



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Märt Torop

AEROLIDARI KASUTAMINE METSAS PUUDE TÜVEMAHU HINDAMISEL
ESTIMATION OF STANDING WOOD VOLUME USING AIRBORNE LIDAR DATA

Bakalaureusetöö
Geomaatika õppekava

Juhendaja: vanemteadur Mait Lang

Tartu 2016



Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Märt Torop		Õppekava: geomaatika	
Pealkiri: Aerolidari kasutamine metsas puude tüvemahu hindamisel			
Lehekülgi: 26	Jooniseid: 10	Tabeleid: 5	Lisasid: 0
Osakond:	Metsakorralduse osakond		
Uurimisvaldkond:	Metsade kaugseire		
Juhendaja:	vanemteadur Mait Lang		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2016		
<p>Töö käsitleb aerolidari andmestiku kasutamist metsa tüvemahu hindamisel. Töö eesmärk on anda uuritavale metsaleüksusele puidumahu ja kasvava metsa väärtuse hinnang kasutades aerolidari andmeid.</p> <p>Töös kasutati Järvelja Õppe- ja Katsemetskonna takseerandmeid, 2010. aasta Maa-ameti aerolidari andmeid, varasemates töödes välja töötatud arvutusmudeleid.</p> <p>Tehtud töö tulemusena saadi uuritavale metsale aerolidari andmestikul põhinevad tüvemahu hinnangud ja kasvava metsa rahaline väärtus. Saadud tulemusi võrreldi takseerandmete põhjal saadud samade tulemustega. Töö tulemustest saab järeldada, et kasutades varasemates töödes välja töötatud arvutusmudeleid, on lidari andmestiku põhjal võimalik anda metsale pädevaid hinnanguid.</p>			
Märksõnad: mets, tüvemaht, aerolidar, kinnisvara hindamine			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Märt Torop		Speciality: geomatics	
Title: Estimation of standing wood volume using airborne lidar data			
Pages: 26	Figures: 10	Tables: 5	Appendixes: 0
Department:	Department of forest management		
Field of research:	Forest remote sensing		
Supervisors:	Senior researcher Mait Lang		
Place and date:	Tartu 2016		
<p>The major objective of this study is the use of airborne lidar data for estimating standing wood volume and price of forest. This study gives an estimated volume for standing wood to one specific forest, using airborne lidar data. The results are compared with the standing wood volume taken from the forest's inventory data.</p> <p>The results reveal that the estimating standing wood volume, using airborne lidar data is competent and can be an alternative for real estate evaluation in case forest inventory data are not available.</p>			
Keywords: forest, standing wood volume, airborne lidar, real estate evaluation			

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Kaugseire ja aerolidar.....	6
2. Andmete töötamise meetodika.....	9
3. Töö käik.....	11
3.1. Andmete kuvamine programmis FUSION.....	11
3.2. Maapinna kõrgusmudeli koostamine.....	12
3.3. Puuvõrastiku tuletamine.....	13
3.4. Tüvemahu ja metsa struktuuri hindamine.....	13
4. Tulemused.....	16
5. Arutelu.....	20
6. Kokkuvõte.....	22
7. Kasutatud kirjandus.....	23
8. Summary.....	25

SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärk on anda ülevaade sellest, kuidas aerolidari andmete abil on võimalik saada mistahes metsale puidumahu hinnang. Töös antakse lühike ülevaade aerolidari tööpõhimõttest. Tutvustatakse programmi, millega on võimalik aerolidarist saadud andmeid töödelda. Kirjeldatakse meetodikat, mida tuleb rakendada, et saada metsa puude tüvemahu hinnang kaugseire abil. Meetodika praktiseerimiseks on töö autor teinud Järvelja Õppe- ja Katsemetskonna kuue metsakvartali kohta puidumahu hinnangu, kasutades Maa-ameti aerolidari andmeid. Saadud tulemusi võrreldakse samade kvartalite takseerandmetega, mis on kogutud aastal 2010. Tulemused analüüsitakse ja antakse hinnang täpsuse kohta.

1. KAUGSEIRE JA AEROLIDAR

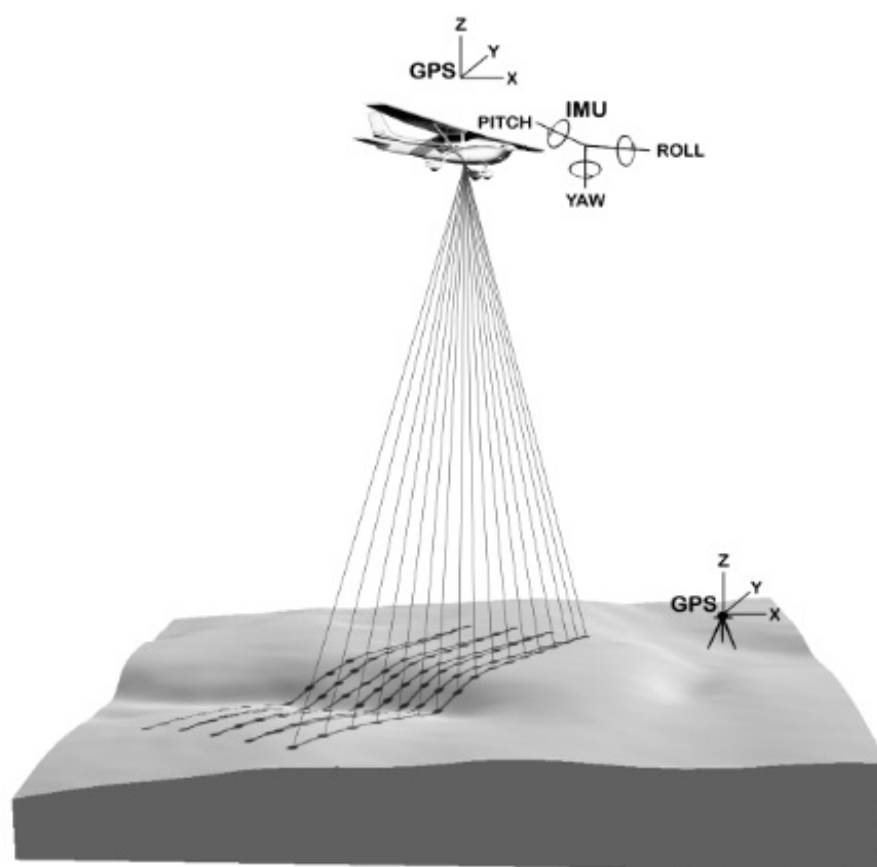
Kaugseire tähendab objekti vaatlemist või informatsiooni kogumist eemalt. Selliselt määratletuna hõlmab kaugseire endas mitmekesiseid mõõtevahendeid (Heritage, Large 2009). Nendeks võivad olla nii satelliidid, millel on sensorid maa uurimiseks, mehitatud või mehitamata lennuseadmed, mis on varustatud aerofotokaameraga ja/või aerolidariga (LIDAR – Laser Imaging, Detection and Ranging). Samas võib kaugseireandmestikuks olla ka tavaline foto, millelt on võimalik saada infot mingi objekti kohta. Seega on kaugseire mõiste suhteliselt laialivalgus.

