

RMK TEADUSPROJEKTI LÕPPARUANNE

1. PROJEKTI NIMETUS: Lidarmõõtmistest ja multispektraalsetelt piltidelt puistute takseertunnuste hindamine Aegviidu katsealal

2. PROJEKTI KESTUS	Algus: 01.06.2011 Kuu/aasta	Lõpp: 31.01.2012 Kuu/aasta
---------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------

3. PROJEKTI TAOTLEJA (teadusasutus): Eesti Maaülikool

Telefon: +7313147

Aadress: Kreutzwaldi 1, 51014, Tartu

Registrikood: 74001086

Panga rekviisiidid: SEB, 10102000308001

4. PROJEKTI JUHT:	Mait Lang (Ees- ja perekonnanimi)	Vanemteadur, Ph.D (Amet, teaduskraad)
--------------------------	--------------------------------------	--

5. PROJEKTI PÕHITÄITJAD

Projekti põhitaitjad:

Ees- ja perekonnanimi	Teaduskraad	Ametikoht
1. Mait Lang	PhD	vanemteadur, Eesti Maaülikool
2. Tõnu Lükk		doktorand, Eesti Maaülikool
3. Johannes Anniste		GIS ja kaugseire spetsialist, Metsabüroo OÜ

Projektiga seotud abitööjõud:

1. Tauri Arumäe	RMK
-----------------	-----

6. PROJEKTI KULUD KOKKU 18200 eurot

Kulurida	Kokku
Töötasud (põhitaitjad + abitööjõud)	9900
Sotsiaalmaks	3267
Töötuskindlustusmaks	138,6
Ostetud teenused	0
Lähetuskulud	0
Materjalid, tarvikud, masinad, seadmed	3074
Muud kulud	0,4
Üldkululõiv	1820
Kokku	18200

7. PROJEKTI TULEMUSED (maksimaalselt 10 lehekülge)

7.1 Projekti lühikokkuvõte (maksimaalselt 500 tähemärki)

Lidari ALS50-II andmeid tihedusega 0,5 impulssi m² kasutati puistute kõrguse ja tüvemahu ennustamiseks proovitükkide alusel koostatud regressioonimudelitega. Kõrgus lähendati puuliigist sõltumatult peegelduste 80-kvantiili lineaarseosega jääkveaga 2,1m. Tüvemahu mudelid olid puuliigiomased ja parim mudel põhines katvusel ning peegelduste kõrgusjaotuse kvartiilidel. Üldise mahumudeli jääkhälve oli 69 m³ ha⁻¹ ja puuliigiomastel mudelitel keskmiselt 10 m³ ha⁻¹ väiksem. SPOT-4 HRV-IR pilte kasutati koos 3D andmetega k-NN meetodis takseertunuste kaartide loomiseks.

7.2 Abstract (maksimaalselt 300 tähemärki)

ALS50-II data (0,5 pulses m²) were used predict forest height with residual error RSE=2.1m using linear model that was based on the 80-percentile of pulse return height distribution (PRHD). Stem volume was predicted with RSE=69 m³ ha⁻¹ using quartiles of PRHD and cover estimate. SPOT-4 HRV-IR images and lidar data were used in k-NN classification to produce maps of forest inventory variables.

Sissejuhatus

Metsa majandamise otsuste tegemiseks on vaja puistute struktuuri ja paiknemise andmeid. Harjumuspäraselt koosneb tänapäeval selline andmebaas tabelitest ning digitaalsest kaardist, milles on puistute piirid ning kirjeldused. Peamised tunnused, millele tuginevad metsa majandamise mudelid, otsused ja regulatsioon, on seotud puistute liigilise koosseisuga, puude mõõtmatega ja paigutusega ruumis. Lisaks on olulised loomulikult kasvukoha viljakus, puidu kasutamist reguleeriv metsa vanus ja ökosüsteemi üldiseks kirjeldamiseks mulla vee- ja toitaineterežiimi üldistav kasvukohatüüp ning häiringutega seonduv. Vajalikke andmeid koguvad kogenud taksaatorid peamiselt silmamõõdulise hindamise abil, millele täpsustamiseks mõõdetakse puistu kõrgus ja lihtrelaskoobiga puistuelementide rinnaspindala. (Krigul, 1972, Vaus, 2005).

