

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja Maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

**Metsa jalgsi läbitavuse hindamine aerolaserskaneerimise
andmete alusel**

Ainar Härm

Juhendajad: dotsent Jüri Roosaare
MSc Kersti Vennik

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2017

Annotatsioon

Metsa jalgsi läbitavuse hindamine aerolaserskaneerimise andmete alusel

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks on aerolaserskaneerimise andmete alusel hinnata jalgsi läbitavust Lõuna-Eestile iseloomulikus segametsas. Läbitavuse ja nähtavuse hindamiseks kasutati üle-eestilise aerolaserskaneerimise andmete alusel leitud alusmetsa tiheduse näitajat – alusmetsasust. Analüüsi tulemusena saadi tugev statistiline seos alusmetsasuse ning proovialadel hinnatud läbitavuse ($\rho=0,71-0,76$) ja nähtavuse ($\rho=0,63-0,66$) vahel. Töö tulemused näitavad, et kasutatud meetodika sobib läbitavuse ja nähtavuse suhteliseks hindamiseks.

Märksõnad: kaugseire, aerolaserskaneerimine, LiDAR, alusmets, läbitavus

CERCS: T181 Kaugseire

The assessment of foot mobility in Estonian temperate mixed forests using airborne laser scanning data

The aim of current research was to assess the foot mobility in mixed forests characteristic to South Estonia based on airborne laser scanning dataset. The index describing understory vegetation found on basis of airborne laser scanning to determine the forest foot mobility and visibility was used in the research. In order to estimate the statistical correlation between remotely sensed index and research characteristics the field sampling data was used. Strong statistical correlations were found between understory vegetation index and foot mobility ($\rho=0,71-0,76$) as well visibility ($\rho=0,63-0,66$). Therefore can be concluded from the results that selected methods can be qualified for relative assessment of foot mobility and visibility.

Keywords: remote sensing, airborne laser scanning, LiDAR, understory, mobility

CERCS: T181 Remote Sensing

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Teoreetiline alus	7
1.1. Maastike läbitavus	7
1.1.1. Läbitavuse informatsiooni kasutamine.....	9
1.2. Metsade läbitavuse kujutamine	9
1.3. Alusmetsa mõju jalgsi läbitavusele	11
1.4. Metsade kaugseire	12
1.4.1. Aerolaserskaneerimine	12
1.4.2. ALS-seadmete omadused ja mõõdistusparameetrid	13
1.5. ALSi kasutamine Eestis.....	16
1.6. Metsa hindamine ALSi alusel.....	16
1.6.1. Alusmetsa hindamise meetodid.....	17
1.7. ALSi metsa mõõdistusele mõju avaldavad tegurid	18
1.8. Joostavuse hindamine Karttapullautini tarkvaraga ALS-andmetest.....	19
2. Metoodika	20
2.1. Uurimis- ja proovialad.....	20
2.2. Näidiseraldised	21
2.3. Metsatakseerimise andmed.....	21
2.4. ALS-andmed.....	21
2.5. Andmetöötamise tarkvara.....	22
2.6. Näidiseraldiste punktipilvede vertikaalse jaotuse analüüs	22
2.7. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine ALSi alusmetsasuse järgi	23
2.7.1. Alusmetsasuse hindamise metoodika.....	23
2.7.2. Uuritava alusmetsa kõrgusvahemiku määramine.....	24
2.7.3. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine välitöödel.....	24
2.7.4. Alusmetsasuse kujutise lahutuse määramine	25
2.7.5. Alusmetsasuse leidmine	26
2.7.6. Alusmetsasuse ja proovialade hinnanguliste tunnuste vahelised seosed.....	26
2.7.7. Klassifitseeritud alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed	27
2.8. Läbitavuse hindamine Karttapullautini tarkvara kujutistel	28
3. Tulemused ja arutelu	29
3.1. Näidiseraldiste punktipilvede vertikaalse jaotuse analüüs	29
3.2. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine ALSi alusmetsasuse järgi	31
3.2.1. Uurimisala 464x	32
3.2.2. Uurimisala 465x	33

3.2.3.	Uurimisala 47x	34
3.2.4.	Uurimisala 49x	36
3.3.	Alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed.....	37
3.3.1.	Hinnangulise alusmetsa tiheduse ja alusmetsasuse vaheline seos.....	38
3.3.2.	Läbitavuse ja alusmetsasuse vaheline seos	38
3.3.3.	Nähtavuse ja alusmetsasuse vaheline seos	39
3.3.4.	Hinnanguliste tunnuste omavahelised seosed	39
3.4.	Klassifitseeritud alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed.....	39
3.5.	Karttapullautini orienteerumiskaartide läbitavuse analüüs.....	42
3.6.	Vigade analüüs	45
Kokkuvõte	.....	46
Summary	.....	47
Tänuavaldused	.....	49
Kasutatud kirjandus	.....	50
Lisad	.....	54

Sissejuhatus

Üle poole Eesti maismaa pindalast (51%) on kaetud metsaga. Kõrge metsasuse tõttu mõjutab mets elutegevust kõigil Eesti maastikel. Metsas liikumine ja viibimine on majanduslike, rekreatsiooni, spordi või sõjaliste eesmärkide puhul igapäevane. Metsade jalgsi läbitavuse uurimise ja kaardistamisega on tegeletud peamiselt orienteerumisspordis, kuid vajadus läbitavuse informatsiooni järele on ka relvajõududes. Asjakohane informatsioon metsade läbitavuse kohta võimaldaks kaitseväge üksustel liikuda metsasel maastikul efektiivsemalt ja kasutada enda heaks taimestikust tulenevaid eripärasid (HQDA 2005).

Eestile iseloomulik parasvöötme segamets on kompleksne kooslus, mille hindamisega on majanduslikel eesmärkidel tegeletud pikalt (Vaus 2004). Tavapärasele välitöödel põhinevale metsa hindamisele on pidevalt lisandunud täiendavaid meetodeid kaugseire valdkonnast. Aerolaserskaneerimisel põhinev metsa hindamine on näidanud positiivseid tulemusi, võimaldades metsa kohta käivat informatsiooni koguda kiirelt ja suurel hulgal (Leeuwen, Niuwenhuis 2010).

Läbitavusena käsitletakse antud töö kontekstis metsa madala elus taimestiku ehk alusmetsa mõju metsas jalgsi liikumisele. Eesmärgistatud liikumise ja orienteerumise eelduseks peetakse teatud nägemisulatus ja vaatevälja olemasolu, mistõttu uuritakse läbitavusega seoses ka alusmetsa taimestiku mõju nähtavusele. Läbitavuse ja nähtavuse hindamise aluseks võetakse aerolaserskaneerimise andmete põhjal leitud alusmetsa tiheduse näitaja – alusmetsasus.

Uurimistöö hõlmab läbitavuse ja nähtavuse hindamist neljal metsaga kaetud uurimisalal Tartumaal. Uurimistöös kasutatakse alusmetsasuse hindamiseks Maa-ameti poolt kogutud üle-eestilise aerolaserskaneerimise andmeid. Alusmetsa arvutuslikku näitajat kontrollitakse välitööde andmete põhjal. Täpsemalt kirjeldatakse läbitavuse, nähtavuse ja alusmetsasuse hindamise põhimõtteid töö metoodilises osas.

Uurimistöö eesmärk on aerolaserskaneerimise andmete põhjal hinnata metsade jalgsi läbitavust Lõuna-Eestile iseloomulikus segametsas. Töö uurimisküsimused on järgmised:

1. Missugune on metsade jalgsi läbitavus ja nähtavus Lõuna-Eestile iseloomulikus segametsas?
2. Missugune on statistiline seos arvutusliku alusmetsasuse ja metsa jalgsi läbitavuse ning nähtavuse vahel?

3. Kas aerolaserskaneerimise andmete põhjal leitud alusmetsa näitaja – alusmetsasus, on sobilik metsade jalgsi läbitavuse ja nähtavuse hindamiseks?

Töö teoreetilises osas käsitletakse maastike ja metsade läbitavust, läbitavuse informatsiooni kasutamise ja kujutamise praktikad, metsa taimestiku mõju läbitavusele ja nähtavusele ning aerolaserskaneerimise võimalusi ja probleeme.