Käesolevas töös on kasutatud Maa-ameti poolt kogutud aerolidari mõõdistamise andmeid. Maaamet on kogunud lidariandmeid Eesti kohta aastatel 2008-2011, koos aeropildistamisega. Maaamet kasutab laserskannerimiseks seadet Leica ALS50-II (Metsur 2012). Seadme tehnilised spetsifikatsioonid on toodud tabelis (1). Lidarmõõdistamiseks ja aerofotode tegemiseks on tarvis pilvitut ilma soovitatav lendamise aeg kevadel või sügisel, kui taimestiku vegetatsiooniperiood on algamas või lõppemas. See loob soodsad eeldused täpsemaks ja kvaliteetsemaks mõõdistamiseks. Maa-ameti poolt kogutud lidari toorandmed on kõigile vabalt kasutamiseks saadaval.

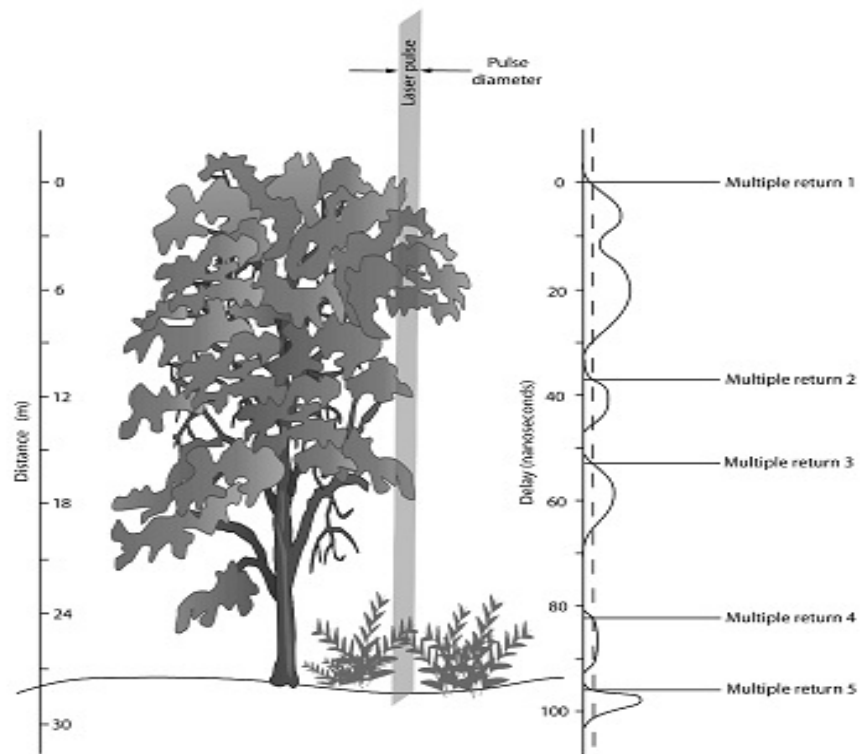
Tabel 1. Aerolidar Leica ALS50-II tehnilised parameetrid (Metsur 2012)

Leica ALS50-II	
Parameeter	Väärtus
Laserkiire skanneerimismuster	Sinusoidaalne (sik-sak)
Opereerimise kõrgus	200-6000 m maapinnast
Maksimaalne peegli võnkesagedus	90 Hz
Maksimaalne impulsi sagedus	20 -150 kHz, mitmikimpulss
Registreeritavad peegeldused impulsi kohta	Esimene, teine, kolmas, viimane
Maksimaalne vaateväli	0 - 75 kraadi
Kalde stabilisatsioon	Automaatselt kohanduv
Salvestus andmekandja	300 GB HDD
Keskkonna valgustustingimused töötamiseks	Ei vaja valgust (töötab ka öösel)

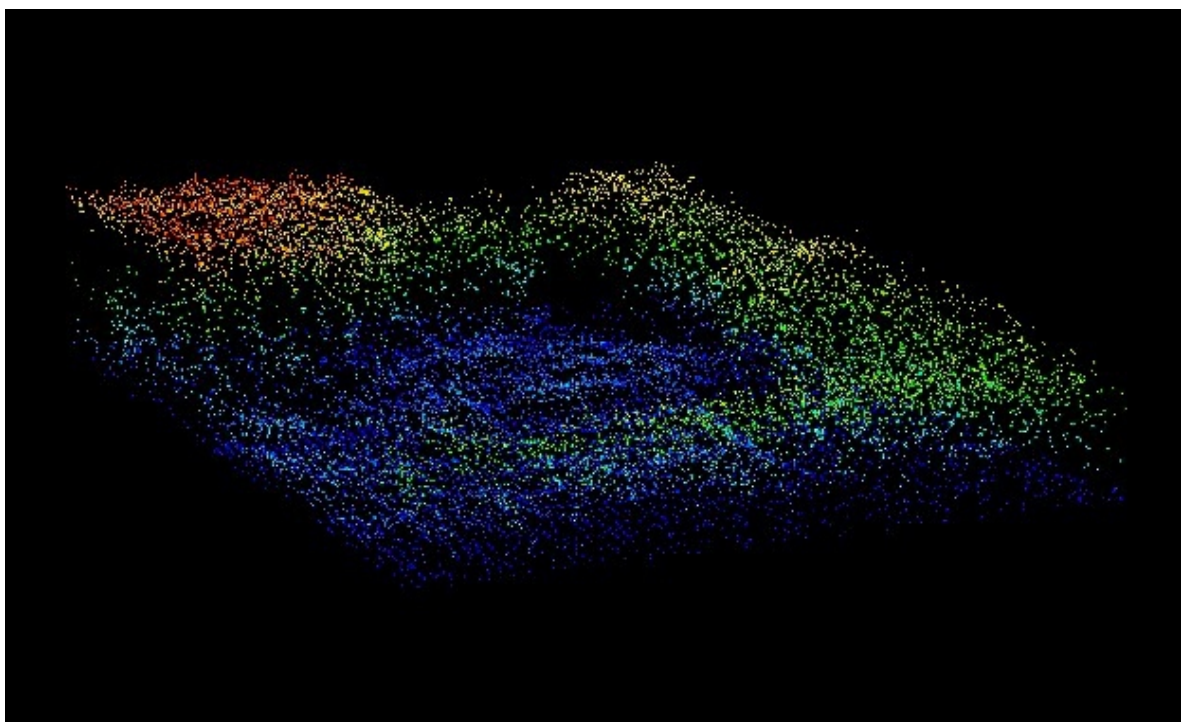
Aerolidar on seade, mis asub lennukil ja mõõdab ala, millest ta üle lendab. Aerolidar saadab välja valgusimpulsi, ning registreerib tagasipeegeldunud valguse energiat (joonis 1). Ühest välja saadetud impulsist tuleb tagasi mitu peegeldust (Heritage, Large 2009) (joonis 2). Valgusimpulsi välja saatmise ja peegelduste saabumise vaheline aeg salvestatakse ja rehkendatakse välja koht ja kaugus objektist, millelt valgusimpulss peegeldus. Kogutud andmetest moodustub punktipilv (joonis 3), mis sisaldab endas mõõdetud ala kõrguse ja asukoha infot.