Metsa takseerimisel kasutatakse välitöödele lisaks tavaliselt varasemad andmeid, sobivas spektripiirkonnas salvestatud aerofotot ja märkuseid tehtud töödest. Niisiis tugineb taksaator mingi puistu piiritlemisel ja kirjelduse koostamisel varasematele takseerkirjeldustele, pildidel olevale värvi- ja muule infole ning välitöödel saadud puistuelementide mõõtmete ja paigutuse hinnangutele ja mõõtmisandmetele. Järjest hägusemaks muutub piir kameraalsete ning välitööde vahel, sest enamiku infot hoitakse ja hallatakse raalkeskonnas ning nutitelefoni on juba praegu võimsamad kui keskmised lauaarvutid kümme aastat tagasi! Ka metsa takseerimisel kasutatavad aerofotod tehakse juba digitaalsete kaameratega (üldiselt multispektraalsed skannerid), mis salvestavad kujutise numbriliselt eristades vastavate filtrite abil erinevaid spektripiirkondi (värve), mis võivad olla ka silmale nähtamatud. Vaatamiseks esitatakse pildi iga piksel kolme inimsilmale nähtava põhivärvi (sinine, roheline, punane) seguna. Põhivärvide osakaalud saadakse aérokaameraga või multispektraalse skanneriga salvestatud andmestikust sobivaid kanaleid (mingis spektripiirkonnas salvestatud signaal) valides. Puistute liigiline koosseis eristub hästi sellistelt kujutistelt, kuhu on kaasatud inimsilmale nähtamatu lähiiinfrapunase spektripiikonna (NIR, lainepikkus 700-1200 nm) signaal (Nilson, 1994).

Passiivse kaugseire valdkonda kuuluvast aero- ja satelliitpildistamisest hoopis erinev informatsiooni kogumise viis on lennukilt tehtav laserskaneerimine ehk lidarmõõtmine, mille peamiseks eesmärgiks oli algselt saada andmeid maapinna reljeefi kohta. Lidari tööpõhimõte on üldiselt lihtne - skanner saadab välja kindla lainepikkusega (monokromaatse) hästi väiksesse ruuminurka suunatud elektromagnetkiirguse impulsi ja mõõdab tagasi peegeldunud signaali teeloleku aja, millest valguse levimise kiiruse järgi arvutatakse teepikkus. Positsioneerimissüsteemi, lennuki asendiandurite ja skanneri optika vaatesuunurga järgi arvutatakse peegeldumiskoha kolmemõõtmelised koordinaadid (x,y,z). Ühes sekundis

saadetakse välja kümneid tuhandeid impulsse. Tulemuseks on kolmemõõtmeline (3D) koordinaatide andmestik, milles on tavaliselt veerand kuni kaks peegeldust horisontaalpinnal ruutmeetri kohta sõltuvalt peamiselt lennukõrgusest ja - kiirusest ning ajaühikus välja saadetavate impulsside arvust (Heritage ja Large, 2009). Lidariga kogutud andmestik on üsna otseselt seotud metsa kõrguse ja läbipaistvusega ning lidarmõõtmistest saadud 3D punktiparvi kasutatakse juba mitmel pool maailmas metsa struktuuri uurimisel (Næsset jt., 2004; Korhonen 2011; Anniste ja Viilup, 2011; Arumäe, 2011). Kuigi peegelduste andmestikust otseselt puutüvesid näha ei ole, võimaldavad võrastiku struktuuri ning metsa takseertunnuste seosed (Frey, 2009; Nilson, 2005) kasutada näiteks lidariandmetest saadud katvust täiuse ja puistu rinnaspindala hindamiseks.

Skandinaavia boreaalsete metsade jaoks on välja töötatud meetodika, milles kombineeritakse aeropilte, lidarmõõtmisi ja maapealseid kontrollproovitükke, et koostada takseertunnuste hinnangute kaardid (Tomppo jt., 2010). Meetodika on arendatud tasemele, kus saadavate hinnangute headus ulatub isegi lausmetsakorralduse tasemeni või on mõnede tunnuste osas isegi parem. Meetod tugineb proovialadelt saadud takseertunnuste ja kaugseireandmestikust arvatud statistikute seostele. Kogu ala katvad takseertunnuste kaardid saadakse kas regressioonimudeleid või mõnda k-lähima naabri laadset mitteparameetrilist tehnikat või masinõpet kasutades (Tamm ja Remm, 2009).

Käesoleva uurimisprojekti eesmärgiks oli Aegviidu katseala kohta 2008-2010 kogutud maapealsete ja kaugseireandmete abil otsida võimalusi Eesti metsadele sobiva lidarmõõtmistel ja multispektraalsel andmestikul põhineva metsade takseertunnuste hindamise meetodika väljatöötamiseks. Selleks uuriti 3D punktiparvedest ning spektraalsest andmestikust arvatavate statistikute seoseid proovitükkidel mõõdetud takseertunnustega ja otsiti vastust küsimusele, kas hinnanguid on võimalik saada puistu peapuuliigi järgi. Testiti võimalusi meetodika praktikas rakendamiseks suurtel aladel.