1. Teoreetiline alus

1.1. Maastike läbitavus

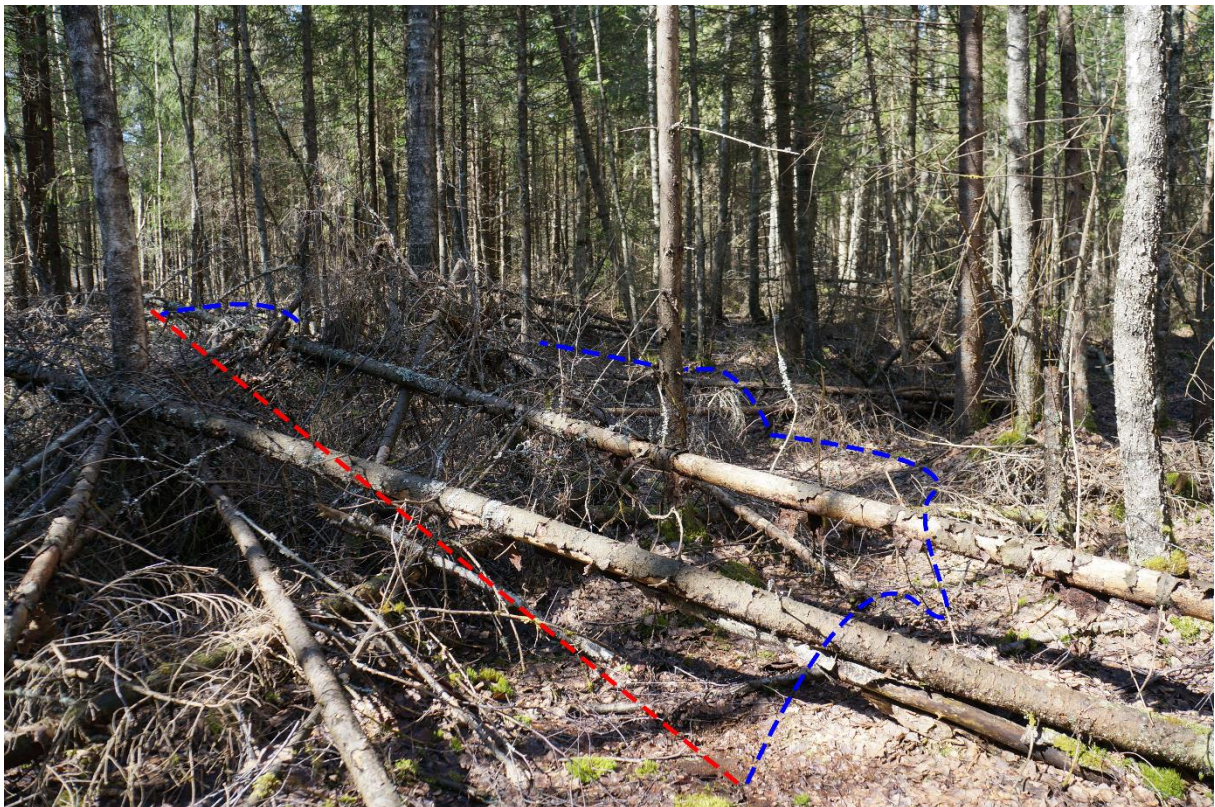
Läbitavuseks peetakse keskkonna omadust tagada objektide liikumisvõime antud keskkonnas. Peamiselt hinnatakse maastiku läbitavust masinaga või jalgsi liikumise järgi (HQDA 2005). Masinate maastiku läbitavuse puhul käsitletakse liigeldavust (inglise keeles *trafficability*). Liikuvuseks (inglise keeles *mobility*) peetakse masina võimet liikuda ühest kohast teise, säilitades mingi muu ülesande täitmiseks vajaliku võimekuse (Meyer *et al* 1977). Jalgsi läbitavusena käsitletakse orienteerumises joostavust (inglise keeles *runnability*), mis iseloomustab, kui kiiresti on maastikul võimalik liikuda (IOF 2000). Maastikuna käsitletakse läbitavuse kontekstis tavaliselt looduslikku keskkonda (inglise keeles *terrain*), kus ei ole liikumiseks ettenähtud trasse, vaid objektidel on võimalus piiranguteta liikuda (inglise keeles *cross country*) ühest punktist teise (Sivertun, Gumos 2006).

Maastike läbitavuse hindamine ja marsruutide koostamine on oluline geoinformaatika uurimisvaldkond (Birkel 2003; Sivertun, Gumos 2006; Shoop *et al.* 2006). Maastike läbitavuse hindamiseks arendatakse algoritme, mille abil analüüsitakse erinevaid geograafilisi aspekte, et leida eesmärgile sobiv marsruut määratud teekonnapunktide vahel. Mihkel Männa arendas oma 2016. aasta uurimuses Eesti tingimustesse kohandatud sõjaliste lähenemissuundade automaattuvastuse töövahendi. Reaalajas marsruutide koostamise meetodika olulisus on kasvav trend mehitamata sõidukite tehnoloogilise arendustöö tõttu (Park *et al.* 2013).

Looduslike maastike puhul peetakse maapinna konfiguratsiooni, taimestikku, mullastikku ja veestikku peamiseks teguriteks, mida maastiku analüüsi ja läbitavuse hindamisel arvestatakse (HQDA 1990). Läbitavust mõjutavad tegurid omavad erinevat mõju olenevalt sellest, millise objekti suhtes läbitavust hinnatakse (HQDA 2005). Näiteks üheks erinevuseks sõidukiga ja jalgsi metsas liikumise vahel on taimestiku mõju. Tihe madal taimestik või võsa, mis esineb tavaliselt metsanoorendikes, takistab oluliselt jalgsi liikumist, kuid ei pruugi mõjutada masinate läbimist, kuna rasked maastikusõidukid on võimelised noorest taimestikust üle sõitma (MOD 2001). Vastupidine on olukord küpses või vanas metsas, kus tugevad, kuid hõredalt kasvavad puud ei põhjusta erilist takistust jalgsi liikumisele, kuid on oluliseks takistuseks masinatele (Lisa 3). Taimestiku mõju masinate läbitavusele hinnatakse puude tiheduse, tugevuse, rinnasdiameetri ja vahekauguse järgi (Rybanský 2009).

Metsade jalgsi läbitavuse hindamine on vähe käsitletud teema, millega kõige enam on tegeletud orienteerumisspordis (Zentai 2009). Sageli peetakse orienteerumisvõistlusi metsasel maastikul, kus liikumine on taimestiku poolt piiratud olude tõttu keerulisem kui lagedal alal. Metsade jalgsi läbitavust mõjutavad mitmed tegurid, kuid metsale kõige iseloomulik on puitunud taimestiku esinemine ja selle takistav mõju liikumisele.

Taimestik võib metsas jalgsi liikumist takistada ning sundida liikujat ideaaltrajektoorilt kõrvale astuma. Tavaliselt on sellisteks takistusteks puude tüved, millest liikuja peab möödumiseks ümber põikama. Lisaks puudele mõjutab läbitavust ka noor tihe taimestik, millest mööda- või läbimine aeglustab ja takistab liikumist. Maapinnal lebavad surnud puud või taimestiku osad võivad marsruudil püsivust takistada (Joonis 1).



Joonis 1. Kasvava ja maapinnale langenud taimestiku põhjustatud takistused jalgsi liikumisele metsas – punasega lühim trajektoor, sinisega optimaalne trajektoor.

Metsade jalgsi läbitavuse ja jalgsi liikumise efektiivsuse mõõtmine on keeruline, sõltudes ka liikumise eesmärgist. Liikumist peetakse üldiselt efektiivseks, kui vahemaa läbimiseks kulutatakse kõige vähem energiat. Ideaaltingimustes oleks selline marsruut sirgjooneline ja takistusteta. Tiheda madala taimestiku või võsa tingimustes pole metsas jalgsi liikudes võimalik saavutada sama efektiivsust kui taimestikuta lagedal väljal või alusmetsata parkmetsas.

1.1.1. Läbitavuse informatsiooni kasutamine

Maastike ja eelkõige metsade läbitavuse kujutamine on oluline orienteerumiskaartidel, et tagada orienteerujatele vajalik informatsioon, mille alusel valida liikumiseks optimaalseim marsruut. Metsastel aladel liikumisega tegelevad igapäevalt ka Eesti kaitseväge jalaväeüksused, kes analüüsivad topograafiliste kaartide abil enda tegevuspiirkonna eripärasid ülesannete täitmiseks.

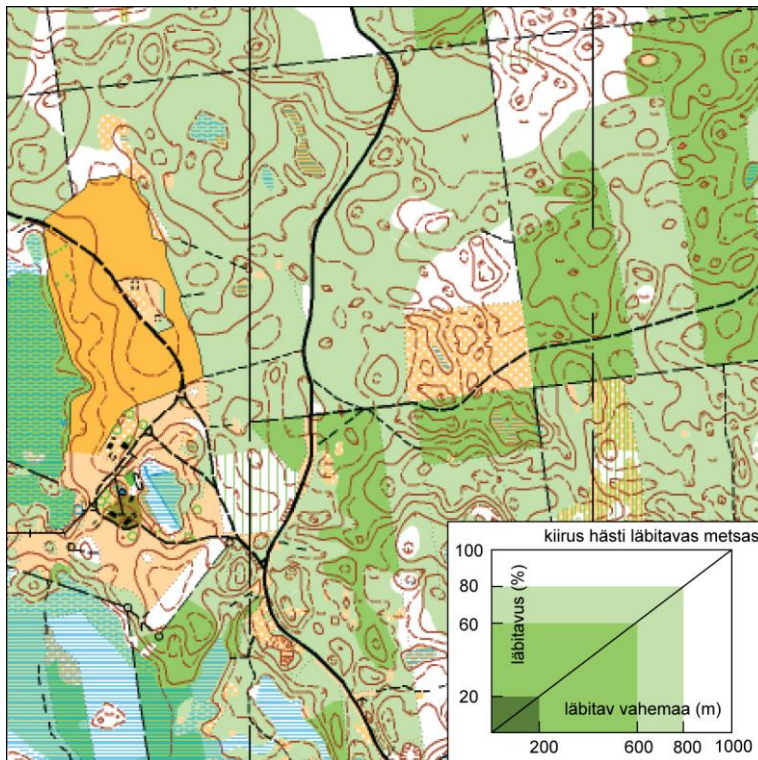
Läbitavuse hindamine on sõjalise maastikuanalüüsi osa. Maastikuanalüüsi alusel valitakse üksuse ülesandele sobiv tegevusala ja liikumiseks vastav marsruut. Maastikel liikumisel lähtutakse varje, varjatuse, vaatevälja ja läbitavuse tingimustest. Oluliseks peetakse üksuse võimekuse säilitamist, mistõttu võimalusel planeeritakse marsruudid hästi läbitavatest kohtadest (HQDA 2005).