Joonis 1. Aerolidar kaardistamas maapinda (Andersen 2006)



Joonis 2. Valgusimpulsi mitmekordne peegeldumine (Andersen 2006)

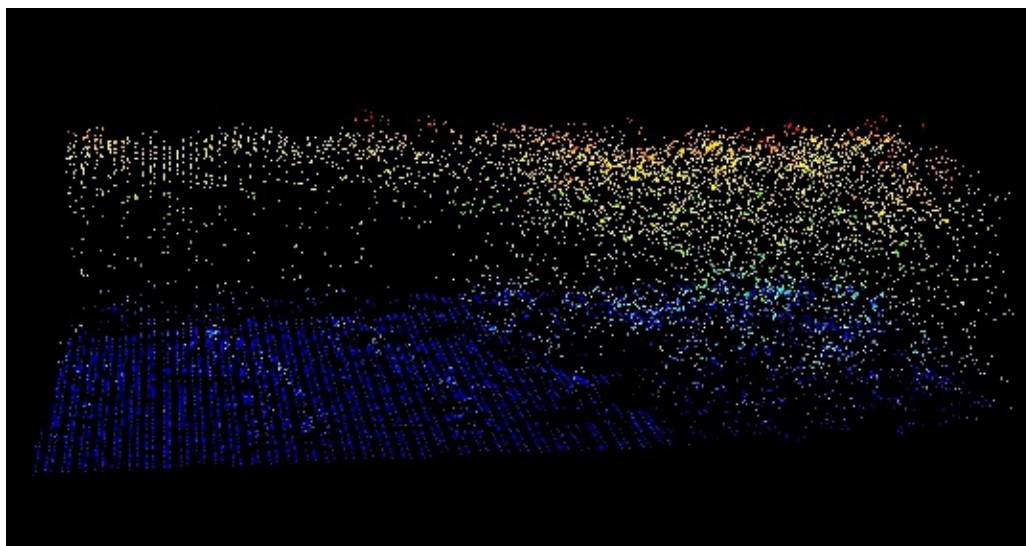


Joonis 3. Aerolidariga kogutud punktipilv

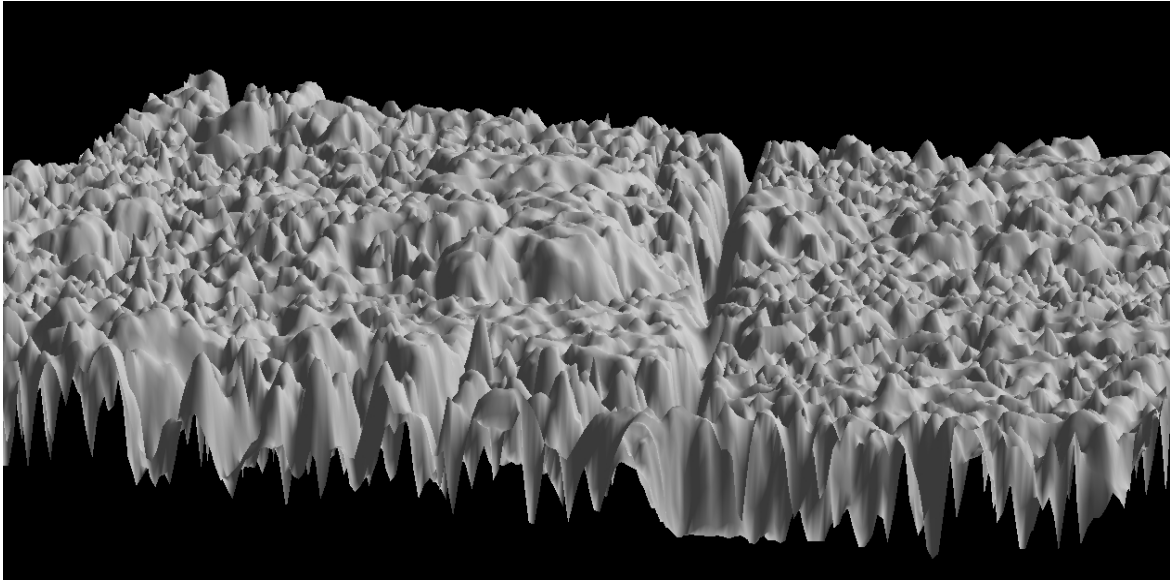
2. ANDMETE TÖÖTLUSE METOODIKA

Lidari punktipilv tuleb avada selleks sobilikus andmetöötlusprogrammis. Üheks selliseks on Ameerika Ühendriikide põllumajanduse osakonna poolt arendatud programm FUSION, mis on vabavarana kättesaadav kõigile (McGaughey 2016). FUSIONis on võimalik kuvada lidari punktiparve graafiliselt (joonis 4).

Kasutades erinevaid FUSION alamprogramme, on võimalik koostada punktiparvest maapinna mudel ja erinevate võtetega puuvõrastiku mudeleid (joonis 5).



Joonis 4. FUSIONis kuvatud aerolidari punktipilve osa



Joonis 5. Punktiparvest genereeritud puuvõrastiku mudel

Et saada lidari andmetest puude tüvemahu hinnang, on vaja jagada uuritav maa-ala rastriks või eraldada huvipakkuva metsa alalt peegeldused eraldi punkt pilvena. Järgmiseks tuleb lasta programmil kalkuleerida iga rastri pikslile või iga metsa punkt pilve jäävate peegelduste kõrgused maapinnast ning punkt pilve kirjeldavad statistikud ehk meetrikad. Samuti on vaja teada, palju ühe rastri ruudu peale peegeldusi on kokku. Üheks oluliseks meetrikaks on protsentiil. P-protsentiil on arv, millest P protsenti andmestikus olevatest väärtustest on arvust madalama väärtusega. Kui kujutada ette saja punktilist kolmemõõtmelist punktisarve, siis protsentiil 80 kõrguse kohta oleks see kõrguse tasapinna väärtus, millest allpool oleks 80 protsenti 100-st punktist. Maapinnast kõrgemal olevate peegelduste ja kõikide peegelduste omavaheline suhe annab tulemuseks katvuse (Lang jt 2012). Katvus annab aimu sellest, kui tihe on mets. Lisaks saab uuritava ala kohta kätte palju lisainfot, mis iseloomustab uuritavat piirkonda.

