

Lennukilidari ja spektraalse kaugseireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal

Mait Lang^{1,2*}, Tauri Arumäe² ja Johannes Anniste³

Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J. 2012. Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 56, 27–41. ISSN 1406-9954.

Abstract. Field measurements from 450 sample plots, airborne lidar data and spectral images from Aegviidu, Estonia, 15 by 15 km test site were used to analyse options to estimate main forest inventory variables using remote sensing data. Up to 7 m random error in location of 15 m radius sample plots within homogeneous stands causes usually about 0.5 m standard deviation in lidar pulse return height distribution percentiles. Forest mean height can be predicted with linear relationship from 80th percentile of lidar pulse return height distribution. Upper percentiles of pulse return height distribution are not significantly affected by omitting returns from ground and forest understorey vegetation. Total stem volume in forest can be predicted by using 80th percentile, 25th percentile and canopy cover as model arguments with less than 70 m³ ha⁻¹ standard error. Best species specific stem volume models had 10 m³ ha⁻¹ smaller standard error.

Key words: airborne laser scanning, spectral information, forest inventory.

Authors' addresses: ¹Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014, Estonia; ²Tartu Observatory, 61602, Tõravere, Tartumaa, Estonia; ³OÜ Metsabüroo, Kadaka tee 86a, 12618, Tallinn, Estonia; *e-mail: mait.lang@emu.ee

Sissejuhatus

Metsandusliku kaugseire alguseks võib pidada 1920. aastat, mil Kanadas Quebecis inventeeriti aerofotode ja välitööde kombineeritud meetodiga pool miljonit aakrit metsi (Howard, 1991). Eestis on metsa takseerimisel kaugseiret kasutatud alates 1960ndatest aastatest, kui metsakorralduse aluseks võeti mustvalged nähtava ja lähiinfrapunase spektripiirkonna kujutist kandvad paberkuul aerofotod. Praegused digikaamerad salvestavad värvilise kujutise numbriliselt (Liang, 2004). Varasemalt oli peamiseks pilditöötlusmeetodiks aerofotode visuaalne tõlgendamine metsaeralduste piiride määramiseks ja puistu koosseisu hindamiseks. Digitaalse ehk numbri-

lise kujutise korral saab aga kasutada andmestiku raaltöötlust nagu näiteks klassifitseerimist ja seoste analüüsi spektraalsete heleduste ning takseertunnuste vahel (Howard, 1991). Peamiseks takistuseks ainult spektraalsel andmestikul põhinevate automaatsete metsa takseerimise rakenduste loomisel on puistu spektraalse heleduse ja peamiste takseertunnuste nagu vanuse, tüvemahu ja rinnaspindala seose küllastumine. Üldiselt kahaneb puistu heledus esimese kolmekümne aasta jooksul ning jääb siis häiringute puudumisel vähemuutuvaks (Nilson, 1994; Nilson & Peterson, 1994). Põhjuseks on peamiste puistu heledust kujundava tegurite – alus- ja vahetaimestiku heleduse, võrastiku katvuse ja lehpinnaindeksi omavahelised tasalülita-

vad mõjud. Seetõttu on ainult spektraalse heleduse alusel saadud takseertunnuste hinnangud praktikas üksiku puistu jaoks tihti liiga suure veaga (Holmgren & Thuresson, 1998).

Lisaks spektraalsetele sensoritele kasutatakse maapeal ja lennukitel taimkatte kaugseires järjest rohkem laserskannereid ehk lidareid (Næsset *et al.*, 2004, Heritage & Large, 2009). Maapinna topograafiliseks kaardistamiseks mõeldud diskreetsed lidarid (topolidarid) on aktiivsed kaugseireseadmed, mis saadavad välja kindla laine-pikkusega elektromagnetkiirguse impulsse ja registreerivad sensori suunas tagasi hajunud signaali maksimumide kohalt niini-metatud peegeldusi. Peegeldusele kolme-mõõtmeliste koordinaatide (x, y, z) arvutamiseks kasutatakse lennuki asendiandurit (IMU, *Inertial measurement unit*) saadud kaldenurki, diferentsiaalparandusega asukohamääramissüsteemi (GPS) andmeid, impulsi suunda ja signaali teeloleku aega (Heritage & Large, 2009). Enamik kaas-aegseid topolidareid registreerib emitteeritud impulsi kohta kuni neli peegeldust. Tulemuseks saadavas lidarandmestikus (punktivarves ehk pilves) sõltub horisontaalpinna ühiku kohta tekkiv peegelduste arv veel lennukõrgusest ja skaneerimismurgast. Iga peegelduse kohta salvestatakse ka signaali tugevus (*intensity*), kuid selle info kasutamine on kaliibrimisprobleemide tõttu keeruline (Vain *et al.*, 2009; Korpela *et al.*, 2010).

Mingi metsaosa või puistu takseertunnuste ja lidarandmete seostamiseks kasutatakse puistu piires või sobiva ruumilise lahutusega rastri pikslite kaupa arvutatud statistikuid (Næsset, 1997). Punktipilvest on võimalik saada peegelduste kõrgusjaotused, mis on üsna tihe-das seoses puistu võrastiku struktuuriga ja seega ka metsa peamiste takseertunnus-tega (Nilson, 2005; Frey, 2009). Kolme-mõõtmelisest punktivarvest saab arvutada katvuse hinnangu (Lang, 2010), mis puu võra ja puu üldise suuruse seoseid arves-tades (Krigul, 1972a; Nilson, 2005) kannab

informatsiooni rinnasdiameetri, puude arvu, rinnaspindala ja täiuse kohta.

Käesoleva uuringu eesmärgiks oli tes-tida 2008. aastal Aegviidu katsealal len-nukilt tehtud lidarmõõtmiste, multispekt-raalsete kosmose- ja aeropiltide ja maa-pealsete proovitükkide kasutamist metsa takseertunnuste hindamiseks. Andmestiku varasema töötamise käigus oli selgunud, et Soomes kasutatavad algoritmid ja mude-lid Aegviidu andmestiku jaoks hästi ei sobi (Anniste & Viilup, 2011). Seekord otsiti võimalusi koostada mudelid, mis oleksid väheste sisendtunnustega ja järgiksid metsa peamiste takseertunnuste omavahelisi seo-seid. Lisaks uuriti proovitüki asukohavea mõju lidarandmetest saadavale puistu kõr-guse hinnangule.

Metoodika

Testala ja proovitükkide takseerandmed

Katseala jääb Aegviidust ja Jänedast läände ja kujutab endast enamasti metsaga kae-tud 15×15 km ruutu. Metsaregistri and-mebaas sisaldas katsetööde objektil riigi-ja erametsade 1999–2008. aasta metsainven-teerimise andmeid, mis võeti aluseks proo-vialade paigutamisel. Katsetööde objektil kasvasid valdavalt männikud, moodusta-des 55% puistute pindalast, järgnesid kaa-sikud (22%) ja kuusikud (20%), muude puis-tute osatähtsus oli väike (Anniste & Viilup, 2011).

Katsealale rajati 2008. aastal 453 proo-vitükki selliselt (tabel 1), et oleks taga-tud sellel esinevate metsade proportsio-naalne esindatus (Anniste & Viilup, 2011). Kõikidele välitöödel klupitud puudele (v.a. männid) oli arvutatud 2008. aasta andmes-tikku kõrgus puu diameetril, vanusel, rinde määrangul, puistu boniteedil, kasvukoha-tüübil ja täiusel põhineva statistilise metsa-inventuuri (SMI) metoodikas kasutatava avaldamata mudeliga (Veiko Adermann, Keskkonniteabe Keskus, Riikliku metsa-inventeerimise osakond). Mändide kõrguse mudel oli lähendatud Aegviidu mudel-puude järgi. Käesoleva katse jaoks arvutati

Tabel 1. Testala puistute jagunemine enamuspuuliigi järgi ja välitöödeks valitud puistute arv.