Eesti kaitsevägele on metsade jalgsi läbitavuse informatsioon oluline, kuna relvajõud koosnevad peamiselt jalaväeüksustest, kes liiguvad metsasel maastikul jalgsi. Näiteks võib Lõuna-Eesti kõrge metsasus ja hõre asustus osutada jalaväe üksustele pigem eeliseks kui nõrkuseks (Rebo 2016).

1.2. Metsade läbitavuse kujutamine

Topograafilistel kaartidel on kujutatud metsas orienteerumiseks vajalikku informatsiooni, kuid läbitavust on joostavuse kontekstis kujutatud siiani ainult orienteerumiskaartidel. Metsade läbitavuse ja taimestiku tiheduse informatsiooni kasutamine koos topograafiliste andmetega võimaldaks optimeerida marsruute või tõsta tegevuste efektiivust metsasel maastikul.

Orienteerumiskaartidel tähistatakse metsa läbitavust joostavuse liikumiskiiruse klasside järgi: hästi joostav, aeglaselt joostav, raskesti joostav ja väga raskesti joostav ehk läbimatu (IOF 2000). Joostavust kujutatakse metsasel alal roheliste toonidega ning hinnatakse ideaaltingimuste ehk 100–80% võimaliku jooksukiiruse järgi. Lisaks märgitakse tiheda alusmetsa põhjustatud joostavuse takistust kriipsutusega. Aeglaselt joostavas metsas on näiteks võimalik saavutada 60-80% maksimaalsest jooksukiirusest (Joonis 2).



Joonis 2. Orienteerumiskaardi läbitavuse klassid (IOF 2000) – allikas täiendatud. Väljalõige Selgise orienteerumiskaardist (Kalm, Oras 2010).

Tavapärane orienteerumiskaartide koostamise meetodika näeb ette olemasolevate andmete kasutamist ja täpsustavate välitööde läbi viimist. Esmalt valmistatakse ette alusmaterjal, seejärel tehakse välitööd ja lõpuks viimistletakse kaart (EOL 2016). Antud meetodika puhul on joostavus määratud peamiselt kaardistaja kui eksperdi hinnanguna kaardi koostamisel ja välitööl. Joostavuse hinnang sõltub seega eelkõige kaardi koostaja kogemusest.

Alternatiivseks meetodiks on orienteerumiskaartide koostamine täisautomaatselt, kasutades selleks ainult digitaalseid andmeid. Antud meetodika näiteks on Jarkko Ryyppo (2013) loodud programm Karttapullautin, mis koostab orienteerumiskaardi digitaalse aerolaserskaneerimise või muude ruumiandmete põhjal. Marta Olvet (2014) näitas oma uurimistöös, et Karttapullautin tarkvara koostatud joostavuse hindamise meetodika oli võrreldud meetoditest kõige parem.

Lisaks orienteerumiskaartidele kasutatakse maastikul liikumiseks erinevas mõõtkavas topograafilisi kaarte. Maa-ameti tagab Eesti digitaalse ja trükitud põhikaardi uuendamise ning uue baaskaardi koostamise. Eesti kaitseväge üksused kasutavad maastikul liikumiseks topograafilist kaitseväge kaarti, mis on koostatud militaarstandardi järgi.

Antud topograafilistel kaartidel on metsa kujutatud peamiselt ühe rohelise tooniga. Kaitseväge kaardi puhul on eristatud metsade poollagedad alad, kuid puudub metsade struktuuri kirjeldav

info, mida kujutati Nõukogude Liidu topograafilistel kaartidel. Praegu kasutuses olevatel kaartidel puudub seega metsade läbitavust sisaldav informatsioon.

1.3. Alusmetsa mõju jalgsi läbitavusele

Taimestiku mõju metsa jalgsi läbitavusele pärineb tõenäoliselt maapinna lähedasest kihist. Inimese pikkusest lähtudes ulatub liikumist mõjutav taimestik umbes kahe meetrini. Sarnast lähenemist kasutatakse ka orienteerumiskaartide koostamise tarkvaras Karttapullautin (Ryypö 2013). Metsas võivad antud kõrgusvahemikus esineda alustaimestik, alusmets ja kõrgemate puude madalamad osad. Läbitavusele võib kõige rohkem mõju avaldada puitunud madala taimestikuga alusmets. Olenevalt metsa kasvukohatüübist, arenguklassist ja teistest keskkonnateguritest võib alusmets olla erineva struktuuriga.

Metsade takseerimisel ehk hindamisel eristatakse rindelisust, mis iseloomustab puistu vertikaalset koosseisu puuliigiti. Alusmetsaks peetakse puude ja põõsaste rinnet, mis kasvukoha, koosluse ja kasvukiiruse tõttu ei suuda moodustada esimest rinnet (Vaus 2004). Küpses metsas on tavaliselt esimese ehk kõrgeima rinde võrastikud liitunud ja takistavad päikesevalguse jõudmist maapinnani. Alusmetsa taimestik on seetõttu kohastunud kasvama varjulistes tingimustes, moodustades madala ja ebakorrapärase struktuuri. Alusmetsa iseloomustamiseks saab eristada vähemalt kahte peamist tegurit: metsa kasvukohatüüp ja arenguklass.

Metsade tüüpiliste omaduste väljakujunemise eelduseks on taimestiku kasvamine teatud eristatava tasemeni ehk arenguklassi saavutamine. Metsakorralduses eristatakse järgmiseid arenguklasse: lage ala, selguseta ala, noorendik, latimets, keskealine mets, valmiv mets ja küps mets (Vaus 2004). Metsakorralduslikud arenguklassid on määratud mõõdetavate parameetrite järgi: täius, puude hulk hektaril, kõrgus, rinnasdiameeter ja vanus. Küpses, valmivates või keskealistes metsades on välja kujunenud kasvukohatüübile omased rinded ning alusmets. Näiteks küpses metsas on tavaline, et maapinnal kasvab alustaimestik, millest kõrgemal on alusmets, mis omakorda jääb kõrgemate rinnete varju. Tiheda kõrgema võrastiku varjulistes tingimustes võib esineda aga hõre alusmetsa taimestik, mis ei takista läbitavust. Seevastu metsanoorendikes ja latimetsades kasvab noor taimestik, mis tiheda struktuuri tõttu võib takistada jalgsi läbitavust oluliselt.

Alusmetsa struktuur ja koosseis sõltub lisaks arenguklassile ka kasvukohatüübist. Kasvukohatüüp kirjeldab loodustingimustele iseloomulike taimede kooslust. Sama arenguklassi, kuid erineva kasvukohatüübi korral võib metsade läbitavus olla erinev. Eduard

Lõhmus (1984) on määratlenud alusmetsa tiheduse kasvukohatüübi järgi (Tabel 1). Alusmetsa iseloomustamine kasvukohatüübi järgi võimaldab hinnata, kas alusmetsa taimestik on võimeline antud tingimustes kasvama. Kasvukohatüübiti eristatud alusmetsa tiheduse klassid on määratletud suure sammuga, mistõttu klassid suuresti kattuvad ja ainult kasvukohatüübi põhjal ei ole võimalik alusmetsa tihedust hinnata.

Tabel 1. Alusmetsa tihedus kasvukohatüübi järgi.

alusmetsa tihedus	iseloomulikud kasvukohatüübid
hõre kuni tihe	lodu, naadi
hõre kuni keskmine	angervaksa, jänese kapsa, jänese kapsa-kõdusoo, madal soo, siirdesoo, tarna, tarna-angervaksa
hõre	jänese kapsa-mustika
puudub kuni keskmine	kõdusoo
puudub või hõre	jänese kapsa-pohla, karusambla, karusambla-mustika, mustika, mustika-kõdusoo, pohla
puudub	sinika, raba

1.4. Metsade kaugseire

Kaugseire andmete kasutamine on sobiv meetod metsade muutuste, struktuuri ja seisundi hindamiseks (Leeuwen, Nieuwenhuis 2010). Eesti metsade seisundi või struktuuri hindamiseks on kasutatud erinevaid kaugseire meetodeid, millest on enim tähelepanu pälvinud keskmise lahutusega satelliitfotode (Peterson *et al.* 2008) ja laserskaneerimise andmetel põhinevad meetodid (Anniste *et al.* 2011; Lang 2012; Arumäe *et al.* 2013). Satelliitfotod võimaldavad hinnata metsa seisundit väga suures ulatuses, kuid ei võimalda hinnata metsa struktuuri. Seevastu laserskaneerimine võimaldab hinnata metsa struktuuri, kuid on väiksema ulatusega. Järgnevalt käsitletakse metsade hindamist laserskaneerimise abil.

1.4.1. Aerolaserskaneerimine

Aerolaserskaneerimine (inglise keeles *Airborne Laser Scanning – ALS*) on tänapäeval laialdaselt kasutatav kaugseire tehnoloogia objektide mõõdistamiseks õhusõidukilt. ALS põhineb LiDARi meetodil (inglise keeles *Light Detection And Ranging*), mis kasutab valguskiirgust objektide kauguse mõõdistamiseks kiirgavast allikast. Valguskiirguse ühtsuse ja koherentsuse tagamiseks kasutatakse kiirgusallikana tavaliselt laserit (Heritage, Large 2009).