Kasutades punkt pilvest rehkendatud meetrikaid ning eelnevates teadustöodes välja töötatud arvutusmudeleid, on võimalik anda uuritavale metsale tüvemahu hinnang (Lang jt 2012). Kindlasti tuleb arvestada sellega, et tegemist on kaugseirega. See tähendab et, tulemuste analüüsis tuleb meeles pidada seda et lidariandmetes esineb asukohavigasid ja lennutrajektoori ülekattuvust, mis toob kaasa endaga punkt tiheduse erinevusi uuritaval alal (Lang jt 2012). Lisaks mõjutab tulemusi vegetatsiooniperiood, kui puud on tugevalt lehes, siis kõrguse 80 protsentiil annab suurema väärtuse.

3. TÖÖ KÄIK

3.1. Andmete kuvamine programmis FUSION

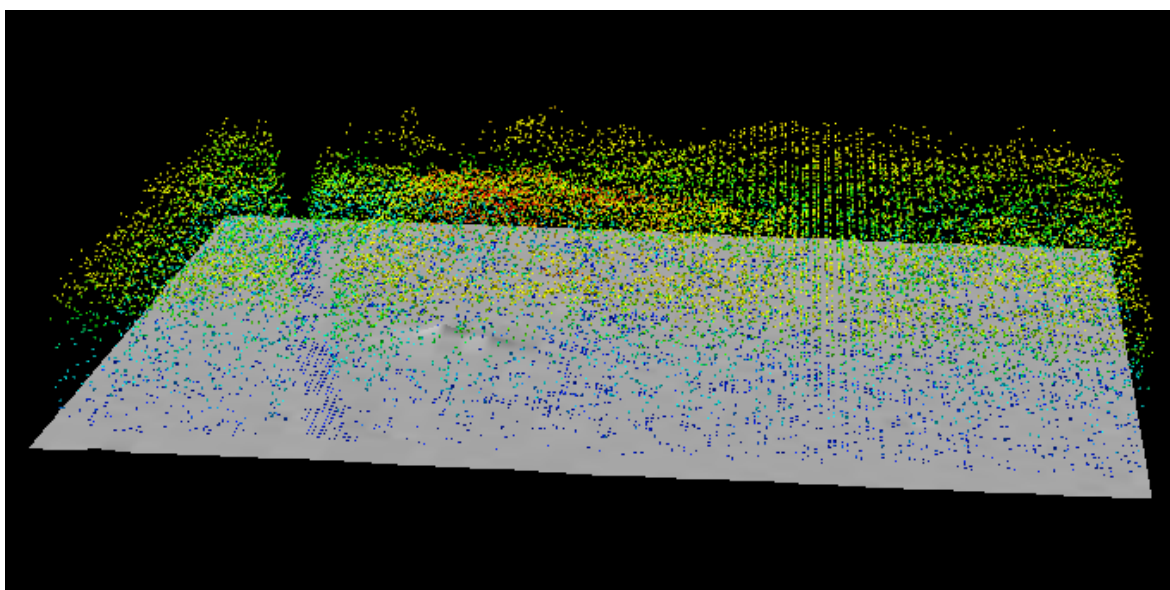
Maa-ametist saadud aerolidari punktipilvest on välja lõigatud osa, mis katab Järvelja Õppe ja Katsemetskonna metsakvartalid numbriga JS243, JS226, JS244, JS242, JS227, JS228. Uuritaval alal on kokku 88 puistut. Uuritava ala kogupindala on 111,3 ha. Saadud väljalõige avati programmis FUSION. Kõigepealt kuvatakse punktiparve põhjal esialgne pilt uuritavast alast. Sellele pildile lisatakse metsa takseerimisel saadud eraldiste kaart, kus on näha kvartalite ja puistute piirid (joonis 6). Esialgsest tulemusest on näha, kuidas metsakvartalite vahelised sihid eraldavad kvartalid ja puistud eristuvad üksteisest.



Joonis 6. Punktiparve väljavõtte metsakvartalite kohta

3.2. Maapinna kõrgusmudeli koostamine

Järgmise sammuna tuleb uuritava ala kohta koostada maapinna mudel. Seda tehakse kasutades programmi FUSION funktsioone. Maapinna mudeli koostamise protsess on järgmine. Maapind jagatakse fikseeritud mõõtmetega piksliteks, antud töö puhul sai piksli külje suuruseks valitud 8 meetrit. Maapinna mudeli loomiseks eraldati maapinnalähedased peegeldused mooduliga *Groundfilter*, kasutades varasemates tötlustes sobivateks osutunud parameetrite väärtuseid [groundfilter: /gparam:-1.2 /wparam:2.1 /tolerance:0.1 /iterations:10]. Rastri koostamisel võetakse arvesse ainult need punktid mis on kasutaja poolt fikseeritud. Antud töö puhul on valitud kõrguse vahemikuks 0 – 1 meetrit. Groundfilter moodul hindab punktide asukohta igal pikslil ja tasandab punktid pinnaks tõenäosusfunktsiooni abil. Niimoodi proovitakse vältida madalhaljustuselt peegeldunud punktide genereerimist maapinnaks. Joonisel (7) on väljalõige uuritavast alast, kus on näha punktiparve koos mooduli koostatud maapinnaga.



Joonis 7. Punktiparv koos maapinnaga

3.3. Puuvõrastiku tuletamine

Puuvõrastiku tuletamiseks kasutati programmi FUSION, moodulit *Canopymodel*, kasutades varasemates töötlustes sobivateks osutunud parameetrite väärtuseid, mis võtab arvesse punktisarve punktid, mis on kõige kõrgemad. Kõrgusele seatakse ka ülemine piir, mis välistab linnud, kes on aerolidari laserikiirega „pihta saanud“ ja selle tulemusena on aerolidar salvestanud ka need peegeldused. Antud töös on ülemiseks piiriks seatud 50 meetrit. Puuvõrastikku iseloomustav pilt on nähtav joonisel 5. Antud töö osa tehti andmestiku visuaalse kontrolli jaoks.