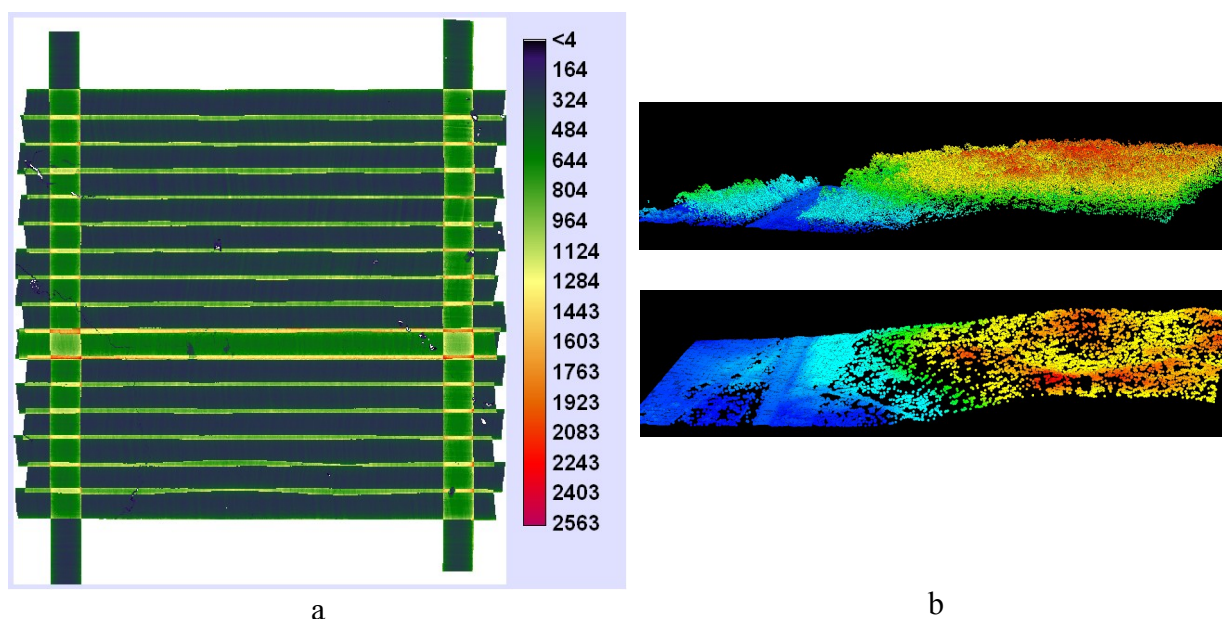
Materjal ja meetodika

Katseala asub Aegviidust ja Jänedast läänes ja kujutab endast 15x15km ruutu. Metsaregistri andmebaas katsetööde objekti kohta sisaldas 1999 - 2008. aasta metsainventeerimise andmeid riigi- ja erametsade kohta, samas osade metsade kohta inventeerimise andmed puudusid kas seetõttu, et maareform on lõpetamata või metsainventeerimine tegemata. Päringu tulemusena saadi andmed 9953 puistu kohta pindalaga 16 233 ha. Katsetööde objekti inventeeritud puistutest moodustavad 13 517 ha (83,0 %) riigimetsad ja 2 730 ha (17,0 %) erametsad. Katsetööde objektile on valitsevad männikud, moodustades 55 % puistute pindalast. Järgnevad kaasikud (22 %) ja kuusikud (20 %), muude puistute osatähtsus on väike (Anniste ja Viilup 2011). Katsealale oli rajatud puistute peapuuliigi esinemisega võrdeliselt. Käesolevas uuringus kasutati 453 proovitüki andmeid.

Kaugseireandmestiku analüüsiks kasutati 20 m ruumilise lahutusega Eesti põhikaardi koordinaatsüsteemis rasterkihte. Ortofotodelt arvutati iga kanali värvisignaali tugevuse keskvärtus ja lidariandmestikust peegelduste kõrgusjaotuste statistikud 20m piksli kohta. Kosmosepildiks oli 04. juunil 2008 selge ilmaga tehtud SPOT-4 HRVIR ülesvõte. Kosmosepildil on kujutised spektri rohelises, punases ja NIR (lähiinfrapunane) alas sarnaselt lähiinfrapuna ortofotodega ning lisaks lühilainelises infrapunases spektripiirkonnas (1580 - 1750 nm). Aerofotod tegi ja lidariandmed kogus Maa-amet 11.07.2008, 27.07.2008 ja 01.09.2008. Lennukõrgus maapinnast oli keskmiselt 2400 m. Lidari skanneriga ALS50-II impulsid kiiratakse lähiinfrapunases spektripiirkonnas lainepikkusel 1064 nm. Impulsiühikus maapinnal lidarifailide esimeste peegelduste statistika järgi oli keskmiselt 0,7-0,9 imp m⁻² (impulssi ruutmeetri kohta). Lennuribade servades põhjustab skanneri peegli suuna muutusega seotud liikumise aeglustumine oluliselt suurema impulsiühikuse pinnauhiku kohta sama

impulsisageduse juures (Joonis 1a). Lennuribade keskel on impulsihüvedus ca 0,45-0,50 imp m⁻². Iga impulsi kohta registreeriti kuni neli peegeldust. Keskmise peegelduste (P) hüvedus lennuribal oli 1-1,2 P m⁻².