Table 1. Forest area distribution according to dominant species in Aegviidu test site and preliminary number of selected stands for fieldwork.

Peapuuliik <i>Dominant species</i>	Lühend <i>Code</i>	Pindala <i>Area</i>		Eralduste arv <i>Number of stands</i>		Valitud eraldisi <i>Selected stands</i>	
		ha	%	arv / count	%	arv / count	%
Mänd / <i>Scots pine</i>	MA	8911	54,9	4745	47,7	207	41,5
Kuusk / <i>Norway spruce</i>	KU	3243	20,0	2359	23,7	95	19,0
Kask / <i>Silver birch</i>	KS	3581	22,1	2395	24,1	109	21,8
Haab / <i>Trembling aspen</i>	HB	115	0,7	118	1,2	30	6,0
Sanglepp / <i>Black alder</i>	LM	207	1,3	158	1,6	32	6,4
Hall lepp / <i>Gray alder</i>	LV	176	1,1	178	1,8	26	5,2
Kokku / <i>Total</i>		16233	100,0	9953	100,0	499	100,0

igal proovitükil puistu keskmine kõrgus Lorey valemiga (Vaus, 2005) kõikide proovitükil klupitud puude põhjal. Välitöödel noorendikes puid ei klupitud, vaid loendati puude arv, hinnati kohe puistu keskmine kõrgus ja rinnasdiameeter (Anniste & Viilup, 2011). Tüvemahud arvutati metsakorralduse juhendi mudelite järgi (Metsa korraldamise juhend, 2009). Hilisemast andmetöötlusest jäi välja kolm ilmsete asukoha vigadega proovitükki.

Multispektraalne kosmosepilt ja aeropildid

Katsetes kasutati SPOT-4 HRVIR pilti, mis oli tehtud selge ilmaga 04. juunil 2008. Kosmosepilt koosnes kujutistest spektri rohelistest, punasest ja NIR (lähinfrapunane) alast sarnaselt lähinfrapunase ortofotodega ning lisaks lühilainelises infrapunasest spektripiirkonnast (1580–1750 nm). Pilt sobitati Eesti põhikaardi koordinaatsüsteemi ja piksli suuruseks maapinnal võeti 20 m. Tööks kasutati pildi pikslite algseid väärtusi ja atmosfäärikorreksiooni ei tehtud. Aeropildid tegi Maa-amet kaameraga Leica ADS40 samaaegselt lidarmöödistamisega. Käesolevas töös kasutati aeropildina Maa-ameti standardset visuaalseks tõlgendamiseks mõeldud ortokorrigeeritud toodet. Heleduste ja takseerandmete seoste analüüsiks arvutati kosmose- ja aeropildilt proovitükkidele spektraalsed signatuurid ehk tunnusvektorid (Nilson, 1994) programmeerimisega hex32 (Lang *et al.*, 2005).

Lidarandmed

Lidarmõõtmised tegi Maa-amet skanneri Leica ALS50-II (11.07.2008, 27.07.2008 ja 01.09.2008) lennates maapinnast keskmiselt 2400 m kõrgusel. Skanner ALS50-II registreerib impulsi kohta kuni neli peegeldust ja töötab lainepikkusel 1064 nm (Leica, 2007). Andmed olid salvestatud standardsesse LAS failivormingusse lennuribade kaupa. Enamik lennuribadest olid ida-läänesuunalised, aga kaks olid põhja-lõunasuunalised. Skaneerimise nadiirnurk oli andmesitikus kuni 20 kraadi. Impulsiühik maapinnal esimeste peegelduste järgi oli keskmiselt 0,7–0,9 imp m⁻² (impulssi ruutmeetrile). Lennuribade keskel oli impulsiühik 0,45–0,50 imp m⁻². Lennuribade servades oli impulsside ja peegelduste tiheus horisontaalpinna ühiku kohta kõrgem skanneri peegli suuna muutusega seotud liikumise aeglustumise tõttu. Keskmine peegelduste (P) tiheus lennuribal oli 1–1,2 P m⁻². Lennuribade ülekatttega aladel oli peegeldusi pinnaühiku kohta rohkem. Punktipilvede töötamiseks kasutati vabavara FUSION (McGaughey, 2010).

Igale peegeldusele arvutati kõrgus maapinnast. Selleks eraldati mooduliga Groundfilter ribade kaupa eeldatavalt maapinnalt tekkinud peegeldused. Groundfilter kasutab iteratiivset algoritmi rasterkujul modelleeritava maapinna sobitamiseks punkti-parve (McGaughey, 2010). Maapinda esindavate peegelduste eraldamiseks valiti katsealiselt rastri piksli suuruseks neli meet-

rit. Liiga madal ruumiline lahutusvõime siluks tuntavalt lokaalset maapinna reljeefi. Liiga kõrge ruumilise lahutusvõime korral on madalas tihedas taimestik (näiteks pajuvõsas) piksli alal maapinnalt peegelduste tekkimise tõenäosus väike. Kuna Groundfilter algoritm otsib piksli ulatuses pilvest kõige alumisi punkte, siis võib väikestel pikslitel maapinna lähend osutuda hoopis tiheda taimestiku pinnaks. Peale maapinnapeegelduste eraldamist koostati nende järgi GridSurfaceCreate abil iga riba jaoks rasterkujul digitaalne maapinna mudel (DEM) ruumilise lahutusega 4,0 m.

Maapealsete takseertunnustega saab punktiple statistiku siduda kahel viisil 1) lõigates puistu või proovitüki piires välja punktiple või 2) kasutades rasterkihi piksleid virtuaalsete süstemaatiliste paigutusega proovitükkidena ja arvutades puistu või tegeliku prooviaala kohta keskmised hinnangud juba rastrilt. Rasterkihi kasutamine punktiple analüüsi vaheetapina on üsna levinud meetod ja lihtsustab tehniliselt andmetöötlust (Næsset, 1997). Rasterkihtidena olevate andmete kasutamine on võrreldes punktiplevega lihtne metsanduslikus kaugseires k - lähima naabri meetodiga takseertunnuste ülepinnaliste kaartide koostamisel (McRoberts & Tomppo, 2007).

Enne punktiple statistike ja takseertunnuste seoste uurimist testiti proovitüki asukohavea mõju lidarandmetest arvutatus statistikutele. Iga prooviaala algse GPS abil mõõdetud asukoha (Anniste & Viilup, 2011) ümbert eraldati kuni seitsme meetri raadiuses 100 juhuslikult paiknevat 15 meetri raadiust pilve. Seitsme meetri suurune viga vastab keskmiselt tavaliste käsi-GPS seadmete reaalsele täpsusele metsas (Anniste & Viilup, 2011). Juhusliku paigutusega pilvedest arvutati iga prooviaala jaoks peegelduste keskmine kõrgusjaotus ja jaotuse kvantiilide standardhälbed.

Proovitükkide takseerandmete ja lidarandmete seostamiseks arvutati punktiple kirjeldavad statistikud 20 m ruumilise lahutusega rastri pikslitele. Takseertunnuste ja lidarandmete regressioonimudelite

koostamises arvutati igale proovitükile lidarandmete statistike keskmised väärtused proovitüki alale jäävatelt pikslitelt programmiga helex32. Kuna proovitükid olid meelega paigutatud puistute keskossa aga mitte rasterkihi pikslite järgi, siis võrreldes pilvemeetodiga kasvab rastri vaheetapina kasutamisel veidi regressioonimudelite jääkstandardviga S_e .