3.4. Tüvemahu ja metsa struktuuri hindamine

Tüvemahu hindamiseks on tarvis teha uuritavast alast väljavõte, kus takseerimisest saadud kaardi alusel lõigatakse punktisarve puistu piiride järgi osadeks. Peegeldused, mis võetakse arvesse, jäävad genereeritud maapinna ja võrastiku mudelite vahele. Parema tulemuse saavutamiseks tuleks vältida olukorda, kus ühele piirkonnale jääb vähem kui 100 peegeldust, sest vähema arvu peegelduste põhjal saadud punktisarve meetrikate juhuslikud vead kasvavad oluliselt. Niimoodi saadakse iga puistu kohta väljavõte, kus on iga puistu kohta teada järgnev info:

1. Summaarne peegelduste arv (N)
2. Esimeste peegelduste arv (N_1)
3. Teiste peegelduste arv (N_2)
4. Kolmandate peegelduste arv (N_3)
5. Viimaste peegelduste arv (N_4)
6. Peegelduste statistikud, millest mõned on järgmised:
 - 6.1. Miinimumkõrgus (H_{min})
 - 6.2. Maksimumkõrgus (H_{maks})
 - 6.3. keskmine kõrgus (H_{kesk})
 - 6.4. Kõrguse mood (H_{mood})
 - 6.5. Kõrguse standardhälve (H_{stdev})
 - 6.6. Kõrguse protsentiilid (H_x , kus x on protsentiili tähis 1 – 99)

Tüvemahule (M) hinnangu andmiseks on välja töötatud arvutusmodelid, mis kasutavad kõrguse 80 ja 25 protsentiili ning katvust, mis on parameeter, mis jääb 0 ja 1 vahele.

Töös kasutati järgnevaid varasemates uuringutes välja töötatud aerolidari arvutusmudeleid:

1. $M = aH_{80}^b$
2. $M = aH_{80}^b + cH_{25}$
3. $M = aH_{80}^b * K_x^c$
4. $M = (aH_{80}^b + cH_{25}) * K_x^d$

H_{80} - kõrguse 80 protsentiil

H_{25} - kõrguse 25 protsentiil

K_x - kasutaja poolt kasutatud katvuse väärtus referentskõrgusel x

a, b, c – arvutusmodelite jaoks välja töötatud parameetrid

Arvutustes kasutatud mudelid ja nende parameetrid (a, b, c , ja d) parameetrid pärinevad Lang jt (2012) tööst ja on toodud tabelis (2).

Tabel 2. Arvutusmodelites kasutatavad a, b, c ja d parameetrite väärtused (Lang jt 2012)

Mudeli nr.	a	b	c	d
1	4,603	1,422	-	-
2	3,147	1,5	3,724	-
3	9,721	1,269	0,907	-
4	5,784	1,361	8,649	0,96

Mudelid arvutavad puistu tagavara kuupmeetrites hektari kohta. Mudel 1 ja 2 ei arvesta mahu arvutamisel puuvõrastiku katvust, seega mudelite 1 ja 2 abil tuletatud puistu maht tuleb üsna ühesugune kõikides sama kõrgetes puistutes, kui metsa täius ei ole oluliselt väiksem kui 0,25. Mudelid 3 ja 4 võtavad arvesse ka katvuse parameetrit, mille väärtuse arvutab FUSION uuritava ala kohta ise välja. Võrastiku katvus on puude võraprojektsioonide pindala ja puistu pindala suhe (Lang jt 2012). Käesoleva töö puhul ei kasutatud programmi FUSION poolt rehkendatud katvuse väärtuseid. Katvuse asemel kasutati takseerandmetest pärit puistute esimese rinde täiuse väärtust. Metsa võrastiku

katvus ja puistu takseeritud täius on omavahel seotud, kuid seos on suure hajuvusega (Lang jt 2012: joonis 5c).

Uuritavale alale anti tüvemahu hinnang kvartalite lõikes ja kogu alale kokku. Esialgsed tulemused tulevad iga puistu kohta, mis on uuritaval alal. Igale puistule tuleb 5 mahuhinnangut hektari kohta (takseeritud maht (M_{taks}), mudelid 1 – 4 ($M_{m1}..M_{m4}$)). Teades iga puistu pindala, saame arvutada igale puistule viis puidumahu hinnangut kuupmeetrites. Selleks tuleb korrutada puistu pindala ja esialgne mahuhinnang. Kuna on teada ka millisesse kvartalisse iga puistu kuulub, saame tulemused kokku võtta kvartalite lõikes. Kui mahuhinnangud kvartalitele on olemas, saab kokku võtta kogu uuritava ala ja anda viis mahuhinnangut tervele alale.

Lisaks eelnevale on antud metsale ka rahalise väärtuse hinnang vastavale iga puistu peapuuliigile. Kasutades puistute peapuuliike, arvutati välja igale kvartalile kaalutud keskmine kuupmeetri hind puistu pindala alusel. Puuliikide hinnad tabelis (3). Puuliikide hinnad pärinevad Erametsakeskuse 2016. aasta esimese kvartali hinnainfo aruandest (Erametsakeskus 2016). Arvutuskäiku esialgselt kaasatud puidu hinnad on puuliikide palkide hinnad. Et saada hinnad kasvavale metsale, kohandati palkide hindasid „jämedalt“ korrutades need läbi konstandiga 0,6. Kuna pärna kohta ei olnud hinnainfot saadaval, siis pärna hind asendati kase omaga.

Tabel 3. Puuliikide hinnad (Erametsakeskus 2016)

Puuliik	Palgi hind (EUR/tm)	Kasvava metsa hind (EUR/tm)
Haab	38,33	23.00
Kask/Pärm	63,33	38.00
Kuusk	66,61	39,97
Mänd	68,19	40,91
Lepp	34,00	20.40

Kvartali kaalutud keskmise puidu kuupmeetri hinna arvutamiseks tuleb puistute pindalad jagada kvartali pindalaga. Saadud väärtus korrutada iga puistu peapuuliigi hinnaga, ning need tulemused summeerida. Sel meetodil saadakse kvartalile kaalutud keskmine puidu kuupmeetri hind eurodes puistute pindala alusel.

4. TULEMUSED

Tehtud töö tulemusena saadi uuritavale ala kohta viis mahuhinnangut ning viis hinnangut rahalisele väärtusele. Tulemused on näha tabelis (4) ja (5). Tabelites nähtavad metsa mahu ja kasvava metsa väärtused on ümardatud.