Lidariandmete töötluks kasutati vabavara FUSION (McGaughey, 2010). Eeldatavalt maapinnalt tekkinud peegeldused eraldati mooduliga *Groundfilter*. Seejärel koostati *GridSurfaceCreate* abil iga riba jaoks rasterkujul digitaalne maapinna mudel, mille ruumiliseks lahutusvõimeks valiti 4,0 m. Maapinna kõrgusmudeli järgi arvutati kõrgused maapinnast igale peegeldusele. Edasiseks analüüsiks kasutati 20m ruumilise lahutusega rastrile arvutatud peegelduste kõrgusjaotuse kvantiile ja katvuse hinnangut (Lang, 2010).



Joonis 1. a) Esimeste peegelduste arv 400 m² kohta. Selgelt on näha lennuribade ülekattealad. b) Kolmemõõtmeline punktivarv, millest on eristatud eeldatavalt maapinnalt tekkinud peegeldused. Värv ilmestab peegelduse kõrgust ellipsoidist.

Proovitükil asuva puistu keskmist kõrgust lähendati lineaarse mudeliga, kus kasutati peegelduste kõrgusjaotuse 80-kvantiili H_{80} . Tüvemahu mudelite kuju valikul lähtuti puistu üldise ehituse seaduspärasustest. Tappo (1982) järgi on normaalpuistu tüvemahu lähendatav puistu kõrguse järgi. Puistu tüvemahu hindamiseks valiti lidaripeegelduste kõrgusjaotuse kvantiil H_{80} , mis oli praktiliselt lineaarselt seotud puistu kõrgusega ning alumine kvantiil H_{25} , mis eeldatavalt võiks kanda infot alumise rinde kohta. Kõrgusjaotuse kvantiilide arvutamisel arvestati ainult nende peegeldustega, mis olid tekkinud kõrgemalt kui 0,8m, välistades maapinna ja alustaimestiku. Testiti ka metsanduses hästi tuntud seos $M=TM_{norm}$, kus T on puistu täius, mida võiks kirjeldada lidari impulsside peegelduste andmetest arvutatud katvus K . Katvuse arvutamise referentsnivoo 0,8m valiti empiirilisel, et vältida rohu ja puhmarinde mõju K hinnangutele.

Peamiste takseertunnuste kaardid koostati k-lähima naabri klassifitseerimistehnika (k-NN) abil programmiga tknn ((c), Tõnu Lükk) ja mahu ennustus lisaks parima 3D-statistikutel põhineva regressioonimudeli abil. Testiti erinevaid sisendtunnuste komplekte k-NN ennustuste jaoks: 1) lidarilt maapinnapunkte kaasates ($h_p > -1$) arvutatud statistikud (kNN_{MGA}), 2) lidarilt maapinnapunktideta ($h_p > 0,8$) arvutatud statistikud (kNN_{MTA}), 3) SPOT HRVIR neli kanalit (kNN_{SPOT}) ja 4) kombineeritult kNN_{SPOT}+kNN_{MTA}=kNN_{SPOT+MTA}. Lidaristatistikutel peegeldusjärke ei eristatud. Täpsem ülevaade testides kasutatud statistikute testidest on tabelis (1). Lähimate naabrite arvuks võeti k=3. Koostati järgmiste tunnuste kaardid: peapuuliigi vanus (A), tüvemahu (M), kõrgus (H), rinnaspindala (A), täius (T) ja peapuuliik.

Tabel 1. Takseertunnuste kaartide koostamiseks kasutatud spektraalsed ja ruumilised statistikud

Statistikud	k-NN katse			
	kNN _{MGA}	kNN _{MTA}	kNN _{SPOT}	kNN _{SPOT+MTA}
Kõrgusjaotuse kvantiilid ($h_p > -1$): 1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99	X			
Kõrgusjaotuse kvantiilid ($h_p > 0,8$): 1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99		X		X
Keskmine heledus lidarilt I	X	X		
Katvus $K_{h>0,8}$ lidarilt referentsnivool 0,8m	X	X	X	X
Impulsi jagunemise kirjeldamiseks peegelduste arvude suhe $(\sum P_2 + \sum P_3) / \sum P_1$	X	X	X	X
SPOT HRVIR kanalid 1, 2, 3 ja 4			X	X

Koosseisu liikidest ennustati tüvemaht kaskedele, haabadele, mändidele, kuuskedele kokku ja teise rinde kuuskedele eraldi, hall-leppadele, sangleppadele ning muudele puuliikidele kokku. Peapuuliigi jaoks kasutati ennustamiseks moodväärtust leitud lähimatest naabritest, teiste tunnuste jaoks arvutati tulemuskaardile eukleidilise kaugusega kaalutud hinnang. Tulemuskaartidel metsa ja muud ala ei eristatud, mis edasist analüüsi ei takista. Tulemusi võrreldi lausmetsakorralduse andmestikuga.

Peamised tulemused

Puistu kõrguse hindamiseks lidariandmetest lähendati lineaarmudeliga puistu kõrguse ja lidaripeegelduste $H_{80/h_p > 0,8}$ seos üle kogu andmestiku ning eraldi männikute, kaasikute, kuusikute ja ülejäänud puuliikide jaoks (tabel 2). Determinatsioonikordaja R^2 tuli kõikidel juhtudel üle 0.81 ning mudeli jääkstandardviga kahe meetri lähedale. Mudeli parameetrite hinnanguid ning standardvigu arvestades võib Aegviidu andmestiku põhjal väita, et kõrgusjaotuse kvantiili $H_{80/h_p > 0,8}$ seos puistu keskmise kõrgusega ei ole oluliselt puuliigiomane.