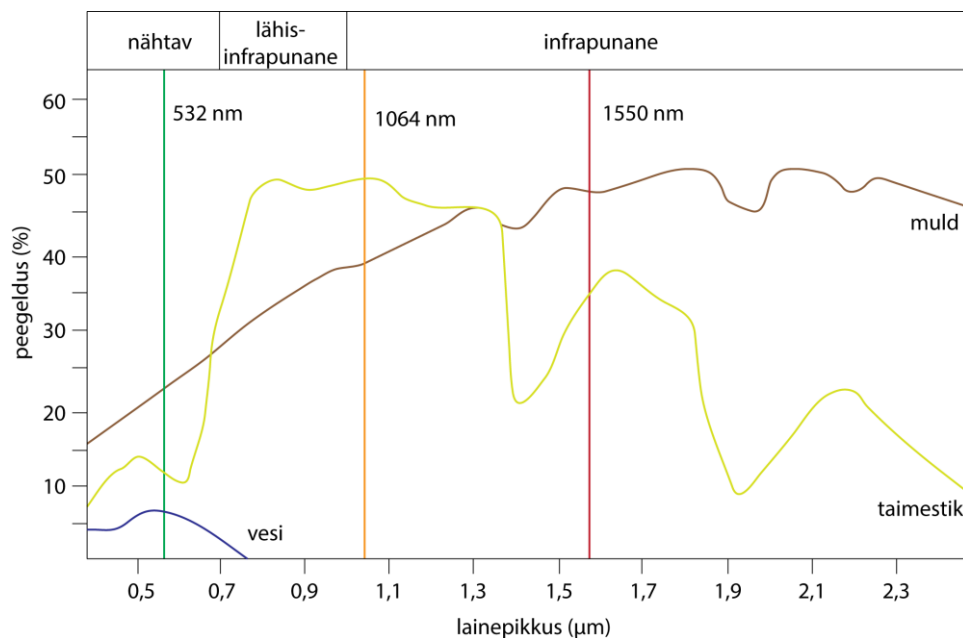
Lidar on aktiivne mõõdistustehnoloogia, mis kiirgab valguskiirgust ehk saadab impulsi ning registreerib objektilt peegeldunud kiirgust. Valguskiirguse levimisele ja tagasipeegeldusele kulunud aja ja valguse kiiruse abil leitakse objekti kaugus lidar-seadmest. Seejärel arvutatakse

mõõdistatud objektile x, y ja z koordinaadid kolmemõõtmelises ruumis. Mõõdistuse tulemuseks saadakse impulsiga tabatud objekti asukoht kolmemõõtmelises ruumis ehk punkt. Andmete kogumise tulemusena luuakse punktide kogumid ehk punktipilved (inglise keeles *pointcloud*), mis võimaldavad mõõdistatud objekte või pindu hiljem rekonstrueerida ja analüüsida.

Lidar-tehnoloogia laia leviku tõttu on kasutuses palju seadmeid, mis erinevad nii tüübi kui ka omaduste poolest. Lidar-andmete kogumine on kompleksne protsess, koosnedes paljudest etappidest ja parameetritest, mis mõjutavad mõõtmise tulemuseks saadava punktipilve omadusi. Järgnevas peatükis on välja toodud peamised ALS-seadmete omadused.

1.4.2. ALS-seadmete omadused ja mõõdistusparameetrid

Kasutatava lainepikkuse valikust sõltub, millistelt pindadelt peegeldused registreeritakse ehk milliseid objekte punktipilv esindab. Lainepikkusest sõltub lidar-impulsi peegeldumine, hajumine või neeldumine objekti pinnalt (Joonis 3). ALS-seade võib mõõdistamiseks kasutada ühte või mitut erineva lainepikkusega valguskiirgust. Enim on levinud 1064 nm lainepikkusega ehk lähisinfra punase valguskiirgusega seadmed, mida peetakse sobilikuks erinevate objektide mõõtmiseks. Kasutuses on veel 532 nm lühema lainepikkusega ja 1550 nm topograafilisteks mõõdistustöödeks loodud seadmed (Optech 2017).

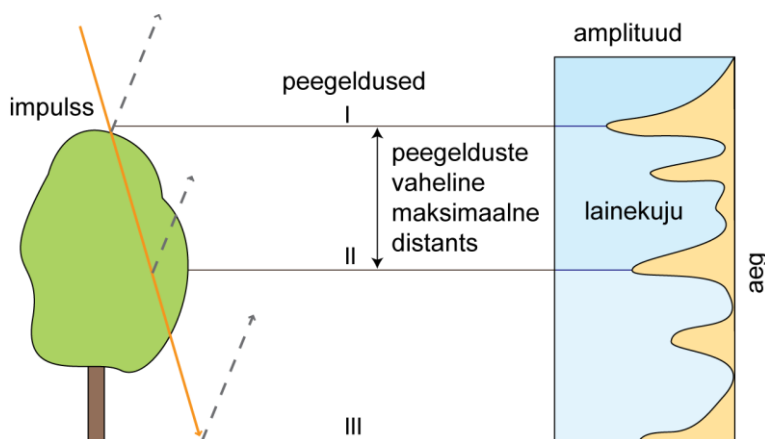


Joonis 3. Lidar-seadmete kiirguse peegeldumine erinevatelt pindadelt (Optech 2017) – allikas täiendatud.

Jooniselt on näha, et 1064 nm kiirgus peegeldub sarnaselt taimestikult ja mullalt, 532 nm kiirgus peegeldub ainukesena veepinnalt ning 1550 nm peegeldub kõige paremini mullalt ja vähem

taimestikult. Lidar-mõõdistuse käigus esineb alati punktide väljalangevust (inglise keeles *dropout*), mis tähendab, et saadetud impulsile ei registreerita peegeldust. Seetõttu ei ole võimalik kasutada ühte lainepikkust võrdväärselt batümeetriliseks, taimestiku ja maapinna mõõtmiseks.

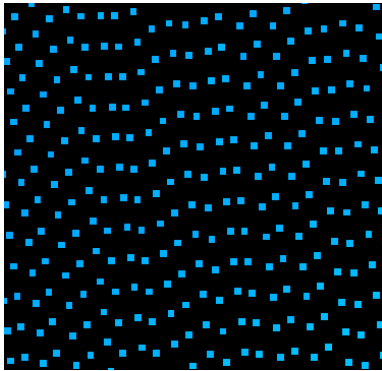
Kaasaegsed lidar-seadmed on võimelised registreerima ühelt saadetud impulsilt mitu erineva taseme peegeldust või salvestama peegeldunud kiirguse amplituudi lainekuju. Peegelduste registreerimise meetod määrab andmete kuju ja struktuuri. Esimesel juhul salvestatakse unikaalsed peegeldused, mis ületavad lidar-seadme peegelduse parameetri piirväärtusi (Joonis 4). Olenevalt lidar-süsteemist salvestatakse teatud maksimaalne või lõpmata hulk peegeldusi. Unikaalsete peegelduste salvestamiseks rakendatakse sensorile ajalast viivitust, mis tagab punktide registreerimise teatud maksimaalse distantsi järgi. Teisel juhul salvestatakse peegeldunud impulsi amplituudi laine kuju (inglise keeles *full-waveform*). Salvestatud laine kuju võimaldab hiljem fikseerida peegelduse amplituudi kõikumisi, mis iseloomustab mõõdistatud objektide peegeldusvõimet (Joonis 4).



Joonis 4. Tüüpilise ALS-seadme peegelduste registreerimine (ESRI 2017) – allikas täiendatud.

Skaneerimise mehhanismi tüübist sõltub punktide muster ja jaotus mõõdistataval pinnal. Impulsi kiirgamine ja peegelduse registreerimine ehk skaneerimine on läbi viidud tavaliselt mehhaaniliselt liikuva peegli abil. Lidar-seadme peegel ja seda liigutav mehhanism määrab impulsside kiirgamise ja peegelduste registreerimise korra. Kasutusel on võnkuv, pöörlev ja võnkuv Palmer-tüüpi peeglit kasutavad seadmed. Lisaks kasutatakse ka fiibertüüpi seadmeid, mis ei kasuta liikuva peegli mehhanismi. ALS-seadmete hulgas on enim levinud võnkuva peegli tüüpi seadmed, mille skaneerimismuster on sinusoidaalne ehk lihtsustatult Z-tähe kujuline. Võnkuva peegli korral on peegli liikumise kiirus ühe võnke ulatuses erinev, mis põhjustab

erinevat punktide tihedust mõõdistuskoridoris. Tulemuseks on punktide suurem tihedus koridori äärtes, kuna peegel aeglustab ja peatub ning madalam punktide tihedus on nadiiris, kus peegel liigub kõige kiiremini. Näiteks üle-eestilise ALS-mõõdistuse andmetest on leitav lainetav punktide muster (Joonis 5).



Joonis 5. Fragment üle-eestilise mõõdistuse punktipilvest. Maapinna punktide asetus 464655 lehel.

Mõõdistussagedus ja lennukõrgus on peamised tegurid, mis määravad punktipilve tiheduse. Seadme mõõdistussagedus näitab, mitu mõõdistust suudab lidar-seade ühe ajaühiku jooksul teha. Mõõdistussagedus sõltub süsteemi impulsi kiirgamise ja peegelduste registreerimise sagedustest. Kaasaegsete lidar-seadmete impulsi kiirgamise sagedus (inglise keeles *pulse repetition frequency* – PRF) võib olla mitu miljonit korda sekundis.