Tabel 4. Arvutusmodelitega saadud mahu ja rahalise väärtuse tulemused kasutades tabelis (3) esitatud hindasid, katvuse parameeterit $K_x=0,6$

Piirkond	JS243	JS226	JS244	JS242	JS227	JS228	Kogu uuritav ala	
Pindala (ha)	18,6	19,1	17,9	18,6	18,6	18,5	111,3	
Täius	0,65	0,61	0,61	0,58	0,66	0,62	0,62	
M_{taks} (m³)	5997	5029	4738	5799	6376	4150	32089	
M_{m1} (m³)	8067	6786	8118	9829	9595	8299	50693	
M_{m2} (m³)	8043	6530	8179	9347	9477	8261	49837	
M_{m3} (m³)	6515	5645	6578	7835	7667	6734	40974	
M_{m4} (m³)	6391	5223	6580	7030	7386	6595	39205	
	Puidu kaalutud keskmine hind (EUR/m³)							
	36,24	37,78	38,52	37,20	32,25	33,72	35,95	
Hind	V_{taks} (tuhat EUR)	217,3	190,0	182,5	215,7	205,7	139,9	1154
	V_{m1} (tuhat EUR)	292,3	256,4	312,7	365,6	309,5	279,8	1823
	V_{m2} (tuhat EUR)	291,5	246,7	315,1	347,7	305,7	278,5	1792
	V_{m3} (tuhat EUR)	236,1	213,3	253,4	291,4	247,3	227,1	1473
	V_{m4} (tuhat EUR)	231,6	197,3	253,5	261,5	238,2	222,4	1410

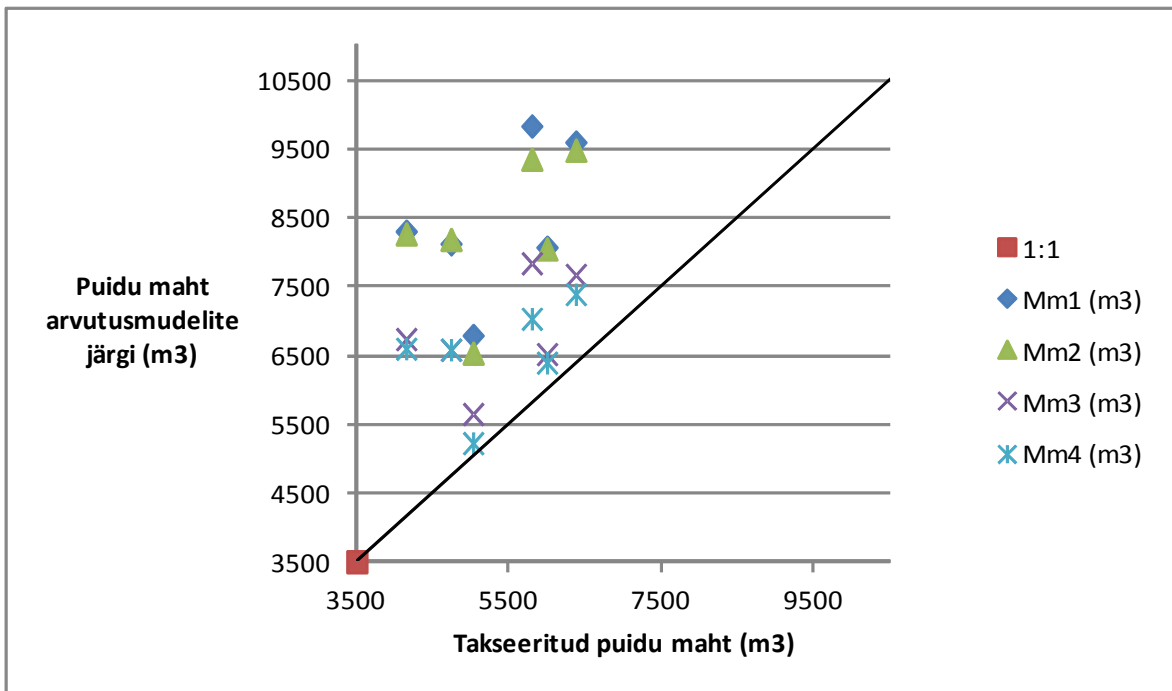
Tabelis (4) on näha, kuidas arvutusmodelitega saadud tulemused erinevad takseeritud mahust. Mudelid 1 (M_{m1}) ja 2 (M_{m2}) ei võta arvesse metsa võrastiku katvust, seega nende tulemus on märkimisväärselt suurem. Mudelid 3 (M_{m3}) ja 4 (M_{m4}) kasutavad ka katvuse parameetrit. Antud töö puhul on katvuse parameeter asendatud metsa esimese rinde täiuse väärtusega. Tabelis (4) kasutatud on täiuse parameetriks kasutaja poolt valitud 0,6 kasutades eeldust, et katvus ja täius võiksid mõlemad sarnaselt kirjeldada metsa tihedust. Tabelis (5) on tulemused, kus täiuse parameetriks on valitud 0,8.

Tabel 5. Arvutusmudelitega saadud mahu ja rahalise väärtuse tulemused kasutades tabelis (3) esitatud hindasid, katvuse parameeter $K_x=0,8$

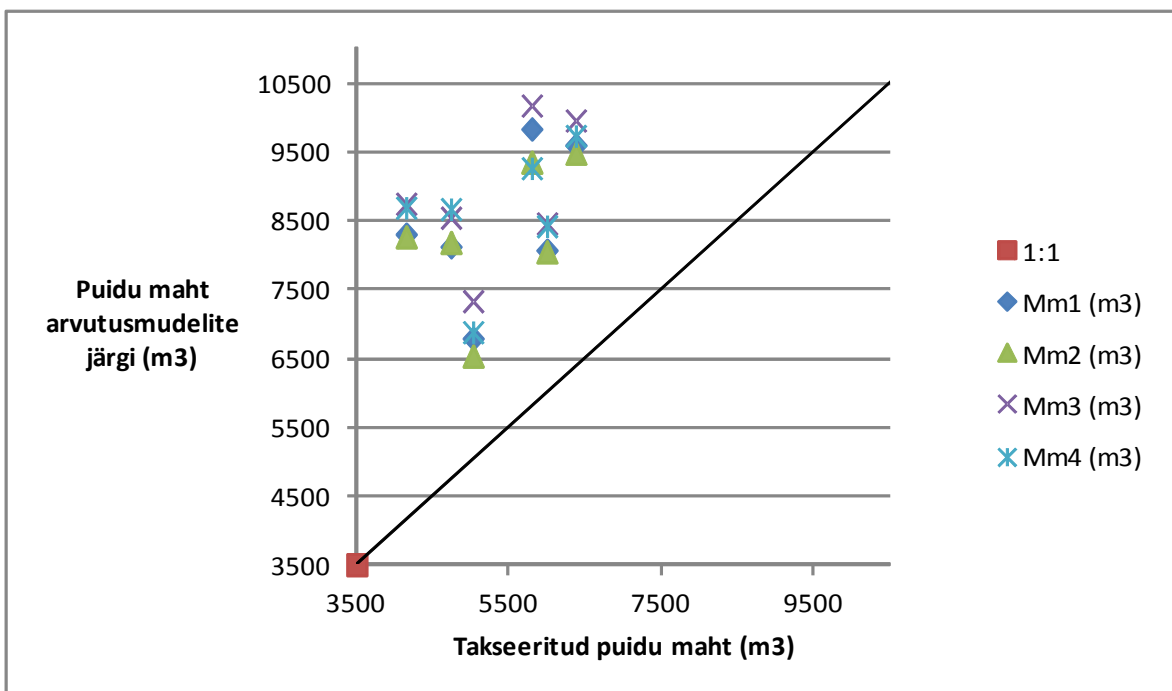
Piirkond	JS243	JS226	JS244	JS242	JS227	JS228	Kogu uuritav ala	
Pindala (ha)	18,6	19,1	17,9	18,6	18,6	18,5	111,3	
Täius	0,65	0,61	0,61	0,58	0,66	0,62	0,62	
M_{taks} (m³)	5997	5029	4738	5799	6376	4150	32089	
M_{m1} (m³)	8067	6786	8118	9829	9595	8299	50693	
M_{m2} (m³)	8043	6530	8179	9347	9477	8261	49837	
M_{m3} (m³)	8457	7327	8539	10170	9953	8742	53189	
M_{m4} (m³)	8416	6878	8666	9258	9727	8685	51630	
	Puidu kaalutud keskmine hind (EUR/m³)	36,24	37,78	38,52	37,20	32,25	33,72	35,95
Hind	V_{taks} (tuhat EUR)	217,3	190,0	182,5	215,7	205,7	139,9	1154
	V_{m1} (tuhat EUR)	292,3	256,4	312,7	365,6	309,5	279,8	1823
	V_{m2} (tuhat EUR)	291,5	246,7	315,1	347,7	305,7	278,5	1792
	V_{m3} (tuhat EUR)	306,5	276,9	328,9	378,3	321,0	294,8	1912
	V_{m4} (tuhat EUR)	305,0	259,9	333,8	344,4	313,7	292,8	1856