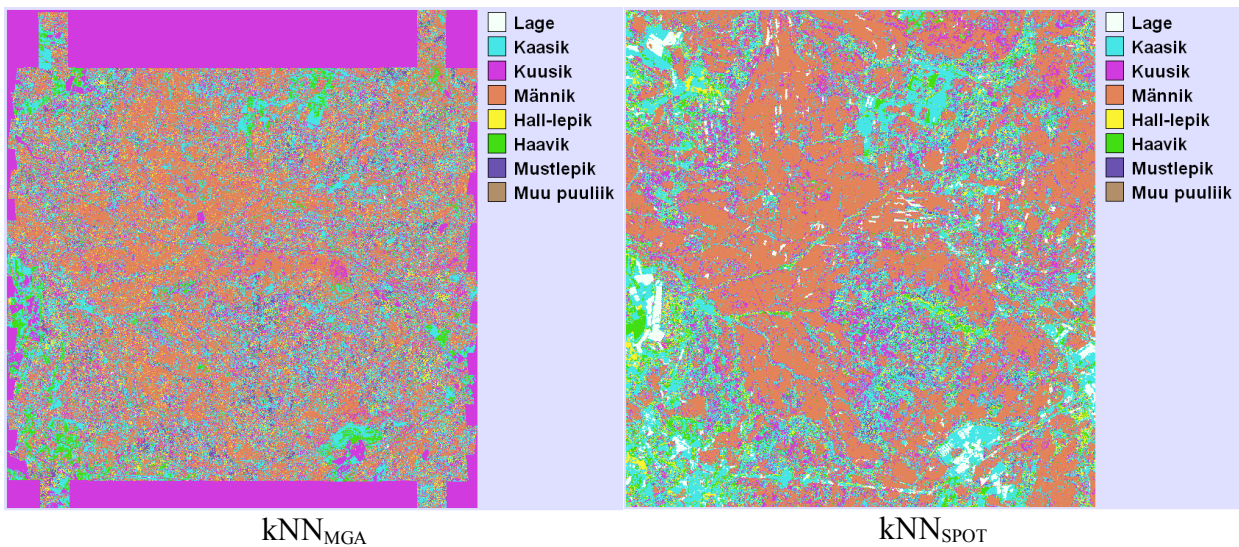
Tabel 2. Peegelduste kõrgusjaotuse 80-kvantiilil $H_{80/h_p > 0,8}$ põhinev puistu keskmise kõrguse mudel.

Puistu	Parameetrid				Mudel	
	a	Std. viga	b	Std. viga	R ²	Std. viga, m
Kõik	2.22142	0.31530	0.92701	0.01792	0.8565	2.127
Männik	3.13897	0.56712	0.89715	0.03151	0.8124	2.072
Kuusik	2.54305	0.72259	0.93429	0.04233	0.8423	2.378
Kaasik	1.18998	0.44942	0.94493	0.02625	0.9283	1.707
Teised	2.00235	0.80417	0.90521	0.04512	0.857	2.104

Puistu tüvemahu ennustamiseks sobivad loogiliselt peegelduste 3D-statistikud märgatavalt paremini kui spektraalne heledus, sest peegelduste kõrgusjaotus kirjeldab hästi puistu kõrgust, mis on otseselt seotud tüvemahuga. Seosed ei ole lineaarsed, kuid neis ei esine sarnast küllastumist nagu spektraalse heleduse puhul. Kvalitatiivselt ei ilmne seostes olulisi

erinevusi kui jätta välja maapinnapeegeldused. Loogiliselt sobivad tüvemahu ennustamiseks kõik peegelduste kõrgusjaotuse kvantiilid, mis kirjeldavad hästi puistu kõrgust.