Mudelite süsteem

Reaalse puistu naturaalseid takseertunnuseid kirjeldava mudelite süsteemi keskmeks on puistu tüvemahu M , rinnaspindala G , keskmise kõrguse H ja vormiarvu F seosed, millest üldkasutatav on $M = GHF$ (Krigul, 1972a; Tappo, 1981; Vaus, 2005). Normaaluistu on (kokkuleppeliselt) kasvutingimusi täielikult kasutatav puistu, mille takseertunnused saab leida niinimetatud standardtabelitest (Krigul, 1972a). Tegeliku puistuga seob normaalpuistut täius T , mis arvutatakse puistu tagavara ja normaaltagavara M_{norm} või rinnaspindala ja normaalrinnaspindala G_{norm} suhtena. Frey (2009) näitab, et metsa takseertunnuseid saab üldiselt hinnata võrastiku struktuuri kaudu. Praktilisest metsatakseerimisest on hästi teada puistu võrastiku katvuse K ja täiuse eeldatav lineaarne seos (Krigul, 1972a; Lang *et al.*, 2001). Võrastiku katvus on puude võraprojektsioonide pindala S_V ja puistu pindala suhe, kusjuures projektsioonide ülekatted arvestatakse ühekordselt (Jennings *et al.*, 1999). Katvuse mõõtmiseks sobivad niinimetatud poolsfääri, punktide ja visiiride meetodid (Krigul, 1972a; Kull, 1999; Rautiainen *et al.*, 2005; Korhonen *et al.*, 2006). Puistu tihedus, katvus ja vormiarv on samuti omavahel seotud (Krigul, 1972a; Nilson, 2005; Frey, 2009), mis võimaldab kasutada lidariandmetest saadud katvust näiteks täiuse ja puistu rinnaspindala hindamiseks. Aerofotodel põhineval metsatakseerimise metoodikas hinnatakse võra läbimõõdu järgi nii puude kõrgust kui ka rinnasdiameetrit ja katvuse järgi hinnatakse puistu täiust (Krigul, 1972b).

Katvuse saab määratlada lidarandmete

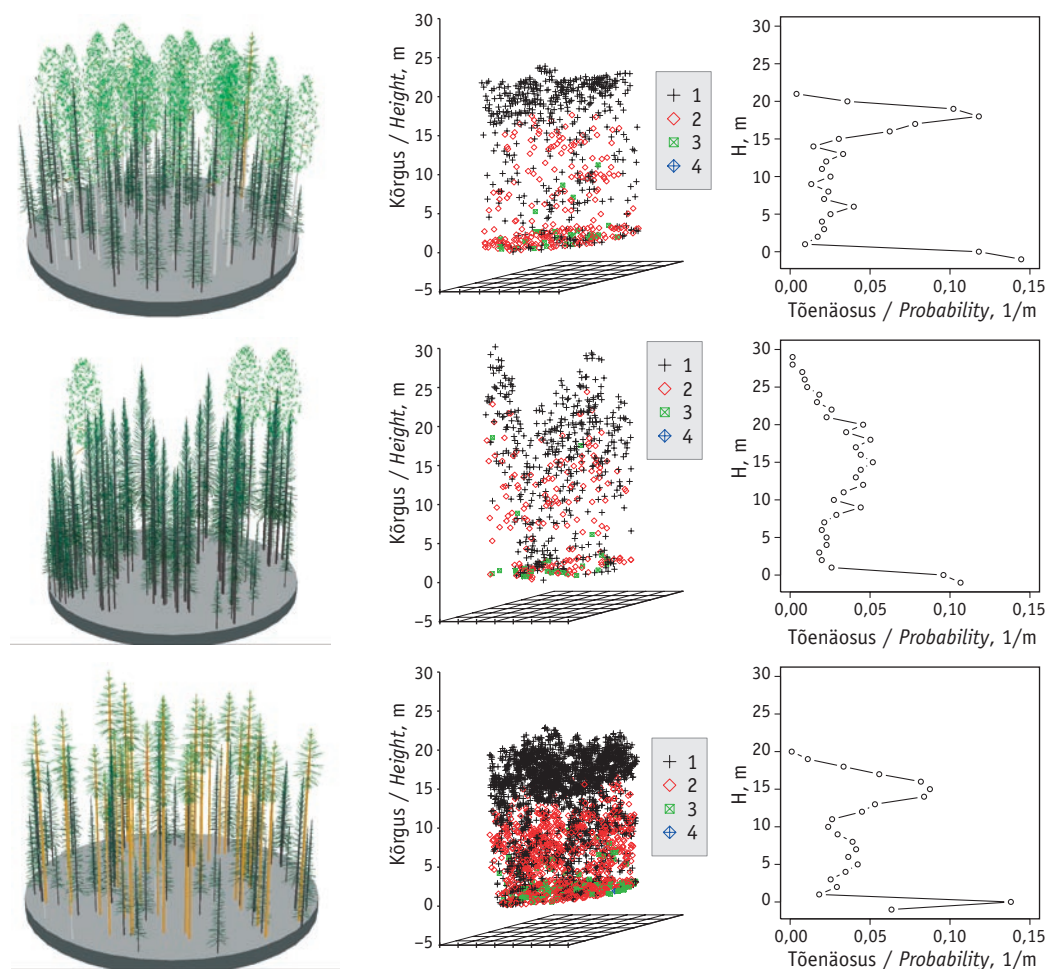
puhul maapinnast kõrgemal tekkinud peegelduste arvu ja kõigi peegelduste arvu suhtena (Morsdorf, 2006; Lang, 2010; Korhonen *et al.*, 2011). Tegelikult maapinnast erineva kõrguse kasutamine näiteks alustaimestiku mõju vältimiseks annab katvuse taustkõrgusel z

$$K(z) = \sum (P_n \mid h_p > z) / \sum P_n, \quad (1)$$

kus h_p on on peegelduse kõrgus ja P_n sobivalt

valitud peegeldusjärkude komplekt. Eeskirja (1) kohaselt on katvuse muutumisvahemik 0–1. Lidarilt saadud katvuse hinnang kahaneb taustpinna kõrguse kasvades ja sõltub peegeldusjärkude valikust (Lang, 2010).

Kolmemõõtmelise punktisarve statistikute nagu näiteks kõrgusjaotuse (joonis 1) või spektraalse heleduse eeldatavaid üldisi seaduspärasusi saame kasutada metsa takseertunnuste hindamiseks, võt-



Joonis 1. Näiteid proovitükkide (andmete visualiseering programmiga SVS) punktipilvedes olevate peegelduste kõrgusjaotust kohta. Tavaliselt on kõrgusjaotused kahemodaalsed – moodid on võrastiku keskel ning maapinnal. Numbrid punktipilvede legendil näitavad peegeldusjärku.

Figure 1. Some examples of point clouds and corresponding height distribution of lidar pulse returns from sample plots. Height distribution has two modes: one within canopy and second near to ground. Labels on point cloud subfigure indicate pulse return number.

tes mudelisse hinnatava tunnusega loogiliselt seotud argumendid. Puistu keskmise kõrguse hindamiseks võiks sobida punktiparve kõrgusjaotuse mingil protsentiilil H_q põhinev lineaarne mudel. Aegviidu andmete analüüsile ja varasematele kogemustele tuginedes (Arumäe, 2011) valiti puistu keskmise kõrguse ennustamiseks peegelduste kõrgusjaotuse 80-protsentiilil H_{80} põhinev mudel

$$H = a + bH_{80}. \quad (2)$$

Puistu tüvemahu ennustamiseks lidarandmetest testiti mudelid, mille argumentideks olid maapinnalähedaste peegeldusteta ($h_p > 0,8$ m) punktiparve kõrgusjaotuse 80-protsentiil, alumine kvartiil H_{25} ja 0,8 m kõrgusel nivool kõikide peegelduste järgi arvutatud katvus $K_{0,8}$:

$$M = aH_{80}^b, \quad (3)$$

$$M = aH_{80}^b + cH_{25}, \quad (4)$$

$$M = aH_{80}^b * K_{0,8}^c, \quad (5)$$

$$M = (aH_{80}^b + cH_{25}) * K_{0,8}^d, \quad (6)$$

kus a , b ja c on hinnatavad parameetrid.