Tabelis (5) on näha, et katvuse parameetri muutus mõjutab oluliselt saadud mudelitega 3 ja 4 saadud tulemusi.

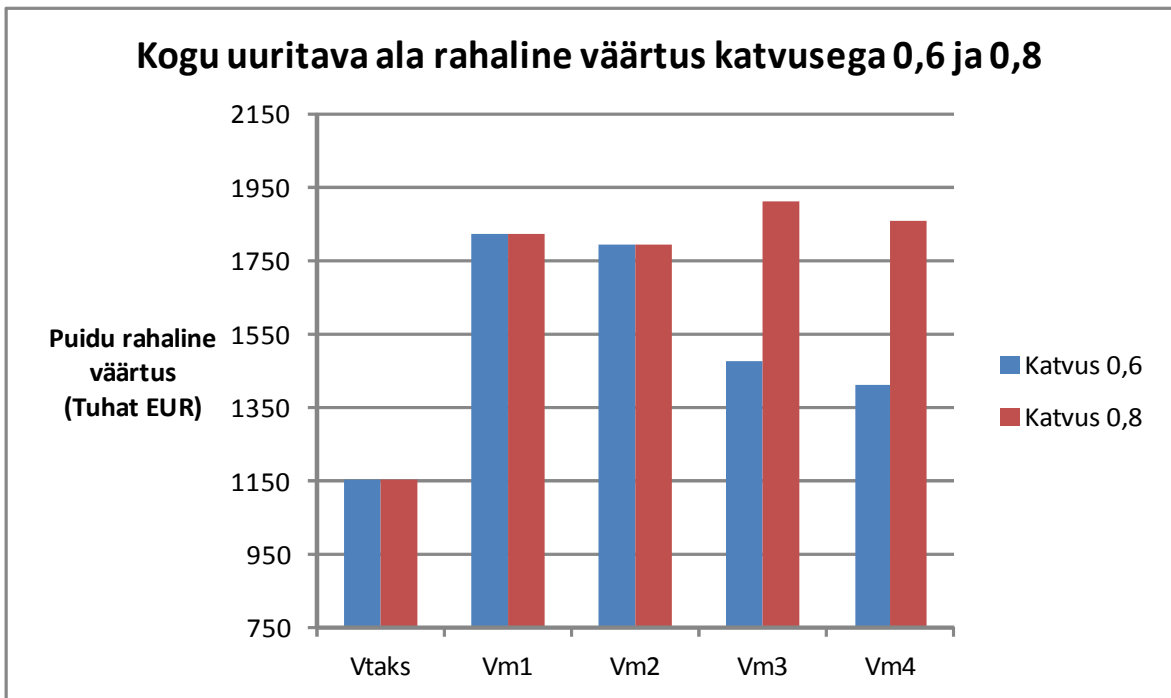
Saadud tulemuste iseloomustamiseks tehti tabelite (4) ja (5) põhjal ka joonised (8), (9) ja (10)



Joonis 8. Kvartalite puidu mahu võrdlus kui katvuse parameeter on 0,60



Joonis 9. Kvartalite puidu mahu võrdlus, kui katvuse parameeter on 0,80



Joonis 10. Kogu uuritava ala väärtus (tuhat EUR), mis on arvutatud kasutades tabeleid (3), (4) ja (5)

Joonistest (8) ja (9) on näha, et erinevate katvuse väärtuste puhul tuleb mudelite M_{m3} ja M_{m4} tulemustes märkimisväärne vahe. Suurema katvuse korral on mahtude omavaheline erinevus väiksem kui väiksema katvuse korral. Samas on väiksema katvuse korral tulemused lähemal takseerandmetel põhineval mahul. Joonisest (10) näeme samuti et katvuse parameeter mõjutab oluliselt metsale rahalise väärtuse andmist.

5. ARUTELU

Tehtud tööst ja saadud tulemustest saame järeldada, et uuritavale metsaga alale on võimalik anda puidu mahu hinnanguid ja rahaline väärtus. Käesoleva töö tulemustest saab väita, et 0,8 katvuse väärtusega saadud mahud on reaalsemad kui 0,6 katvuse väärtuse korral, kuna mudelitega saadud mahud erinevad üksteisest vähem 0,8 katvuse korral. Lisaks saab järeldada seda, et vaatamata metsa katvuse ja täiuse omavahelisele seosele, ei ole täius hea parameeter katvuse asendamiseks, kuna erinevus takseerandme põhjal saadud tulemustest oli üpris suur. Seega tuleks katvuse parameetri väärtus hinnata samuti otse aerolidari andmetest, kuid kuna katvuse ja punktipilve kõrgusjaotuse korruga hindamine on problemaatiline, siis tuleb teha andmestikust päringud kaks korda eraldi tingimustel. Käesolevas katses piirduti ainult kõrguse infoga.