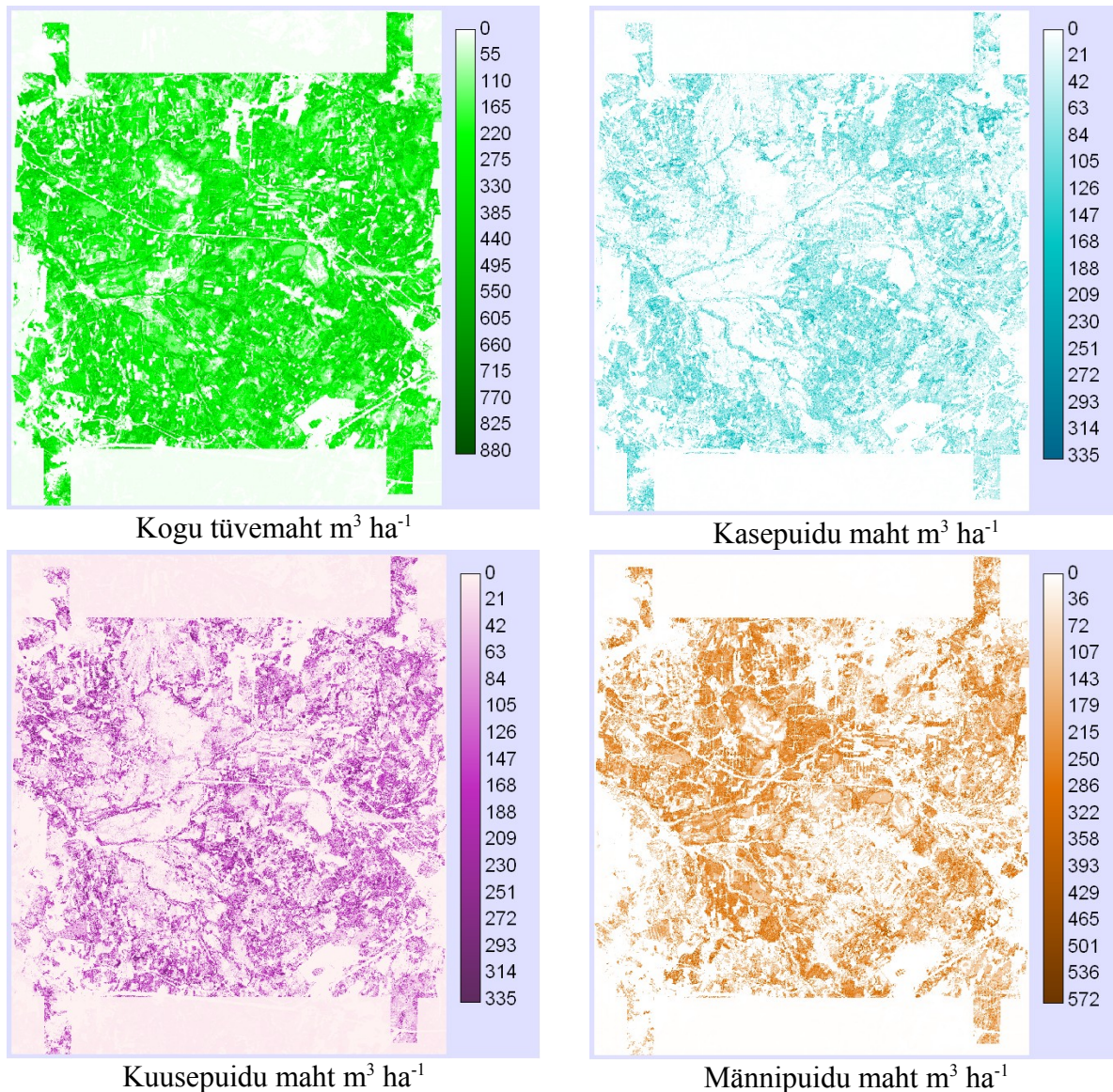
Tüvemahu ennustamiseks maapinnapeegeldusteta kõrgusjaotusest lähendati vaatlustel esmalt puuliigist sõltumatud üldised mudelid, mis põhinesid tunnustel $H_{25|h_r>0,8}$, $H_{80|h_r>0,8}$ ja $K(z=0,8)$. Ainult kõrgusjaotusel põhinevad mudelid lähendasid tüvemahtu jääkveega veidi üle $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Katvuse hinnangu lisamisel mudelisse kahanes jääkveega u. $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Parima mahumudeli ennustuse ja proovitükil kasvava puistu takseeritud tüvemahu hajuvusdiagrammilt ilmses, et üldine mudel võib tekitada süstemaatilisi vigu puuliigiti. Jääkide uurimisel selgus, et keskmiselt alahinnatakse tüvemahtu 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, siis on arvatavasti põhjuseks nii katvuse hinnangute sõltuvus puuliigist kui ka puuliigiti kõrguse ja tüvemahu seoste erinevused.



Joonis 2. Erinevate sisendtunnuste komplektide korral k-NN abil ennustatud peapuuliik. Ainult ruumilisel infol põhinevad kaart (kNN_{MGA}) on mürasem, sest lidar ALS50-II ei erista värve.

Seetõttu lähendati mahumudelite parameetrid enamupuuliigiti ja ja saadi ennustuse jääkveega kuni $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ parima mahumudeli korral. Puuliigiomaste mudelite rakendamisel praktikas on aga probleemiks vajadus teada eelnevalt puuliiki, mis 3D-statistikute põhjal ei ole hästi eristatav. Arvatavasti on võimalik saada veelgi väiksema jääkveega lähendid, sest käesolevas katses olid peegelduste statistikud arvatud 20m rastrilt, mis lisab hinnangutesse hajuvust, mida saab vältida, kui arvutada statistikud täpselt proovitüki kohta eraldatud peegelduste pilvest. Teisalt on praktiliste rakenduste puhul mudeli jääkhälbest isegi olulisem see, kui täpselt on võimalik hinnata mudelites kasutatud tunnuseid.