Vaateväli (inglise keeles *field of view* – FOV) on nurga väärtus, mis määrab skaneerimise ulatuse ja seega ka mõõdistuskoridori laiuse. Kõrgema FOV-väärtuse ehk laiema nurga korral on peegel suunatud suurema nurgani nadiirist, mis võimaldab mõõdistada laiema mõõdistuskoridorina. Laia FOV-nurgaga skaneerimine tähendab impulsside levimist nadiirist suure nurga all ja objektide tabamist enam külgedel kui peal. Vertikaalsete struktuuride mõõtmisel eelistatakse kasutada madalaid FOV-väärtusi, et impulsid tabaksid objekte vertikaalse sihi lähedalt. Metsanduslike rakenduste jaoks toodetud andmed on tavaliselt kogutud kuni 40° FOV ulatuses (Goodwin *et al.* 2007; Hill, Broughton 2009; Wing *et al.* 2012).

Lidar-seadmest kiirgatud impulsi peegelduse suurust pinnal nimetatakse jäljeks (inglise keeles *footprint*). Tavaline on ellipsikujuline jälg, mille suurust hinnatakse diameetri järgi. Impulsi jälje suurus sõltub seadmest ja lennukõrgusest. Kõrgemalt tehtud mõõdistused on suurema jäljega. Väiksema jäljega ehk madalamalt läbi viidud mõõdistused võimaldavad punktipilves kajastada väiksemaid objekte, mistõttu on punktipilv detailsem.

Punktide tihedus (inglise keeles *point density*) ja punktide vaheline kaugus (inglise keeles *point spacing*) on kõige enam kasutatud näitajad, mis iseloomustavad punktipilve horisontaalset struktuuri. Tavaliselt käsitletakse punktipilve tihedusena esimest või viimast järku peegelduste arvu pinnaiühikule (Isenburg 2014). Madala tihedusega punktipilved ehk alla 1 p/m² sobivad üldiste mudelite ja analüüside tegemiseks (Jakubowski *et al.* 2013). Suure tihedusega andmetest on võimalik rekonstrueerida detailseid mudeleid ja analüüse (Wallace *et al.* 2012).

1.5. ALSi kasutamine Eestis

ALS-andmete kasutamine Eestis on olnud aktuaalne teema erinevate uurimis- või diplomitööde puhul. Näiteks on Silver Solnask 2009. aastal kasutanud lidar-andmeid metsaaluse maapinna kirjeldamiseks või Erko Grünthal 2013. aastal rannaprotsesside uurimiseks. Eleri Hirv on 2013. aastal kasutanud lidari andmeid topograafilistel kaartidel kujutatud reljeefi hindamiseks ning Marek Karm on 2015. aastal uurinud orienteerumiskaartide tootmise optimeerimist lidar-andmete põhjal. M. Olvet on 2014. aastal kasutanud lidari andmeid joostavuse hindamise meetodikate võrdluses orienteerumiskaartidel. Antud tööde näitel on lidar-andmete kasutamine võimaldanud iseloomustada uuritavat nähtust.

Metsade uurimisel Eestis on ALS-andmeid kasutanud peamiselt Eesti Maaülikooli või Tartu observatooriumi teadurid ja tudengid. Näiteks on Mait Lang 2010. ja 2013. aastal uurinud metsade katvuse ja liituse hindamist, võsastuvate põllumaade kaardistamist ning metsade inventeerimist lidar-andmete alusel (Lang *et al.* 2012; Arumäe *et al.* 2013). Antud metsanduslikes uurimustes on tõestatud ALS-andmete sobivust metsanduslikeks rakendusteks Eestis.

1.6. Metsa hindamine ALSi alusel

Metsade iseloomustamisel ALSi andmete põhjal saab akadeemilises kirjanduses eristada kaht peamist lähenemist: metsa üldiste struktuuriparameetrite (Leeuwen, Niuwenhuis 2010) ning alusmetsa või -taimestiku määramine (Goodwin *et al.* 2007). Struktuuriparameetrite hindamine on rohkem levinud, kuna selle vajadus ja olulisus tuleneb metsa majandamise eesmärgist. Alusmetsa taimestiku hindamine on vähem levinud, kuna see on meetodiliselt keerulisem kõrgema rinde võrastiku mõju tõttu madalamate objektide mõõdistustele. Läbitavuse seisukohalt on oluline aga uurida alusmetsa taimestiku ALS-mõõdistust.

Metsade alusmetsa ja -taimestiku struktuuri informatsiooni peetakse oluliseks sisendiks eelkõige ökoloogilistes uuringutes (Zellweger *et al.* 2013). Martinuzzi *et al.* on 2009. aasta

uuringus suutnud elupaikade uurimus ALSiga iseloomustada alusmetsa põõsastikke kuni 83% tõenäosusega. Alusmetsa taimestiku katvusega tegelenud Wing *et al.* on 2012. aasta uurimuses leidnud välitööde ja ALSiga määratud taimestiku vahel tugeva korrelatsiooni ($R^2 = 0,7-0,8$). Sarnase tulemuseni jõudsid ka Goodwin *et al.* 2007. aasta uurimuses, leides välitööde ja ALSi andmete põhjal määratud alusmetsa vahel korrelatsiooni ($R^2=0,87$). Lehtedeta ja lehtedega taimestiku mõõdistustingimusi uurinud Hill ja Broughton leidsid oma 2009. aasta uurimuses, et lehtedeta tingimused sobivad paremini alusmetsa määramiseks 77% tõenäosusega. Lehtedega tingimused olid paremad kõrgema võrastiku hindamiseks.

1.6.1. Alusmetsa hindamise meetodid

Sagedasti kasutatud meetod metsa struktuuri hindamiseks on lidari punktipilve vertikaalse jaotuse uurimine (Morsdorf *et al.* 2010). Näiteks jaotatakse punktipilv määratud sammuga protsentiilide järgi ning uuritakse, millisel kõrgusel esineb uuritavat nähtust iseloomustav protsent tagasipeegeldusi (Martinuzzi *et al.* 2009). Antud meetoodika järgi on Lang ja Arumäe 2013. aasta uurimuses leidnud, et Eesti metsade esimese rinde võrastiku kõrguse määramiseks sobib 80. protsentiil. Punktipilve protsentiilide uurimine võimaldab määrata ka, kas madalal kõrgusel esineb alusmetsa taimestiku põhjustatud peegeldusi. Meetoodika aluseks on objektiivne punktipilve vertikaalne jaotus. Seega on meetod seda objektiivsem, mida nadiirile lähemalt on andmed kogutud.

Metsa põõsastike määramiseks on uuritud erinevad meetodeid. Esiteks on kasutatud metsaaluse maapinna peegelduste protsenti kõigist punktidest (Martinuzzi *et al.* 2009). Antud meetod iseloomustab maapinda katva metsa taimestiku mõju lidar-impulsi läbitungimisele. Tiheda metsa ja alusmetsa korral on maapinna punktide osakaal väiksem, kuna lidar-impulsi viimane peegeldus saadakse kõrgemalt taimestikult. Teiseks on kasutatud valitud kõrgusvahemikku kuuluvate punktide protsenti kõigist punktidest. Martinuzzi *et al.* kasutasid 2009. aasta uurimuses kõrgusvahemikku 1–2,5 m. Määratud kõrgusvahemiku või nivookõrguse järgi punktipilve kihi osakaalu või protsendi leidmine kõigist punktidest on sarnane katvuse näitajatega (Lang 2010).

Wing *et al.* on 2012. aasta uurimuses leidnud, et ALSi andmete järgi on võimalik kirjeldada alusmetsa madalalt kõrgusvahemikult ja maapinnalt pärinevate punktide kaudu. Antud näitajat nimetati alusmetsa lidar-katvuse tiheduseks (ULCD – inglise keeles *Understory Lidar Coverage Density*). Näitaja leidmise esimeses etapis filtreeritakse punktid intensiivsuse näitaja alusel (Pveg), et kõrvaldada peegeldused, mis ei pärine taimestikult. Filtreerimiseks ja näitaja arvutamiseks kasutatakse esimesi peegeldusi (P1). ULCDi leidmiseks eristatakse konkreetne

alusmetsa kõrgusvahemik (alus) ning sama kõrgusvahemik koos maapinna punktidega (alus+maapind).

Näitaja leitakse järgmise valemiga:

$$ULCD = Pveg \frac{P1_{alus}}{P1_{alus+maapind}}$$

1.7. ALSi metsa mõõdistusele mõju avaldavad tegurid

ALS on kaugseireline meetod andmete kogumiseks, mis tähendab, et andmete õigsust ei ole reeglina kohapeal kontrollitud. Seega on lidar-andmete kasutamisel oluline arvestada, et andmestik võib sisaldada määramatust, mis võib põhjustada vääraid tõlgendusi tegelikkusest. Järgnevalt käsitletakse tegureid, mis mõjutavad ALSi andmeid metsa mõõdistamisel.