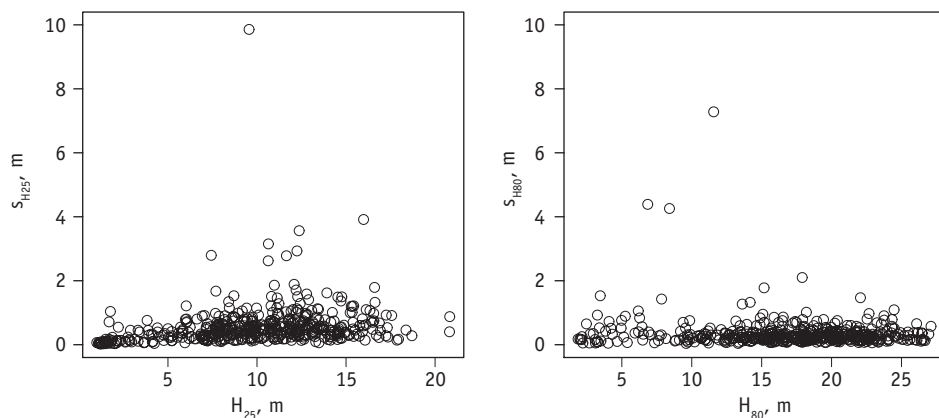
Spektraalse heleduse või impulsi peegelduse tugevuse (I) järgi tüvemahu ennustamiseks testiti mudelit

$$M = a(c / I). \quad (7)$$

Takseertunnuste hindamise mudelid (2-7) koostati nii puuliigist sõltumatult kui puuliigiti. Puuliigist sõltumatu mudel võimaldab lihtsalt ja lausaliselt teendada kaugseireandmeid takseertunnuste hinnanguteks. Mudelite (2-7) argumentide kordajad lähendati paketi R (www.r-project.org) meetodi nls abil.

Tulemused ja arutelu

Asukohavea mõju katsest selgus, et proovitükkide puistusisese paigutusskeemi puhul ulatub kuni seitsme meetrise eksimuse korral kõrgusjaotuse kvantiilide standardhälve poole meetrini (joonis 2). Mõnedel proovitükkidel oli kvantiilide standardhälve üle meetri ning ühel (KS-120) ulatus kümne meetrini. Asukohavea mõju sõltub antud proovialal oleva puistu ühtlusest, vaadeldava punktiparve suurusel ja kaugusest tegelikust asukohast.



Joonis 2. Kuni seitsme meetri suuruse asukohavea mõju puistu sees asuva proovitüki punktipilve kõrgusjaotuse alumise kvartiili (H_{25}) ja 80-protsentiili (H_{80}) hinnangu standardhālvena ($s_{H_{25}}$, $s_{H_{80}}$) 100 katse alusel. Iga punkt tähistab proovitükki.

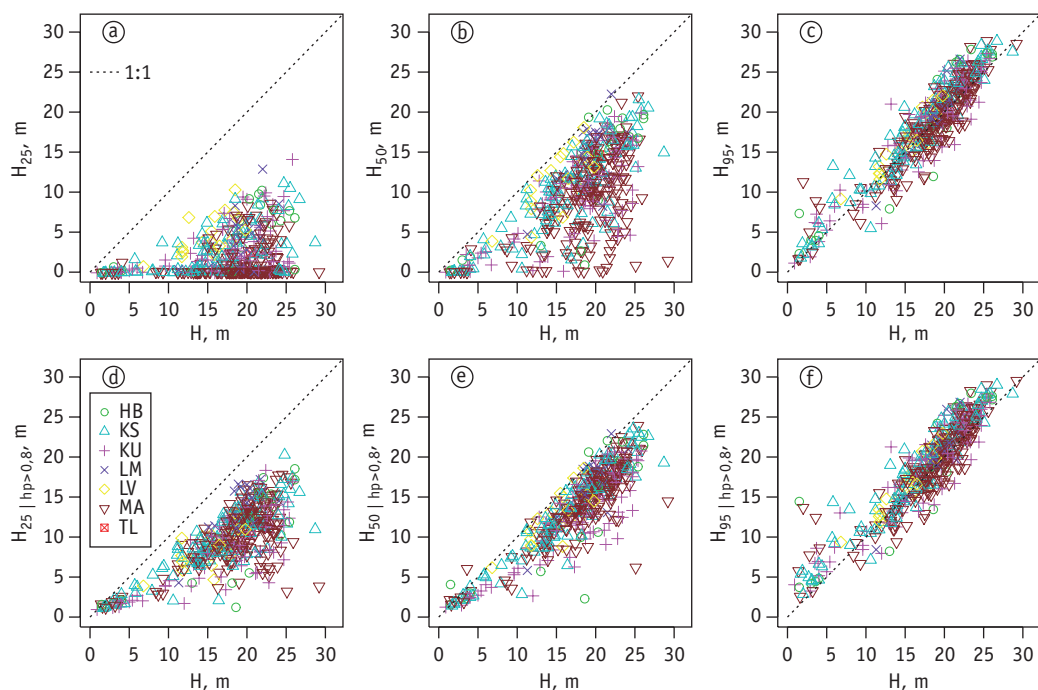
Figure 2. The influence of up to 7 meters random error in plot position to the lidar return height distribution lower quartile (H_{25}) and 80th percentile (H_{80}). Standard deviation ($s_{H_{25}}$, $s_{H_{80}}$) is calculated from 100 clouds. Each point represents one sample plot.

Väiksemate punktipilvede, ebaühtlase tihe-
duse või struktuuriga puistute puhul on
hajuvus suurem. Proovitüki asukohaviga
mõjub ka rasterkujul andmetelt statistikute
arvutamisel. Sõltuvalt sellest, kas proovi-
tükile võetakse rastrilt lähima piksli vää-
rtus või rastri pikslite ja proovitüki ala lõi-
getega kaalutud väärtused, võivad muutus-
ed olla hüppelised või sujuvad. Lang *et al.*
(2005) näitavad, et metsa kasvukäigu proo-
vitükkidele Landsat ETM+ 30 m ruumilise
lahutusega rastrilt arvutatud heleduste jao-
tused võivad proovitüki asukoha veast tin-
gituna olla üsna erinevad.

Peegelduste kõrgusjaotuste kvantiilide
väärtused sõltuvad maapinna lähedalt tek-
kinud peegelduste kaasamisest. Puurinde
kõrguse hindamisel mõjutavad kõrgusjao-
tuse kvantiile ka rohu-, puhma- ja põõsarin-

delt tekkivad peegeldused. Mõju on oluline
just alumistele kvantiilidele ja isegi mediaa-
nile H_{50} (joonis 3c, 3f). Kõrgusjaotuste üle-
mistele kvantiilidele ei ole maapinnalähe-
daste peegelduste kaasamise mõju üldi-
selt enam märgatav (joonis 3), välja arva-
tud harvikutes või üksikute kõrgete puu-
dega (säilikpuud) aladel, kus kvantiilide
väärtused on veidi suuremad maapinna-
lähedaste peegeldusteta kõrgusjaotuse kor-
ral. Kõrgemate kvantiilide puhul koondub
puistu keskmise kõrguse ja lidarimpulsi
peegelduste seos üsna hästi tunnetatava
linearse ümber olenemata sellest, kas
maapinnalähedasi peegeldusi kaasata või
mitte.

Impulsside peegelduste 0,95-kvantiili
seos puistu keskmise kõrgusega on praktili-
selt üks-ühene (joonis 3c, 3f). Noorte puis-



Joonis 3. Lidarimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse mõnede protsentiilide ja puistu keskmise kõrguse H seosed. Võrdlusena on toodud kõikide peegeldustega (a,b,c) ja maapinnapeegeldusteta jaotused (d,e,f). h_p on peegelduse kõrgus maapinnast meetrites. Puuliikide lühendid on tabelis 1.

