäe and Mait Lang

Summary

Airborne lidar (ALS) measurements have been carried out by Estonian Land Board regularly since 2008 in leaf-off conditions and during full-leaf conditions in summer. ALS measurements are widely used for digital terrain modelling, and in forestry for stand height, standing wood volume, canopy cover estimation (Næsset, 1997; Næsset & Bjercknes, 2001; Næsset, 2002; Salas *et al.*, 2010; Bouvier *et al.*, 2015). In this study ALS-based standing volume model (2) (Lang *et al.*, 2012) was evaluated in two test sites (Figure 1) and the wood volume estimates were compared to data from forest inventory database. The two test sites represent two different contrasting forest types – Aegviidu (Anniste & Viilup, 2011) is dominated by coniferous forests and Laeva (Lang *et al.*, 2014) is dominated by deciduous forests.

Three sets of parameters (Table 1) for the model (2) were estimated by using sample plot data from Aegviidu (M_{ALS_Aegv}), sample plot data from Laeva (M_{ALS_Laeva}) and data

from 46 stands in Aegviidu (M_{ALS46}). For estimating variability of the models M_{ALS_Laeva} and M_{ALS_Aegv} at test site-level we created 1000 models, each based on approximately 50% of randomly selected sample plots. The estimated parameters for each model were validated on the remaining sample plots. The 95% confidence intervals of *MEE* (4) and *RMSE* (5) were calculated for the 1000 models.

The sample plot-based model estimated systematically larger wood volume for forest stands compared to forest inventory data. Similar difference of wood volume estimates between forest inventory data and National Forest Inventory (NFI) data is reported by Adermann (2010). The differences are caused by the applied methodology in sample plot measurements and forest inventory. The mean error of estimate (*MEE*) increased by about 100 m³/ha in stands with standing volume estimates of > 250 m³/ha in both test sites (Figure 2).

Cross-validation of the models from Laeva and Aegviidu (Figure 3) showed an increase in MEE and $RMSE$ when the models were applied to the different type of forests, not present in the model data. The model M_{ALS_Laeva} gave on Aegviidu plots $MEE = 47 \text{ m}^3/\text{ha}$ and $RMSE=92 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Figure 3a), while the bootstrap-based 1000 models showed much smaller $RMSE$ (55–66 m^3/ha) and MEE (–11 – 11 m^3/ha). Similar results (Figure 3b) were found by applying the Aegviidu model M_{ALS_Aegv} to Laeva test plots and comparing it to the measured standing volume $M_{Mõõdetud_Laeva}$ ($MEE = -87 \text{ m}^3/\text{ha}$ and $RMSE = 128 \text{ m}^3/\text{ha}$).

The cross-validation results can partially be explained by the differences in forest types (optical properties in near infra-red spectral region) and canopy cover estimates (K) – in coniferous forests in Aegviidu the mean K was 66% and in Laeva deciduous forest it was 77%. In Laeva model (Table 1), the parameter of K was statistically insignificant, however, canopy cover estimate is crucial for correcting M_{ALS}

estimates in sparse stands and therefore K was included into the model.

The study also showed that the ALS point cloud size has an influence to the wood volume estimates. Models that were developed on small plots (10–15 m) systematically ($MEE 30 \text{ m}^3/\text{ha}$) overestimated the wood volume when applied to point clouds extracted for forest stands (Figure 4b). Similar effect of point cloud size on stand height estimations was shown by Arumäe & Lang (2016). However, the systematic difference is more likely related to the approach used to establish sample plots in forest when whole test site or a stand was described. The small circular plots were positioned in a homogeneous area in the stand, whereas the 46 stands were characterized by using randomly placed plots.

The model (2) parameters estimated in this study should only be used for forests similar to Aegviidu and Laeva test sites and using ALS-measurements carried out after final leaf unfolding phenophase.

Received March 24, 2016, revised May 24, 2016, accepted June 17, 2016