Enamupuuliigi kaartidelt (joonis 2) selgus juba vaatlusel, et kui kasutati ainult 3D-statistikuid ja lidari impulsi peegelduse tugevust (kNN_{MGA} , kNN_{MTA}) oli tulemuseks oluliselt mürasem kaart võrreldes spektraalse info kaasamisega (kNN_{SPOT} , $kNN_{SPOT+MTA}$). See ilmses ka puistu kõrguse ja mahu seoste analüüsis, kus peegelduste kõrgusjaotuste seosed puistu kõrgusega ja lidari peegelduse tugevuse seos puistu tüvemahuga ei olnud puuliigiomased. Katvus sõltus siiski puuliigist ning seetõttu ei ole ainult lidaril põhinevad puuliigi kaardid juhuslik müra. Proovitükkide mõõtmisandmetel saadud tüvemahu kaartidel (joonis 3) on takseerandmetega võrreldes maht suurem, mis on kooskõlas varasemate uuringutega (Anniste ja Viilup, 2011).



Joonis 3. Proovitükianndmete, kosmosepildi ja maapinnapeegeldusteta lidariandmete alusel k-lähima naabri meetodiga koostatud tüvamahu kaardid Aegviidu katsealal.

Järeldused

- Metsaeraldiste piiride määramiseks tehtavad digitaalsed ortofotod on mõeldud visuaalseks tõlgendamiseks, sest värvidele (signaalile) on rakendatud mitmesuguseid teisendusi, Esineb signaali süstemaatilisi moonutusi ning raaltötluseks need kujutised üldiselt enam ei sobi. Edaspidised uuringud on vajalikud, et selgitada nende digitaalsete ortofotode algmaterjali (toorpildid) kasutusvõimalusi.
- Kuni seitsme meetri suurune proovitüki asukohaviga ei mõjuta oluliselt kõrgusjaotuse ülemiste kvantiilide väärtuseid, kui proovitükid asuvad puistu ühtlases osas.
- Leidis kinnitust, et lidariimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse ülemised kvantiilid on sobivad puistu keskmise ja esimese rinde kõrguse ennustamiseks. Seosed puistu kõrguse on lineaarsed. Maapinnalt ja alustaimestikult (kõrgus alla 0,8m) tekkinud peegelduste väljajätmine kõrgusjaotuse ülemistele kvantiilidele olulist mõju ei avaldanud.
- Kõikide peegelduste kõrgusjaotuse 80-kvantiili ja puistu keskmise kõrguse seos oli üldiselt puuliigist sõltumatu. Siiski võib seda järeldust mõjutada proovitükkidele

kõrguste arvutamise meetod, kus oli kasutatud kogu andmestiku mudelpuudel põhinevat mudelit. Seetõttu olid puistutes puude kõrgusjaotused oluliselt sõltuvad koostatud mudelite headusest puuliigiti. Seega vajab metsamajanduse praktikas ülimalt oluline puistu kõrguse määramine lidarilt edasisi uuringuid.