Figure 3. Relationship between lidar point cloud height distribution percentiles and stand mean height H using all returns (a,b,c) or when excluding ground returns (d,e,f). h_p is pulse return height relative to ground. Species codes are given in Table 1, „TL” is for other species.

tute kõrgusjaotuse 0,95-kvantiil on süstemaatilisel kõrgem, kui võiks eeldada ühesest seosest puistu keskmise kõrgusega. Arvatavasti on üheks põhjuseks noortes ja vanemates puistutes kasutatud erinev takseerimismetoodika. Vanemates puistutes arvutati puude kaupa kõrgusmudelil põhinev puistu keskmise kõrguse hinnang, aga noortes puistutes hinnati välitöödel puistu keskmist kõrgust. Teisalt kasutati peegelduste kõrgusjaotuse koostamiseks kõiki nelja võimalikku impulsist tekkinud peegeldust. Teist ja kõrgemat järku peegelduste registreerimine sõltub lidaril ajamõõtmise täpsusest väljendatuna impulsi kohta registreeritavate peegelduste vähimas kauguses (Baltsavias, 1999), mis ALS50-II puhul on 3,5 m (Leica, 2007). Seega tekib kõrgemates puistutes madalamal asuvaid teisi, kolmandaid ja neljandaid peegeldusi suurema tõenäosusega. Niisiis kahandab impulsi jagunemine kõikidel peegeldustel põhineva kõrgusjaotuse kvantiilide väärtust just kõrgemates puistutes. Keskmiselt tekkis lennuribades iga impulsi kohta 0,25–0,30 teist peegeldust, 0,030–0,045 kolmandat peegeldust ja neljandate peegelduste arv oli tühine. Kolmandaks põhjuseks eelkirjeldatud kõrguste seose nihkele võib olla rastri kasutamine andmesalvestuse vahetapina kõrgusjaotuse kvantiilide arvutamisel. Kuna proovitükid ei olnud planeeritud rastri pikslite keskpunktidesse vaid puistu keskele, siis arvatavasti avaldas noorendikes arvutatud peegelduste kõrgusjaotusele olulist mõju ka proovitüki väliste kõrgete puude võimalik olemasolu metsas.

Puistu kõrguse hindamiseks lidarandmetest lähendati lineaarmudeliga puistu kõrguse ja $H_{80|hp>0,8}$ seos üle kogu andmestiku ning eraldi männikute, kaasikute, kuusikute ja ülejäänud puuliikide jaoks (tabel 2). Determinatsioonikordaja R^2 tuli kõikidel juhtudel üle 0,81 ja mudeli jääkstandardviga kahe meetri lähedale. Mudeli parameetrite hinnanguid ja standardvigu arvestades võib Aegviidu andmestiku põhjal väita, et kõrgusjaotuse protsentiili $H_{80|hp>0,8}$ seos puistu keskmise kõrgusega ei ole oluliselt puuliigiomane.

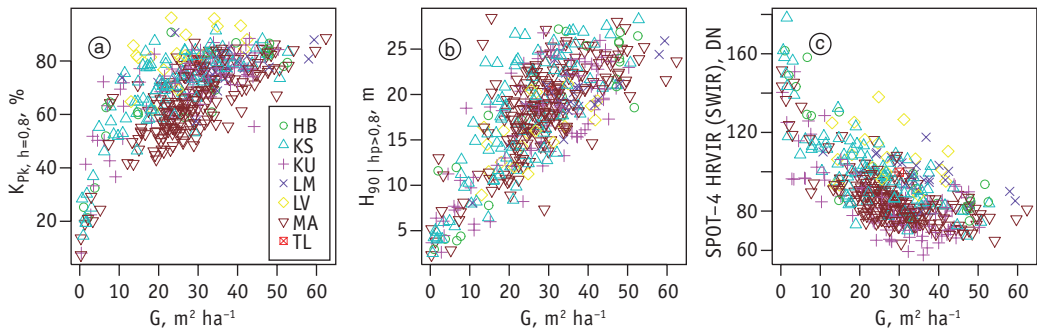
Puistu rinnaspindala kasvades suureneb kõikide peegelduste põhjal arvutatud katvus $K_{P_k|hp>0,8}$ logaritmiliselt (joonis 4a). Maapinnalähedaste punktidega kõikide peegelduste kõrgusjaotuse 90-protsentiil $H_{90|hp>0,8}$ kasvab praktiliselt lineaarselt (joonis 4b). Puistu heledus SPOT-4 HRVIR keskmises infrapunases kanalis kahaneb mittelineaarselt rinnaspindala kasvades (joonis 4c), mis on ka varasematest kaugseirealastest töödest hästi teada (Nilson, 1994; Nilson & Peterson, 1994). Rinnaspindala seos impulsi peegelduste tugevusega oli sarnane spektraalsele heledusele NIR kanalis, mis on ka eeldatav ALS50-II nimilaine-pikkuse järgi.

Erinevalt puistu kõrgusest on rinnaspindala ja täiuse seosed punktisarvest arvutatud katvust kirjeldavate tunnustega tavaliselt mittelineaarsed ja oluliselt suurema hajuvusega. Rinnaspindala seoste hajuvusdiagrammidelt on aimatav ka puuliigi mõju (joonis 4). Puistu täiuse ja lidarilt arvutatud katvuse seostes on hajuvus suu-

Tabel 2. Peegelduste kõrgusjaotuse 80-protsentiilil $H_{80|hp>0,8}$ põhineva puistu keskmise kõrguse ennustamise lineaarseose (2) statistikud, parameetrid ja nende standardvead.

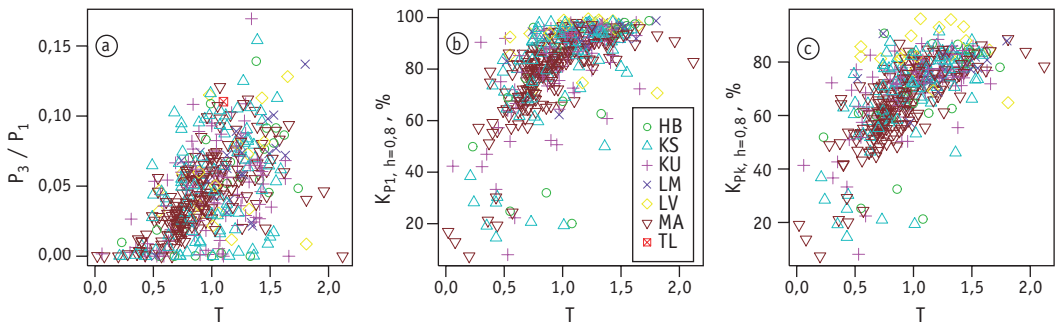
Table 2. Parameters and descriptive statistics for $H_{80|hp>0,8}$ based forest mean height regression model (2).

Puistu / Stand	Parameetrid / Parameters				Mudel / Model	
	a	$S_{e,a}$	b	$S_{e,b}$	R^2	S_e
Kõik / All	2,221	0,315	0,927	0,018	0,857	2,13
Männikud / Pine stands	3,139	0,567	0,897	0,032	0,812	2,07
Kuusikud / Spruce stands	2,543	0,723	0,934	0,042	0,842	2,38
Kaasikud / Birch stands	1,189	0,449	0,945	0,026	0,928	1,71
Teised / Other	2,002	0,804	0,905	0,045	0,857	2,10



Joonis 4. Takseeritud rinnaspindala G seosed kõikidel peegeldustel põhineva katvuse K_{pk} peegelduste kõrgusjaotuse 90-protsentiili H_{90} ja SPOT HRVIR pildilt arvutatud heledusega. Sama rinnaspindala korral on lehtpuupuitutes suuremad nii punktivilvel põhinev katvuse hinnang kui ka spektraalne heledus.

Figure 4. Relationships of stand basal area G with all return based canopy cover K_{pk} , pulse return height distribution 90th-percentile H_{90} and spectral reflectance in SWIR band of SPOT-4 HRVIR scanner.