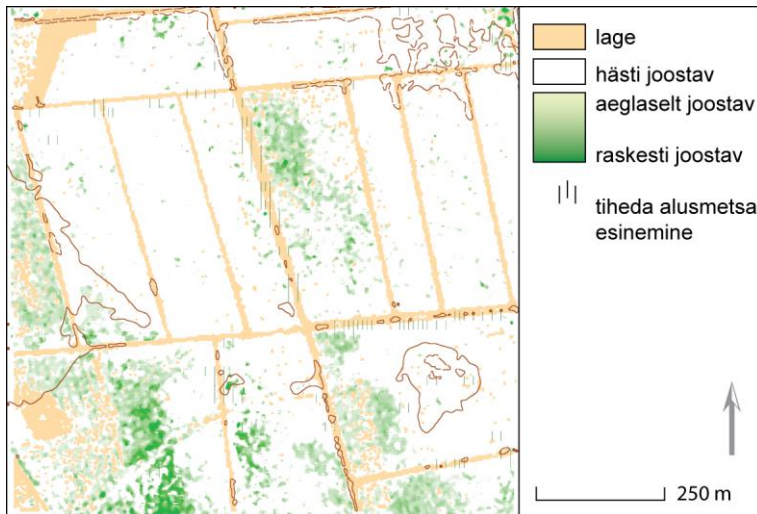
Tavapärane ALS-mõõdistuse probleem on taimestiku takistav mõju impulsi läbivusele. Lidar-impulsile lainepikkusega 1064 nm annab taimestik umbes 50% juhtudel peegelduse (Joonis 5). Ülejäänud juhtudel impulss hajub, neeldub või läbib taimestiku. Seetõttu eristatakse lehtedes (inglise keeles *leaf-on*) ja lehtedeta (inglise keeles *leaf-off*) mõõdistustingimusi (Hodgson *et al.* 2003; Hill, Broughton 2009). Esimesel juhul on andmed kogutud ajal, kui puud on lehtedes ja andmestik on seetõttu mõjutatud kõrgemate rinnete taimestikust. Lehtedeta ehk varasemal ajal kogutud andmed sisaldavad suurema tõenäosusega peegeldusi ka madalamatelt taimedelt ja maapinnalt. Alusmetsa hindamiseks sobivad paremini lehtedeta mõõdistustingimused, kuna kõrgem rinne ei põhjusta lidar-impulsile takistust (Hodgson *et al.* 2003).

Eelnevaga seotud nähtuseks, mis mõjutab metsade ALS-mõõdistamist, peetakse kõrgemate rinnete võrastiku varjutavat efekti (inglise keeles *shading, occlusion*). Tiheda struktuuriga esimese rinde võrastik võib põhjustada lidar-impulsi esimeste peegelduste tekkimist puude latvadest ja takistab impulsi levimist madalamate kõrguste ja maapinnani (Goodwin *et al.* 2007; Hill, Broughton 2009). Seega võib jääda esimese rinde alune pind mõõdistamata. Wing *et al.* on oma 2012. aasta uurimuses leidnud aga, et varjutav efekt ei ole alusmetsa hindamisel oluline, kui

- varjutava kõrgema võrastiku all kasvab hõredam alusmetsa taimestik;
- näitaja arvutamiseks kasutatakse punkte, mis pärinevad juba kõrgema rinde läbinud impulssidelt.

1.8. Joostavuse hindamine Karttapullautini tarkvaraga ALS-andmetest

Karttapullautin võimaldab koostada ALS-andmetest esialgse orienteerumiskaardi kujutise (Joonis 6). Tarkvara autor peab meetodit katseliseks vahendiks orienteerumiskaartide koostamisel, kuid mitte sobivaks ametlike võistluskaartide tootmisel. Karttapullautin-programm kasutab sisendina digitaalseid maapinna ja taimestiku kõrgusandmeid.



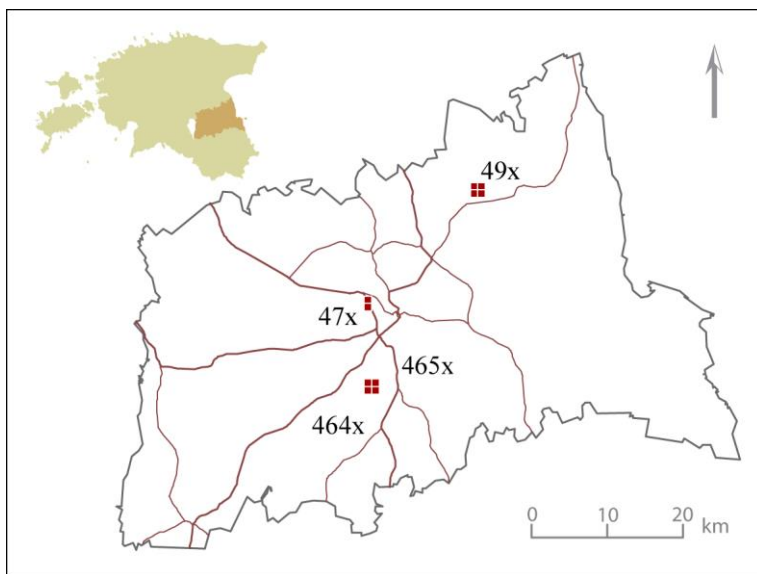
Joonis 6. Karttapullautini koostatud orienteerumiskaart kaardilehest 490669.

Tarkvara hindab joostavust taimestiku kõrguspunktide esinemise kaudu erinevates kõrgusvahemikes. Vaikimisi on määratud joostavust mõjutavaks kõrgusvahemikuks 1,2–2,95 m, mida nimetatakse tinglikult rohelseks tsooniks. Eristatakse madalamale ja kõrgemale jäävaid kõrgusvahemikke. Algoritm loeb kokku määratud kõrgusvahemikesse sattunud punktid ja annab vastavalt eeskirjale igale punktile väärtuse. Rohelise tsooni punktid saavad 1,0 ning teiste kõrgusvahemike punktid väiksema väärtuse. Joostavust kujutatakse läbi rohelse värvi tonaalsuste. Summeritud väärtuste järgi määratakse joostavuse leppemärgi tonaalsus. Kõrgema väärtusega alad saavad tumedama tooni ja madalama väärtusega heledama. Kui kaardi ühikus esines ainult rohelse tsooni punkte, märgitakse joostavus kriipsutusega, mida peetakse raskesti läbitavaks tiheda alusmetsaga kohaks. Karttapullautini kasutajalt eeldatakse optimaalsete seadete määramist olenevalt metsa struktuurist, mille kohta kaarti koostatakse (Ryypö 2013).

2. Metoodika

2.1. Uurimis- ja proovialad

Uurimisalad moodustasid kokku 10 km² suuruse ala, mille valikul lähtuti võimalikult kõrgeast metsasusest. Uurimisalad asusid Tartust kirdes (49x), edelas (464x ja 465x) ja loodes (47x) (Joonis 7). Uurimisalad koosnesid kahest või neljast 1 km² suurusest ruudust. Alad tähistati 1:2000 plaanide nomenklatuuri eeskujuga järgi, võttes aluseks kõrvuti asetsevate ruutude ühise tähistuse osa. Edelas asuv uurimisala jaotati kaheks (464x ja 465x), kuna põhja-lõuna keskjoonelt erines andmete tootmisaasta.



Joonis 7. Uurimisalade paiknemine Tartu maakonnas.

Metsaregistri väljavõtte järgi oli uurimisaladel 735 ha metsamaad kokku 514 eraldisel, millest 73,5% on kaetud metsaga. Üle poole uurimisaladest (51,3%) on kaetud kolme peamise kasvukohatüübiga: jänesekapsa (21,9%) jänesekapsa-kõdusoo (15,5%) ja mustika-kõdusoo (13,9%). Metsaeraldiste seas esines arenguklassi järgi keskealisi 26,8 % (197,4 ha), küpseid (187,7 ha) 25,5 % ja latimetsasid 16,4 % (120,7 ha). Kõpsed, valmivad ja keskealised metsad moodustasid kokku 60,5% kõigist eraldistest. Lagedad, selgusetad, latimetsad ja noorendikud moodustasid 35% ning ülejäänud 4,5% kuuluvad täpsustamata arenguklassi.

Uurimisaladel valiti juhuslikult välja 69 prooviala asukohad. Proovialade sattumist lagedatele, kus puudus analüüsiv objekt, välditi metsamaski kasutamisega. Prooviala esindab 7 m raadiusega ringikujulist ala, kus hinnati taimestiku struktuuri, läbitavust ja nähtavust eksperthinnanguna.

2.2. Nädiseraldised

Uurimisalade ulatuses valiti välja kümme metsaeraldist ehk nädiseraldist, mida kasutati ALS-punktipilve vertikaalse jaotuse uurimiseks. Nädiseraldised erinesid kasvukohatüübilt ja arenguklassilt (Tabel 2).

Tabel 2. Nädiseraldised.

jk nr	eraldise nr	arenguklass ja kasvukohatüüp
1	758740448111	küps lodu
2	465994948111	valmiv jänesekapsa
3	990588848111	keskealine karusambla
4	296398848311	valmiv naadi
5	1047069548111	küps jänesekapsa
6	912293648111	lage lodu
7	365300148111	lage siirdesoo
8	235188448311	latimets siirdesoo
9	714018148111	noorendik jänesekapsa
10	1047134348111	selgusetu jänesekapsa

Kümnest valitud nädiseraldisest viis esindas kõrges vanuses metsasid: küps (2), keskealine (1) või valmiv (2) arenguklass. Ülejäänud viis olid lagedad või noored metsad: lage ala (2), latimets (1), noorendik (1) või selgusetu ala (1) arenguklass.

2.3. Metsatakseerimise andmed

Proovi- ja uurimisalade iseloomustamiseks kasutati töös Eesti metsaregistri andmeid. Uurimisalade ulatuse järgi tehti 10.12.15 väljavõtte eraldise ja elemendi tabelite järgi. Nimetatud tabelites hoitakse metsaeraldiste struktuuri ja koosseisu iseloomustavat informatsiooni. Analüüsis kasutati andmevälju: eraldise nr, eraldise arenguklass, takseerimise kuupäev ja kasvukohatüüp.