Arvutusmudelite mahu tulemused erinevad takseerandmete abil saadud mahtudest erinevatel põhjustel. Metsa takseerimisel saadakse metsa kohta hea ruumiline info, kuid negatiivseks pooleks selle meetodi puhul on subjektiivsus. Enamus metsi iseloomustavaid väärtuseid hinnatakse silmamõõduliselt ning mõõtevahendeid kasutatakse andmete täpsustamiseks. Lisaks on asjaolu, et raiete tegemiseks peab olema metsaregistris kuni kümne aasta vanused takseerimisandmed, ning neid uuendatakse iga kümne aasta tagant. Seega keskmiselt on metsaregistris olevad inventeerimisandmed viis aastat vanad (Pärt 2010). Seda arvesse võttes saab järeldada, et uuritava ala tegelik kasvava metsa maht on suurem, kui takseerandmetest pärit maht.

Põhjus, miks võivad lidariandmete abil saadud mahud olla ebaühtlased, on punktiheduse erinevus uuritaval alal. Lidari sees oleva peegli liikumise suuna muutus põhjustab peegli liikumise aeglustumise, mis toob endaga kaasa lennuriba äärtealadele suurema punktiheduse pinnaühiku kohta. Lisaks veel see, et kaardistamise lennu trajektoor on planeeritud ülekattega. See tähendab et kõrvuti olevad lennuribad lähevad piltlikult üksteise peale, mis toob kaasa omakorda suurema punktiheduse suurenemise ülekattega aladel (Eesti Maaülikool 2013). Lennuribade keskel on punktihedus väiksem. Punktiheduse erinevus ei ole oluliseks faktoriks, kui uuritav ala on piisavalt väike, et jääb terviklikult lennuriba keskele või ülekattealale. Kui uuritav ala on piisavalt suur, siis samuti

ei tohiks punktiheduse erinevus olulisi ebatäpsusi tulemustesse tuua.

Lidariandmete töötlemises võib ette tulla ka asukohaga seotud probleeme. Käesolevas töös olid puistute ja kvartalite piirid olemas, seega sai nende abil punktiparvest õiged tükid välja „lõigata“. Kui metsa piire ei oleks, siis on mahu saamiseks kasutatav meetodika teistsugune. Uuritava ala punktiparvest tehakse raster, ning saadakse rasti pikslitele vajalikud meetrikad. Saadud tulemus avatakse sobiva GIS programmiga, kus statistikud moodustavad n.ö. kaardi, mida omakorda „lõigatakse“ vajalikes mõõtudes tükideks. Selle meetodi puhul on asukohtade ebatäpsuse tõenäosus suurem.

Uuritavale metsale rahalise väärtuse andmine sõltub mahuandmete täpsusest ning kasvava metsa hinnast. Vead võivad tekkida nii mahuarvutustest, kui ka uuritava ala puidu kuupmeetri hinna määramisest. Käesoleva töö puhul on uuritava ala rahaline väärtus pigem optimistlik, kuna puidu kuupmeetri hinna määramisel tehti viga, mida on proovitud konstandiga parandada.

6. KOKKUVÕTE

Tehtud töö tulemusena saab väita, et kasutades aerolidari andmeid uuritava metsa kohta, ning eelnevates uuringutes välja töötatud arvutusmudeleid, on võimalik anda uuritavale metsale mahuhinnanguid. Kasutades saadud mahtusid, on võimalik uuritavale metsale anda ka rahaline väärtus. Uuritava ala takseeritud maht on 32089 m³, kõrguse järgi tuletatud mahud M_{m1} on 50693 m³ ja M_{m2} on 49837 m³. Katvusega 0,6 arvutatud mahud M_{m3} on 40974 m³ ja M_{m4} on 39205 m³. Katvusega 0,8 arvutatud mahud M_{m3} on 53189 m³ ja M_{m4} on 51630 m³ (mahu väärtused on pärit tabelitest (4) ja (5) ning on ümardatud). Tulemused erinevad takseerandmetest pärit mahtudest, aga takseeritud mahtude ja arvutusmodelite mahtude vahel on näha omavahelist seost.

7. KASUTATUD KIRJANDUS

- Andersen, H.E., Reutebuch, S. E., MacGaughey, R. J.** (2006) Active remote sensing. http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/Andersen_et_al_2006_PR.pdf (20.11.2015)
- Heritage, G.L., Large, A.R.G.** (2009) Laser Scanning for the Environmental Sciences. Eds Heritage, G.L., Large. JohnWiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex, UK, 21–34.] (15.05.2016)
- 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. (15.05.2016)
- LIDAR andmete kasutusvõimaluste analüüs põllumajandusmaastikuseires. (2013) Tartu: Eesi Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. http://pmk.agri.ee/pkt/files/f6/maastik_2013.pdf
- Metsur, M.** (2012) LIDAR Leica ALS50-II. Maa-amet. Fotogramm-meetria osakond. http://geoportaal.maaamet.ee/docs/2012_LIDAR.pdf (18.05.2016)
- MacGaughey, R. J., Andersen, H.E., Reutebuch, S. E.** (2006) Considerations for planning, acquiring and processing lidar data for forestry applications. http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/McGaughey_et_al_2006.pdf (20.11.2015)
- McGaughey, R.J.** (2016.) FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and visualization. FUSION, Version 3.5. United States Department of Agriculture, Forest Service Pacific Northwest Research Station. <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>
- Mõistus, M., Lang, M.** (2015). Leaf area index mapping with optical methods and allometric models in SMEAR flux tower footprint at Järvselja, Estonia. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 63, 1–15. (15.05.2016)

Pärt, E. (2010) Ülevaade „Eesti metsavarud“.

http://www.envir.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/eestimetsavarud2.pdf

Ülevaade 2016. aasta I kvartali puiduturust. (2016) Kohila: Erametsakeskus

http://www.eramets.ee/wp-content/uploads/2013/01/puiduhinnad_2016_i_kv.pdf

8. SUMMARY

This study indicates that it is possible to estimate forest's standing wood volume using airborne lidar data and mathematical modules from previous studies. Using these estimated volumes of forests, it is possible to give a financial value to the forest. The forest's inventory data gave the forest's standing wood value to 32089 m³. Estimated volume using module M_{m1} is 50693 and module M_{m2} is 49837. Estimated volume with the coverage parameter 0,6: Module M_{m3} volume is 40974 and M_{m4} volume is 39205. Estimated volume with the coverage parameter 0,8: Module M_{m3} volume is 53189 and M_{m4} volume is 51630 (the volumes are from tables (4) and (5), and are rounded). Estimated volumes differ from volumes from the inventory volumes, although a relationship can be seen between these two volumes.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, **Märt Torop**,
(sünnipäev pp/kuu/aa **01/08/1991**)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Aerolidari kasutamise metsas puude tüvemahu hindamisel, mille juhendaja on **Mait Lang**,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, 19.05.2016

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)