Joonis 5. Takseeritud täiuse T seosed peegelduse jagunemise statistikuga (P_3/P_1) ning katvusega esimeste peegelduste K_{p1} ja kõikidel peegeldustel K_{pk} järgi.

Figure 5. Relationships of stand relative density T with pulse split indicator P_3/P_1 , first return based canopy cover K_{p1} and all return based canopy cover K_{pk} .

rem kui seostes rinnaspindalaga (joonis 5). Esimestel peegeldustel P_1 põhineva katvuse hinnang saab taustkõrgusel $z = 0,8$ m tihti väärtuse 100% (joonis 5b), kuna nivool $z < 0,8$ m peegeldusi pole. Küllastunud hinnangud edasise analüüsi jaoks infot ei sisalda. Taustkõrguse z suurendamisel küllastumise võimalus kahaneks (Lang, 2010). Kõikide peegelduste arvu järgi arvutatud katvuse hinnangud jäävad üldiselt alla 90% (joonis 5c) ja seos täiusega ei küllastu. Nii P_1 kui ka kõikidel peegeldustel P_k põhineva katvuse seos täiusega oli kasvav ja mitteliineaarne (joonis 5b, 5c). Impulsi jagunemist kirjeldav suhe P_3/P_1 kasvab koos täiusega –

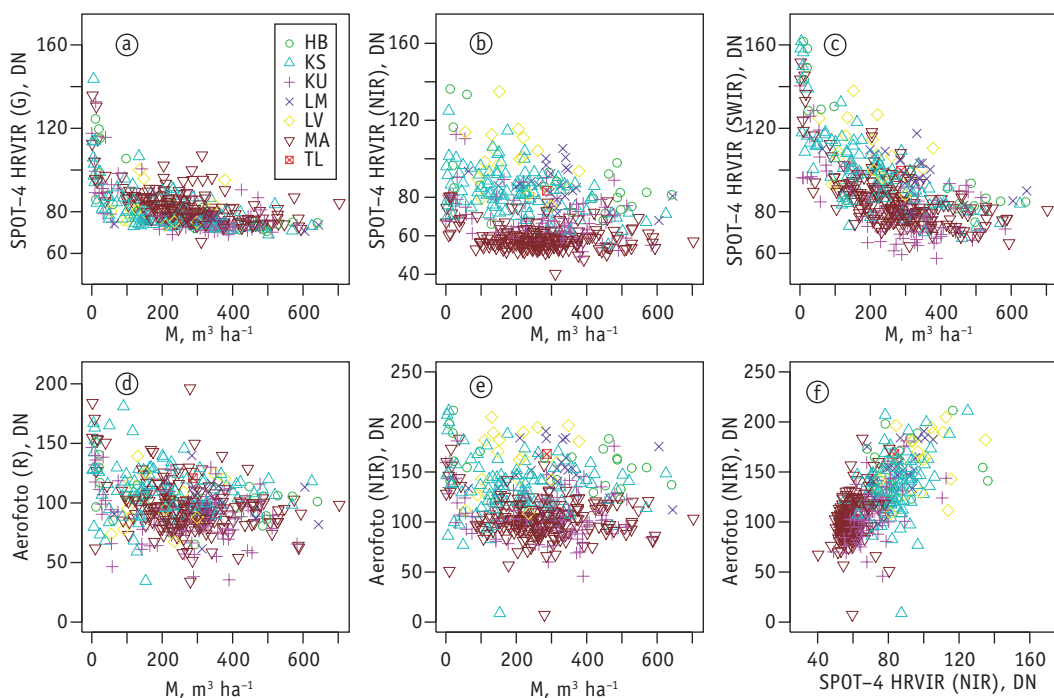
tihedamates puistutes on impulsi jagunemise tõenäosus suurem. Siiski ei anna seose $T = f(P_3/P_1)$ hajuvus lootust selle praktiliseks kasutamiseks (joonis 5a).

Puistute spektraalsed heledused arvutati SPOT-4 HRVIR pildi neljast kanalist, lidarandmetega samaaegselt tehtud aeropiltide kolmest kanalist ja lidari peegelduste tugevusest. Aegviidu katsealal olevate puistute tüvemahu seos spektraalse infoga on sarnane varasematest uuringutest teadaolevaga (Nilson & Peterson, 1994): puistu kasvades üldiselt spektraalne heledus kahaneb esimese kahekümne aasta jooksul ning jääb siis häiringute puudu-

misel stabiilseks või edaspidi kahaneb oluliselt aeglasemalt (joonis 6). Aeropiltide ja SPOT-4 HRVIR pildi rohelise ning punase kanali heleduse ning tüvemahu seoses kvalitatiivseid erinevusi ei olnud, puuliikide mõju oluliselt ei ilmnenud (joonis 6a, 6d). Aeropiltidel oli siiski seose hajuvus suurem, mille põhjuseks on arvatavasti vaatenurgast ja valgustatusest tekkivad moonutused. Kuna ei kasutatud aeropiltide toorandmeid vaid Maa-ameti rutiinse automaatse pilditöötlusprotseduuri tulemust, siis esines arvatavalt ka värvisignaali moonutusi. NIR kanalis ilmnis selge erinevus okas- ja lehtpuude heleduse ning tüvemahu seoses: sama tüvemahu juures on lehtpuupuustud selgelt heledamad nii SPOT-4 HRVIR pildil kui ka aerofotodel (joonis 6b, 6e). Kvalitatiivselt sarnane kuid lehtpuu-

ja okaspuupuustuid pigem mitte eristav oli seos lidari impulsi (samuti NIR spektripiirkond) peegelduste tugevuse ja puistu tüvemahu vahel. Võimalik, et liigilise erinevuse summutab lidari automaatne tundlikkuse kontroll (AGC), mille eesmärgiks on kindlustada, et igast välja saadetud impulsist registreeritakse vähemalt üks peegeldus ja samas jääks registreeritav signaal sensori lineaarse tundlikkuse piirkonda (Vain *et al.*, 2009). Parimad lähendid spektraalsel heledusel põhineva puistu tüvemahu ennustamiseks olid jääkstandardveaga üle $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ehk praktiliseks kasutamiseks sobimatud ja siinkohal neid täpsemalt toodud ei ole.

Puistu tüvemahu ennustamiseks sobivad punkt pilve statistikud märgatavalt paremini kui spektraalne heledus, sest pee-



Joonis 6. Puistu tüvemahu M seosed kosmosepildilt ning aerofotolt saadud spektraalsete tunnustega. Lähiiinfrapunasel kanalis (NIR) on lehtpuud okaspuudest tuntavalt heledamad.

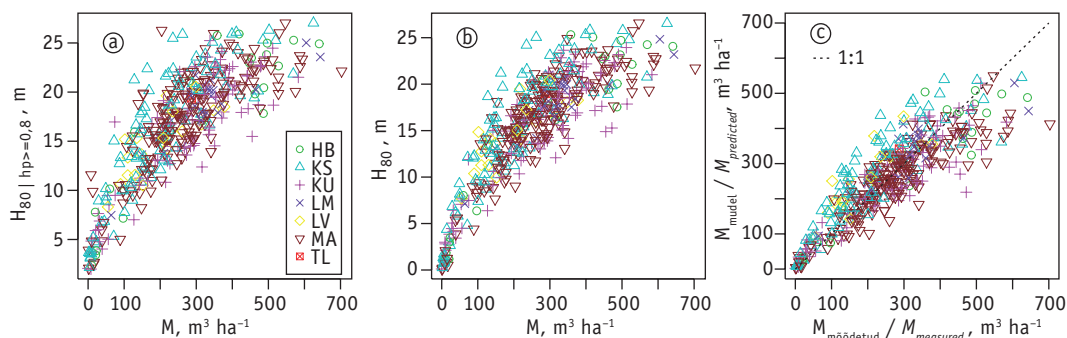
Figure 6. Relationships between total stem volume M and spectral variables from satellite image and aerial image. Deciduous and coniferous are well distinguished in near infrared (NIR) band.

gelduste kõrgusjaotus kirjeldab hästi puistu kõrgust, mis on otseselt seotud tüvemahuga (joonis 7a, 7b). Seosed ei ole lineaarsed, kuid neis ei esine sarnast küllastumist nagu spektraalse heleduse puhul. Kvalitatiivselt ei ilmne seostes olulisi erinevusi, kui jätta välja maapinnalähedased peegeldused.