2.4. ALS-andmed

Töös kasutatud ALS-andmed pärinevad Maa-ameti üle-eestilisest mõõdistusest. Andmed on kogutud 465x, 47x ja 49x uurimisaladel ajavahemikus 05.04.2014–26.05.2014. Uurimisala 464x lidar-andmed on kogutud ajavahemikus 11.04.2015–17.06.2015. Mõõdistatud on 2400 m kõrguselt keskmise punktihedusega 0,46 p/m² ja peegelduse jälje suurusega 54 cm. Kasutatud on 55° FOVi ehk mõõdistusnurka kuni 27,5° nadiirist. Mõõdistuseks kasutatud ALS-seade Leica ALS-50II salvestab kuni neli tagasipeegeldust, mille maksimaalseks punktide vaheks on 2,6 m (Maa-amet 2016). Andmed on esmase töötluse käigus jaotatud ruutudeks ning klassifitseeritud alates 2012. aastast määratud klasside järgi (Tabel 3).

Tabel 3. Maa-ameti üle-eestilise ALS-mõõdistuse punktide klassifitseerimine (Maa-amet 2016).

klassi nr	tähendus
1	klassifitseerimata
2	maapind
5	taimestik
6	hooned
7	müra
8	hõrendatud maapind
14	veekogude punktid

2.5. Andmetöötluse tarkvara

Punktipilve töötlemiseks ja analüüsiks kasutati peamiselt Lastoolsi vabavara programme pakktöötluse režiimis. Antud tarkvara võimaldab töödelda .las, .laz ja xyz teksti formaadis salvestatud punktipilvesid (Lastools 2016).

Punktipilvede töötlemiseks ja tuletiste leidmiseks kasutati järgnevat alaprogramme:

- Las2las – punktipilvede filtreerimine, ebavajalike punktiklasside eemaldamine (*drop_class*);
- Lasheight – punktipilve teisendamine suhtelisele kõrgusele (*replace_z*);
- Lasgrid – punktipilve teisendamine rastroks, kasutades huvipakkuvas kõrgusvahemikus (*keep_z min max*) asuvate punktide loendamist (*counter*).

Punktipilvede vertikaalse struktuuri uurimiseks kasutati FUSIONi tarkvara programmi Cloudmetrics. Rastrite töötlemiseks, tulemuste visualiseerimiseks ja ruumiliseks analüüsiks kasutati tarkvara ArcMap 10.2, andmete tabelitöötluseks Excelit ja statistiliseks analüüsiks Statistica 10.

2.6. Nädiseraldiste punktipilvede vertikaalse jaotuse analüüs

Nädiseraldiste analüüsi eesmärgiks oli punktipilvede vertikaalse struktuuri uurimine, et määrata läbitavust ja nähtavust mõjutava alusmetsa tõenäoline kõrgusvahemik. Leiti vastavate eraldiste punktipilvede vertikaalse jaotuse protsentiilid ja punktide esinemistõenäosused kõrguse järgi. Nädiseraldise punktipilvede analüüsi käigus otsiti vastused järgnevatele küsimustele:

- Milline on punktipilvede vertikaalne struktuur?
- Kas tagasipeegelduste kõrgusjaotustes eristub alusmetsa esindav kõrgusvahemik?

- Kas alusmetsa kõrgusel esineb rohkem punkte, mis võib olla põhjustatud tihedamast taimestikust?

2.7. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine ALSi alusmetsasuse järgi

2.7.1. Alusmetsasuse hindamise metoodika

Näitaja valimisel arvestati asjaolu, et kõrgemate rinnete võrastikud omavad varjutavat efekti alusmetsa lidar-möödistusele. Seetõttu lähtuti Wing *et al.* 2012. aasta uurimuses tehtud järeldusest, et varjutav efekt omab mõju kõigile võrastiku all olevate objektide peegeldustele ja seega esineb vähem ka maapinna peegeldusi. Varjutava efekti mõju on võimalik vältida, kui valida näitaja, mis ei arvesta sihtkõrgusest kõrgemaid punkte, vaid võrdleb sihtkõrguse punkte madalamatega.

Teiseks peeti oluliseks, et näitaja sõltuks võimalikult vähe punktiple vertikaalsest struktuurist. Metsanduslike uurimistööde puhul, mis põhinevad ALSi andmetel, on tavapärane praktika kasutada andmeid skaneerimisnurgaga 14–20° nadiirist, et tagada peegelduste registreerimine nadiiri lähedalt ehk võimalikult vertikaalselt sihilt. Antud tööks kasutatud üle-eestilised ALSi andmed on kogutud skaneerimisnurgaga 27,5° nadiirist, mistõttu võivad peegeldused möödistuskoridoride äärtes pärineda objektide külgedelt ja seega ei kujuta objektiivselt vertikaalset struktuuri. Eelnevalt käsitletu alusel sõnastati kaks valikukriteeriumit:

1. Näitaja vähene sõltuvus esimese rinde varjutava efekti mõjust;
2. Näitaja vähene sõltuvus punktiple vertikaalsest struktuurist.

Neile nõutele vastab alusmetsa struktuuri hindamiseks ULCD-metoodika. Antud näitajat rakendati algselt antud tööst erinevates tingimustes (Tabel 4). Seega näitaja tegelik sobivus uurimistöö eesmärkidega selgitati välja analüüsi käigus.

Tabel 4. ULCD-näitaja tingimuste võrdlus.

	Wing <i>et al.</i> 2012	antud uurimistöö	erinevus
ALS seade	Leica ALS-50II		
lennukõrgus	900 m	2400 m	+ 1500 m
möödistusnurk nadiirist	14°	27,5°	+ 13,5°
laseri jälg (<i>footprint</i>)	0,25 m	0,54 m	+ 0,29 m
lennuribade külgsuunaline ülekate	50%	15%	-35%
punktihedus	6,9 p/m ²	0,46 p/m ²	- 6,44 p/m ²

Erinevalt algsest ULCD-metoodikast jäeti välja taimestiku punktide filtreerimine intensiivsuse alusel ning näitaja arvutamiseks kasutati kõigi taseme peegeldusi. Taimestiku peegelduste filtreerimine ei olnud antud töös vajalik, kuna uurimisalad olid tasase reljeefiga ning metsades ei esinenud muid objekte, mis oleksid võinud taimestikuna näida. Samuti ei ole intensiivsuseväärtuste kasutamine kõrgema taseme peegelduste puhul kontrollitav. Kõigi taseme peegeldusi kasutati põhjusel, et oleks võimalik kaasata võimalikult palju punkte alusmetsast. Kõrgema rinde võrastiku all asudes oleks alusmets jäänud esimeste peegeldustele puhul märkamata.

2.7.2. Uuritava alusmetsa kõrgusvahemiku määramine

Läbitavust analüüsiti alusmetsa kõrgusvahemikus 0,5–5 m. Kõrgusvahemiku valik tulenes näidiseraldiste analüüsist, mis näitas, et alusmetsa punktid esinevad kõige tõenäolisemalt antud vahemikus. Valitud alusmetsa kõrgusvahemik on eelnevates uurimistöodes väljatoodule sarnase ulatusega (Goodwin *et al.* 2007; Vehmas *et al.* 2011; Zellweger *et al.* 2013).

Kõrgusvahemiku alguspunktiks (h_1) valiti 0,5 m, et kaasata alusmetsa kihti punkte, mis esindavad läbitavust mõjutavat madalat taimestikku. Madalamal kui h_1 esinevad maapinna ja metsa alustaimestiku tagasipeegelduste eristamine on praktiliselt teostamatu (Vehmas *et al.* 2011). Lisaks võivad maapinna lähedasi tagasipeegeldusi põhjustada rohundid või metsa alustaimestik, mis mõjutavad läbitavust minimaalselt.

Kõrgusvahemiku lõpp-punktiks (h_2) määrati 5 m, et kaasata punkte, mis pärinevad alusmetsa kõrgemate puude madalamatelt osadelt. Seahulgas võeti arvesse asjaolu, et andmestiku tootmiseks kasutatav ALS-seade registreerib erinevat järku peegeldusi maksimaalselt 2,6 m vahemike järgi. Valitud kõrgusvahemik on seega laiema vertikaalse ulatusega, et kaasata teist järku alusmetsa taimestiku peegeldusi. Kõrgemal kui 5 m võib esineda peegeldusi kõrgema rinde võrastikult, mida ei peeta alusmetsa määramisel oluliseks.

2.7.3. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine välitöödel

Välitöödel koguti 69 proovialalt kvalitatiivset informatsiooni alusmetsa taimestiku tiheduse ning läbitavuse ja nähtavuse tingimuste kohta. Tööd viidi läbi 2016. aasta varakevadel ja hilissügisel aktiivse vegetatsiooniperioodi väliselt. Niimoodi tagati sarnased tingimused ALSi andmete kogumiseks ja välistati lehestiku mõju hinnatud tunnustele. Proovialade asukoha määramisel kasutati käsi GNSS-seadet (Garmin GPSMap60CSX). Proovialade hetkeolukord jäädvustati fotoaparaadiga (Sony NEX-5R).

Kvalitatiivne eksperthinnang valiti põhjusel, et hinnatavad tunnused olid piisavalt kompleksed nähtused, mille muul viisil määramine oleks osutunud metoodiliselt liiga keeruliseks ja otstarbetuks.

Hinnanguline alusmetsa tihedus, läbitavus ja nähtavus jaotati viide klassi (Tabel 5). Tunnuste hinnanguklasside omavahelisi seoseid ei eeldatud. Viieastmelisel skaalal eristati harva juhtuvad olukorrad (0 ja 4) ning tavapärased situatsioonid (1, 2 ja 3). Alusmetsa tiheduse hindamisel määrati, kas inimese kõrgusel olev taimestik oli hõreda või tiheda struktuuriga.