- Selgus, et peegelduste kõrgusjaotusjaotus on tihti hästi seotud puistu puude kõrgusjaotuse ning seega ka rinnasdiameetrite jaotusega. Eraldistele rakendatuna annaks selliste mudelita olemasolu võimaluse saada lisainfot. Siiski on peegelduste kõrgusjaotus oluliselt seotud võrastiku pinnaelementide kõrgusjaotusega ning eraldiste puhul ka puistu tiheduse ebaühtlusega.
- Lidariandmetest arvatud katvus oli mittelineaarselt ning pigem puuliigiomaselt seotud rinnaspindala ja täiusega. Seosed täiusega olid üsna hajuvad ning otseselt praktikas kasutamiseks sobimatud.
- Puistute tüvemaht oli seotud nii ortofotodelt ja kosmosepiltidelt leitava spektraalse infoga kui ka lidariandmetest arvatud statistikutega. Visuaalseks tõlgendamiseks mõeldud värvikohandustega ortofotodelt arvatud heleduste seosed tüvemahuga ei ole praktikas kasutatavad. Kosmosepildilt arvatud heleduste järgi saab ennustada tüvemahtu jääkstandardhällbega üle $110 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, kui puuliike ei eristada. Lidariandmetest arvatud kõrgusjaotuse 80-kvantiilil, alumisel kvartiilil ning katvusel põhinev mudel lähendas algandmeid puuliike arvestamata jääkstandardveaga $69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja puuliike arvestades kuni $58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ männikutes. Täpsemate hinnangute saamine on seotud maapealse andmestiku kvaliteediga ja lidariandmetest statistikute kaasamisega.
- Liigilise koosseisu ennustamiseks lidariandmed ei sobi.
- k-lähima naabri klassifitseerimistehnika abil on võimalik koostada takseertunnuste kaarte ka ülepinnaalset Eesti metsade kohta sarnaselt Skandinaaviamaadega. Varasemad uuringud on näidanud, et maapealse andmestikuna võib aluseks võtta nii proovitükkide andmed kui ka lausmetsakorralduse andmed - mõlemal juhul on hinnangud seotud sisendi karakteristikutega.
- Problemaatilise aspektina ilmnes k-NN protseduuri puhul ka mõnedes varasemates teiste autorite töödes viidatud tüvemahu süstemaatiline ülehindamine noortes puistutes ja allahindamine suurema tüvemahuga puistutes (Aegviidus alates $350 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Sellise nihe sõltub protseduuri sisendina kasutatavast andmestikust ja selle kõrvaldamise võimaluste uurimine jätkub loodetavasti edaspidi.
- Metoodilistest erinevustest tingitud suurem tüvemahu hinnang klupitud proovitükkidel võrreldes laustakseerimise andmetega kandub ka k-NN meetodi puhul hinnangute kaartidele edasi.
- Metsaregistris testala kohta olevate 1996-2008 takseeritud andmete võrdlemisel 2008. aastal kogutud andmete alusel k-NN abil saadud ennustuste leiti, sarnaselt varasemale visuaalsele hinnangule, et spektraalse info kaasamine parandab oluliselt peapuuliigi ennustamise täpsust. Olulist erinevuse tekkimist puistute liigilises koosseisus andmete vananemisega seoses ei ilmnenud, aga mahu hinnangutes andmete vananemise trend ilmnes.
- Eraldiste tüvemahu võrdlemisel 2008. aasta andmetel saadud k-NN ennustustega ilmnes, et ainult lidariandmetel saadud hinnangud on vaid spektraalsele infole tuginevast ennustusest oluliselt tegelikule lähemal. Selgus aga, et kahe andmestiku koos kasutamisel täpsus ei kasvanud vaid jäi väiksemaks täpsemaks osutunud ainult lidaril põhinevale ennustusele, mis tähendab, et ennustatava tunnusega nõrgalt seotud info lisamine pigem kahandab ennustuste täpsust k-lähima naabri meetodi rakendamisel.
- Koostatud regressioonimudelite kasutamine on arvatavasti võimalik ka mujal Eestis, kus on sarnased metsad nagu Aegviidu testalal. Tuleb jälgida, et sisendina kasutatavad

lidariandmed oleksid samasuguste omadustega käesolevas projektis kasutatutele.

Viited

- Anniste, J., Viilup Ü. 2011. Metsa takseertunnuste määramisest laserskaneerimise abil. Artiklid ja uurimused 10:38-53. Luua Metsanduskool.
- Arumäe, T. 2011. Laserskanneri andmete kasutamine takseertunnuste hindamiseks. Magistritöö, 45 lk. Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool. Tartu.
- Heritage, G.L., Large, A.R.G. 2009. Principles of 3D Laser Scanning. – Laser Scanning for the Environmental Sciences, 21-34. Eds Heritage, G.L., Large. John Wiley& Sons, Ltd., Publication, West Sussex, UK.
- 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.
- Lang, M. 2010. Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga. Metsanduslikud Uurimused (Forestry Studies), 52, 5-17.
- Krigul, T. 1972. Metsatakseerimine. Tallinn, Valgus.
- 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.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, 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. Metsanduslikud uurimused 43:172-183.
- Nilson, T. 1994. Metsade kaugseire alused. Eesti Metsaamet ja Eesti Põllumajandusülikool. Tartu.
- Tamm, T., Remm, K. 2009. Estimating the parameters of forest inventory using machine learning and the reduction of remote sensing features. – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11, 290–297.
- Tappo, E. 1982. Eesti NSV puistute keskmised takseertunnused puistu enamuspuuliigi, boniteedi ja vanuse järgi. Eesti NSV Põllumajandusministeeriumi Informatsiooni ja Juurutamise Valitsus. Tallinn.
- Tomppo, E., Schadauer, K., McRoberts, R.E., Gschwantner, T., Gabler, K., Ståhl, G. 2010. History of NFIs. In: National Forest Inventories. Eds: Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R. pp 1-2. Springer.
- Vaus, M. 2005. Metsatakseerimine. Halo Kirjastus. Tartu.

8. PROJEKTIGA HAAKUVAD DOKTORI- JA MAGISTRITÖÖD:

Arumäe, T. 2011. Laserskanneri andmete kasutamine takseertunnuste hindamiseks. Magistritöö, 45 lk. Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool. Tartu.

9. PROJEKTI RAAMES AVALDATUD PUBLIKATSIOONID:

Avaldatud teaduspublikatsioone veel ei ole. Aruande detailses lisas on käsikirjade koostamiseks piisavalt materjali ja artiklite avaldamisel lisatakse viited projektile.

10. Projekti juht (nimi): Mait Lang	Allkiri:	Kuupäev: 29.02.2012
---	-----------------	----------------------------

11. Taotleja esindaja kinnitus aruande õigsuse kohta (nimi, amet): Paavo Kaimre, direktor	Allkiri:	Kuupäev:
--	-----------------	-----------------