Tüvemahu ennustamiseks maapinnalähedaste peegeldusteta kõrgusjaotuse järgi lähendati esmalt puuliigist sõltumatud üldised mudeleid (3–6), mis põhinesid tunnustel $H_{25}|_{hp>0,8}$, $H_{80}|_{hp>0,8}$ ja $K_{Pk}|_{hp>0,8}$ (tabel 3). Ainult kõrgusjaotusel põhinevad mudelid lähendasid algandmestikku jääkveaga veidi üle $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Katvuse hinnangu lisamisel mudelisse kahanes jääkviga u. $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (tabel 3). Parima mahumudeli ennustuse ja takseeritud tüvemahu hajuvusdiagrammilt ilmnas, et üldine mudel

võib tekitada süstemaatilisi vigu puuliigiti. Jääkide uurimisel selgus, et keskmiselt alahinnatakse üldise mudeliga tüvemahu männikutes $21,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja kuusikutes $15,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ning ülehinnatakse kaasikutes $45,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja teistes puistutes $15,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Kuna peegelduste kõrgusjaotuse ja puistu kõrguse seoses puuliigiomasust ei esinenud (tabel 2), siis on arvatavasti põhjuseks nii katvuse hinnangute sõltuvus puuliigist kui ka kõrguse ja tüvemahu seoste erinevused puuliigiti.

Enamuspuuliigiti lähendatud mudelitel saadi ennustuse jääkviga kuni $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ parima mahumudeli korral (joonis 7c, tabel 4). Puuliigiomaste mudelite rakendamisel praktikas on aga probleemiks vajadus teada eelnevalt puuliiki, mis punktililve statistikute põhjal ei ole hästi eristatav.



Joonis 7. Peegelduste kõrgusjaotuse 80-protsentiili H_{80} ja puistu tüvemahu M seos maapinnalähedasi peegeldusi arvestades (a) ja ilma (b). Parima üldise mahumudeli (6) ennustuse ja mõõdetud tüvemahu võrdlus (c).

Figure 7. Relationships between total stem volume M and lidar return height distribution 80th percentile (a) ground returns included, (b) ground returns excluded. Comparison of best volume model (6) predictions to measured values (c).

Tabel 3. Peegelduste kõrgusjaotusel ja katvusel põhinevate puuliigist sõltumatute tüvemahu mudelite parameetrite väärtuste hinnangud ja standardvead.

Table 3. Parameters for species-independent stem volume estimation models.

Mudel / Model		Parameetrid / Parameters							
Nr. / Eq. Nr	$S_{e_r} \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	a	S_{e_a}	b	S_{e_b}	c	S_{e_c}	d	S_{e_d}
3	80,4	4,603	0,903	1,422	0,065	-	-	-	-
4	80,0	3,147	0,947	1,501	0,087	3,724	1,604	-	-
5	70,5	9,721	1,784	1,269	0,058	0,907	0,085	-	-
6	69,1	5,784	1,622	1,361	0,081	8,649	2,069	0,957	0,085

Tabel 4. Lidari impulsi peegelduste kõrgusjaotusel ja katvuse hinnangul põhineva parima tüvemahu mudeli (6) parameetrite väärtuste hinnangud ja standardvead enamuspuuliigiti.

Table 4. Parameters for the best stem volume estimation model (6) by dominant species.

Enamuspuuliik	S_e	Parameetrid / Parameters							
Dominant species	$m^3 ha^{-1}$	a	$S_{e,a}$	b	$S_{e,b}$	c	$S_{e,c}$	d	$S_{e,d}$
Mänd / Scots pine	58,27	7,559	3,187	1,297	0,127	13,425	3,121	1,204	0,105
Kuusk / Norway spruce	62,85	17,627	7,752	1,006	0,140	11,181	5,164	1,174	0,229
Kask / Silver birch	61,81	4,335	2,845	1,452	0,179	7,561	5,185	1,495	0,247
Teised / Other	67,21	0,364	0,514	2,180	0,403	13,269	5,575	0,806	0,305

Käesolevas katses olid peegelduste statistikud proovitükile arvatatud 20 m ruumilise lahutusega rastrit vaheetapina kasutades, mis lisab hinnangutesse hajuvust. Teisalt on praktiliste rakenduste puhul mudeli jääkhälbest isegi olulisem see, kui tundlikud on mudelid sisendtunnuste vigadele. Varasemas uuringus (Anniste & Viilup, 2011) sai Blom Kartta OY Aegviidu andmestikul hinnangu keskmiseks ruutveaks puistu kõrgusele 1,67 m ja üldisele tüvemahule 62,94 $m^3 ha^{-1}$. Käesoleva uuringuga võrreldes väiksemate lähendivigade taga oli oluline vaatluste arvu vähendamine – nimelt kasutas Blom Kartta OY andmestikust ainult 318 proovitüki andmeid võrreldes siinse 450 vaatlusega.

Koostatud mudelite kasutamine on võimalik arvatavasti ka mujal Eestis, kui lidarmõõtmised on tehtud fenoloogiliselt samal ajal ja samasuguselt seadistatud skanneriga. Lehepinnaindeksi muutused mõjutavad oluliselt peegelduste kõrgusjaotust kasvuperioodi jooksul (Næsset, 2005) ja seega tuleks näiteks kevadiste topograafilise kaardistamise tarbeks tehtud lendude käigus kogutud lidarmõõtmiste kasutamisel lähendada mudelitele uued parameetrite väärtused. Puuliigiomaste tüvemahumudelite rakendamine nõuab spektraalse info või olemasoleva andmebaasi kasutamist, sest ainult madala punktihedusega lidarmõõtmistest ei ole võimalik puistu liigilist koosseisu usaldusväärselt hinnata. Edasist uurimist vajab katvuse hindamisel sobivaima taustkõrguse valik ja praktilistes rakendustes metsade takseerimisel kaugseireandmetele lisaks vajalik maa-peaksete proovitükkide hulk.

Kokkuvõte

Lidarimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse kvantiilide standardhälve ei ületa 15 m raadiuste proovitükkide puistusisese paigutuse korral oluliselt poolt meetrit, kui asukohaviga ulatub seitsme meetrini. Puistu kõrguse ja lidarimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse ülemiste kvantiilide lineaarseos võimaldab hinnata metsa keskmist kõrgust kuni kahe meetrise jääkveaga Aegviidu katsealal. Täpsust on võimalik edaspidi suurendada, kui kasutada paremat maapinna kõrgusmudelit ja proovitüki puude kõrguste arvutamisel üldisse katseala mudelisse lisada juurde konkreetse proovitüki mudelpuude kõrguste arvestamine. Selgus, et Aegviidu katsealal ei ole lidarandmetest metsa kõrguse ennustamise mudel oluliselt puuliigiomane. Metsa tüvemahutu on võimalik hinnata puuliigist sõltumatu kõikide peegelduste kõrgusjaotustel ja katvuse hinnangul põhineva mudeliga alla 70 $m^3 ha^{-1}$ jääkveaga ning puuliiki arvestades kuni 10 $m^3 ha^{-1}$ täpsemalt. Testitud mudelite kujud on kasutatavad ka mujal Eestis, aga muul fenoloogilisel ajal või teistsuguse skanneriseadistusega kogutud andmete puhul tuleb lähendada uued parameetrite väärtused.

Tänuavaldused. Aegviidu katseala andmete analüüsimist toetas Riigimetsa Majandamise Keskus. Artikli valmimist toetasid Keskkonnakaitse ja -tehnoloogia programmi projekt ERMAS, Eesti Teadusfondi grant ETF8290 ja riikliku sihtfinantseerimise grandid SF0060115s08 ja SF0170014s08. Autorid tänavad retsensente kasulike soovitude ja märkuste eest.

Kasutatud kirjandus

- Anniste, J., Viilup Ü. 2011. Metsa takseertunnuste määramisest laserskanneerimise abil. (Determination of forest characteristics with the laser scanning). – Artiklid ja uurimused, 10, 38–53. Luua Metsanduskool. (In Estonian).
- Arumäe, T. 2011. Laserskanneri andmete kasutamine takseertunnuste hindamiseks. (Using lidar to assess forest characteristics). MSc thesis. Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool. Tartu. 45pp. (In Estonian with English summary).
- Baltsavias, E.P. 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 199–214.
- Frey, T. 2009. Stand structure links up canopy processes and forest management. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 51, 40–48.
- Heritage, G.L., Large, A.R.G. 2009. Principles of 3D Laser Scanning. Laser Scanning for the Environmental Sciences. Eds Heritage, G.L., Large. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, UK, 21–34.
- Holmgren, P., Thureson, T. 1998. Satellite remote sensing for forestry planning – a review. – Scandinavian Journal of Forest Research, 13, 90–100.
- Hopkinson, C., Chasmer, L. 2009. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. – Remote Sensing of Environment, 113, 275–288.
- Howard, J.A. 1991. Remote sensing of forest resources. Chapman & Hall. London. 420 pp.
- 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.
- 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.
- 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., Ørka, H.O., Hyypä, J., Heikkinen, V., Tokola, T. 2010. Range AGC normalization in airborne discrete-return LiDAR data for forest canopies. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, 369–379.
- Krigul, T. 1972a. Metsatakseerimine. (Forest mensuration). Valgus, Tallinn. 358 pp. (In Estonian).
- Krigul, T. 1972b. Aerofotomöödistamise metoodiline juhend metsamajanduse osakonna üliõpilastele. (Interpretation of aerial images). Eesti Põllumajanduse Akadeemia, Tartu. 84 pp. (In Estonian).
- Kull, E. 1999. Lehepinnaindeksi ja võrastiku liituse määramine palumetsades poolsfäärifotode ja vertikaalse toru meetodil. (Relationship of leaf area index and canopy closure in mesotrophic pine forest: an assessment by hemispherical photographs and by the vertical tube methods). – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 31, 98–103. (In Estonian with English summary).
- Lang, M., Nilson, T., Lück, T. 2001. Puistu kasvufunktsioonide kasutamise kaugseires. (Using forest growth functions in satellite remote sensing). – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 37, 80–88. (In Estonian with English summary).
- Lang, M., Lück, T., Rahn, A., Sims, A. 2005. Kasvukäiguproovituikide kaugseire võimalusi. (Change detection on permanent forest growth sample plots using satellite images). – Metsanduslikud Uurimused / Forestry Studies, 43, 24–37. (In Estonian with English summary).
- 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).
- 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.
- 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.
- McRoberts, R. E., Tomppo, E. O. 2007. Remote sensing support for national forest inventories. – Remote Sensing of Environment 110, 412–419.
- Metsa korraldamise juhend. (Forest inventory guidelines in Estonia). RTL 2009, 9, 104. (In Estonian). – URL <https://www.riigiteataja.ee/akt/13124148>. [Accessed January 30, 2013].
- 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. 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. 2005. Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small footprint airborne laser data. – Remote Sensing of Environment, 95, 356–370.
- 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.

- 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. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 43, 159–172.
- Nilson, T. 1994. Metsade kaugseire alused. (Remote sensing of forests). Eesti Põllumajandusülikooli Metsakorralduse Instituut. 160 pp. (In Estonian).
- Nilson, T., Peterson, U. 1994. Age Dependence of Forest Reflectance – Analysis of Main Driving Factors. *Remote Sensing of Environment*, 48(3), 319–331.
- Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. 2005. Estimating canopy cover in Scots pine stands. – *Silva Fennica*, 39(1), 137–142.
- Tappo, E. 1981. Eesti NSV puistute keskmised takseeritud puistu enamuspuiuliigi, boniteedi ja vanuse järgi. (Forest stand average characteristics in Estonia by dominant species, site fertility and age). Eesti NSV Põllumajandusministeeriumi Informaiooni ja Juurutamise Valitsus, Tallinn. 72 pp. (In Estonian).
- Vain, A., Kaasalainen, S., Pyysalo, U., Krooks, A., Litkey, P. 2009. Use of naturally available reference targets to calibrate airborne laser scanning intensity data. – *Sensors*, 9, 2780–2796; DOI:10.3390/s90402780.
- Vaus, M. 2005. Metsatakseerimine. (Forest mensuration). OÜ Halo kirjastus, Tartu. 178 pp. (In Estonian).

Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia

Mait Lang, Tauri Arumäe and Johannes Anniste

Summary

Point clouds from airborne laser scanners and spectral information from spaceborne or airborne sensors contain information about forest structure. In Aegviidu, Estonia, 450 sample plots were used from 15×15 km test site to assess options to estimate main forest inventory variables from remote sensing data and to build models for forest height and stem volume estimation. SPOT-4 HRVIR image from 04.07.2008, Leica ALS50-II scanning data (11.07.2008, 27.07.2008, 01.09.2008; about one return per m^2) and aerial images (Leica ADS40 camera) were used. General description of test site is in Table 1.

Basic relationships $M = GHF$ and $M = TM_{norm}$ relate total stem volume M , stand basal area G , mean forest height H , stem form factor F , stand relative density T and stem volume of normal stand M_{norm} (Krigul, 1972a; Vaus, 2005). Tappo (1981) shows that M_{norm} and stand form height HF can be well estimated from measured

forest height. Close relationships between forest cover K and stand relative density T are well known (Krigul, 1972a; Nilson, 2005; Frey, 2009). Since height and cover are the basic variables obtained from lidar data (Figure 1; Næsset, 2005; Korhonen *et al.*, 2011) we followed the logic of forest inventory models and designed equations (Eq. 2–6) for stem volume estimation where H_{80} and H_{25} are respective percentiles of lidar return height distribution and $K_{0.8}$ is cover estimate at reference height $z = 0.8$ m. We also assessed the influence of ground returns to percentiles of lidar pulse return height distribution. Influence of errors in sample plot location to the lidar pulse return height distribution was studied by adding up to 7 m random error to original position in 100 tests for 15 m sample plots.

Plot shift test revealed that in case of 15 m sample plots that are located within homogeneous stands up to 7 m random error in plot location causes usually less

than 0.5 m standard deviation in pulse return height percentiles (Figure 2). Upper percentiles of lidar pulse return height distribution are not significantly affected if ground returns are excluded (Figure 3). Mean forest height can be estimated with linear model (2) having residual standard error around 2 m (Table 2). Stand basal area and relative density are related to lidar variables and spectral information but the relationships are rather scattered (Figures 4, 5). Stem volume and spectral radiance I were related as known before (Nilson & Peterson, 1994), the relationships are different for deciduous and coniferous stands (Figure 6). Smallest residual standard error $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ for single spectral channel based

model (7) does not encourage to build forest inventory system based on spectral data only. On the other hand, lidar variables based models fitted stem volume data rather well (Figure 7, Tables 3 and 4). However, in case of species specific model (Table 4), the dominating species has to be determined beforehand using spectral data or existing database over the area of interest. The elaborated models can be used elsewhere if phenological time, scanner settings and forests are similar to this study. Model equations (Eq. 2–7) are universal, only new local parameters (a , b , c) have to be estimated for models if applying them in different conditions or when reference height for cover estimate is changed.

Received January 31, 2013, revised February 18, 2013, accepted March 25, 2013