Tabel 5. Alusmetsa tiheduse, läbitavuse ja nähtavuse klassid.

moodustatud klass	alusmetsa tihedus	läbitavus	nähtavus
0	puudub või lage	takistuseta	kauge
1	hõre	lihtne	hea
2	mõõdukas	takistatud	piiratud
3	tihe	raske	lähedane
4	väga tihe	väga raske või läbimatu	väga lähedane

Läbitavuse puhul hinnati, mil määral mõjutas taimestik proovialale jõudmist ja sealt lahkumist. Takistuseta (0) hinnang anti juhul, kui prooviala asus lagedal, näiteks raielangil, kus ei esinenud taimestikku, mis oleks kuidagi mõjutanud liikumist. Takistatuks (2) hinnati läbitavus siis, kui taimestik põhjustas liikuja marsruudi ideaaltrajektoorilt vähest kõrvalekallet või vähest mõju liikumiskiirusele (Lisa 4). Väga raskeks (4) või läbimatuks hinnati läbitavus siis, kui taimestik põhjustas takistuse, mis sundis liikujat ideaaltrajektoorilt oluliselt kõrvale kalduma või väga aeglaselt liikuma, mis ei olnud ajaliselt otstarbekas.

Nähtavusele anti hinnang „kauge“ (0), kui prooviala asus lagedal, kus ei esinenud nähtavust takistavat taimestikku. Piiratud nähtavus (2) määrati siis, kui taimestik piiras nähtavust prooviala kõigis suundades mõnekümne meetrini. Väga lähedaseks (4) määrati nähtavus, kui tiheda taimestiku tõttu polnud võimalik kahest meetrist kaugemale näha. Viimase näiteks on tihe noor kuusik (Lisa 4).

2.7.4. Alusmetsasuse kujutise lahutuse määramine

Alusmetsasuse tulemus vormistati rasterkujutisena. Rastripõhiste analüüside puhul on oluline lahutusühiku suurus, millest sõltub detailsus. Lahutusühiku määramisel käsitleti kolme aspekti:

- rastri lahutusühikusse peab kuuluma esinduslik hulk lidari punkte;
- tuletise raster peab olema piisavalt detailne, et uuritavat nähtust objektiivselt kirjeldada,
- tuletise rastri lahutusühik ei tohi olla liiga suur, et nähtuse sisu liialt üldistuks.

Antud analüüsis otsustati kasutada kolme ruumilist lahutust. Aluseks võeti 10 m rastri lahutusühik, mis on piisavalt detailne, et hinnata taimestiku struktuuri muutusi metsas ja mis sisaldab piisavalt lidari punkte. Teiseks rastri lahutusühikuks valiti 20 m, mille ühik on pindalalt eelmisest neli korda suurem ja kuhu võib kuuluda neli korda rohkem punkte. Kolmandaks valiti rastri lahutusühik 50 m, mis esindab analüüsi kõige üldisemat taset.

2.7.5. Alusmetsasuse leidmine

Enne alusmetsasuse leidmist anti ALS-punktipilvedele suhteline kõrgus, mis on vajalik maapinnast määratud kõrgusvahemikus olevate punktide leidmiseks. Suhtelise ehk maapinna 0 m kõrguse määramiseks kasutati Lastools programmi Lasheight (replace_z). Analüüsi kaasati kõik punktipilve klassid, kus võib esineda taimestikult pärit peegeldusi. Las2las (drop_class) programmiga arvati välja punktid, mis kujutavad hooneid (klass 6) või veekogusid (klass 14).

Alusmetsasuse arvutamiseks leiti punktipilvest 0,5–5 m vahemiku punktide arv ja 0–5 m kihi punktide arv. Esimese kihis asuvad alusmetsa taimestiku punktid ning teises kihis lisaks ka madalamad maapinna punktid. Alusmetsasus leiti nende jagatisena. Saadud suhtarv on vahemikus 0,00–1,00 ja näitab, millises suhtes esineb alusmetsa punkte võrreldes maapinnaga. Lidari punktipilve kujult mindi üle rasterkujutisele, kasutades Lastoolsi Lasgridi programmi. Näitaja tulemused leiti kolmele erinevale rastrile: 10, 20 ja 50 m. Välitööde proovialadele määrati alusmetsasus 7 m raadiuste puhveralade keskmisena.

Alusmetsasuse väärtus 0,00 näitab, et alusmetsa kõrgusvahemikus punkte ei esinenud. Seega võib alusmets kas puududa või võib olla tegemist lageda alaga. Näitaja väärtus 1,00 tähendab, et alusmetsa kõrgusel asus kiht punkte, millest madalamal tagasipeegeldusi ei esinenud. Seega esines piisavalt tihe alusmetsa taimestik, mis ei võimaldanud lidari impulsil maapinnani tungida.

2.7.6. Alusmetsasuse ja proovialade hinnanguliste tunnuste vahelised seosed

Alusmetsasuse tulemusi võrreldi välitöödel kogutud proovialade andmetega. Esiteks uuriti alusmetsasuse ja kõigi proovialade (69) hinnanguliste tunnuste vahelist seost. Statistilise meetodina kasutati mitteparameetrilist Spearmani ρ -d ehk astakorrelatsioonikordajat, kuna andmetel puudus normaaljaotus. Tunnustena kasutati alusmetsasust, mis oli pidev arvtunnus vahemikus 0,00–1,00, ja järjestatud hinnangute arvtunnuseid skaalal 0–4. Hinnanguliste tunnuste järjestatud diskreetset tüüpi võib käsitleda pideva tunnuse erivormina, mis on mõõdetud suure sammuga.

2.7.7. Klassifitseeritud alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed

Lisaks uuriti, kas klassidesse jaotatud ehk klassifitseeritud alusmetsasusel on piisav seos hinnanguliste tunnustega. Alusmetsasuse 10 m rastri väärtuste seast (0,00–1,00) otsiti hinnangulise alusmetsa tiheduse klassidele vastavaid väärtusvahemikke. Klassifitseerimise eesmärk oli väljendada alusmetsasuse rastri väärtusi kujul, mis omaks sisulist tähendust. Eeldati, et viie tähendusliku klassiga alusmetsasuse rasterkujutis on paremini loetav ja arusaadavam kui algne kujutis pideval skaalal (0,00–1,00). Klassifitseerimise vajadust põhjendati kahe järgneva aspektiga:

- alusmetsasus kujutas valitud kõrgusvahemikus esineva taimeistiku suhtelist tihedust;
- alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed ei olnud lineaarsed.

Lidar-näitaja klassifitseerimiseks kasutati kahte konkureerivat meetodikat:

1. Klasside eristamine lihtstatistikute alusel (Statistica 10).
2. Klassifitseerimine loomulike vahemike ehk Jenksi algoritmi alusel (ArcMap 10.2).

Esimese meetodikaga valiti proovialade seast välja umbes pooled liikmed ehk kalibreerimisalad (36). Ülejäänud proovialad (33) eraldati kontrollimiseks ja nimetati kontrollaladeks. Kalibreerimisalade alusmetsa tiheduse klasside alusel leiti alusmetsasuse lihtstatistikud, mida kasutati klasside eristamiseks. Eranditena käsitleti klasside liikmeid, mis asusid väljaspool klassi 1,5-kordset standardvea ulatuse piiri. Seejärel hinnati, kas leitud statistikute alusel on võimalik klasse eristada.

Teise meetodikaga leiti väärtusvahemike klassid kõigi uurimisalade üleselt lidar-näitaja rastri põhjal, kasutades loomulike vahemike meetodit. Eelduseks peeti alusmetsasuse ja alusmetsa tiheduse hinnangu vahelist tugevat seost. Eristatud väärtusvahemikega lidar-näitaja seost hinnanguliste tunnustega kontrolliti Spearmani ρ statistikuga kõigil proovialadel.

Alusmetsasuse väärtusvahemike klassid eristati ühe kümnendkoha täpsusega. Klassifitseeritud alusmetsasuse rastri seost alusmetsa tiheduse hinnanguga kontrolliti statistiliselt Spearmani ρ statistikuga. Klassifitseerimise tulemusena saadi alusmetsasuse lihtsustatud rasterkujutis, millelt oli näha, kus esines tihedam alusmets, mis mõjutas läbitavust ja nähtavust.

2.8. Läbitavus hindamine Karttapullautini tarkvara kujutistel

Viimase analüüsi etapina uuriti Karttapullautini tarkvara läbitavuse kujutamise võimalusi. Karttapullautini orienteerumiskaardid koostati ALS andmetest vaikeseadetega. Analüüsis hinnati visuaalselt, kas Karttapullautini ja alusmetsasuse kujutiste vahel esines erinevusi. Seejärel viidi Karttapullautini ja alusmetsasuse kujutised võrreldavale kujule ja teostati rastrite lahutus erinevuste visualiseerimiseks. Kujutiste võrdlus teostati uurimisala 465x näitel.

3. Tulemused ja arutelu

3.1. Nädiseraldiste punktivilvede vertikaalse jaotuse analüüs

Küpsete, valmivate või keskealiste metsaeraldiste seast eristus peamiselt üks suurema punktide hulgaga kõrgusvahemik, kus esines tõenäoliselt esimese rinde võrastik (Joonis 8B). Võimaliku alusmetsa poolt põhjustatud tagasipeegelduste esinemine asus kolme eraldise näitel 1–8 m kõrgusvahemikus. Kõrgusvahemikku 1–5 m langes eraldistel 2,4–10,9 % kogu punktide hulgast.

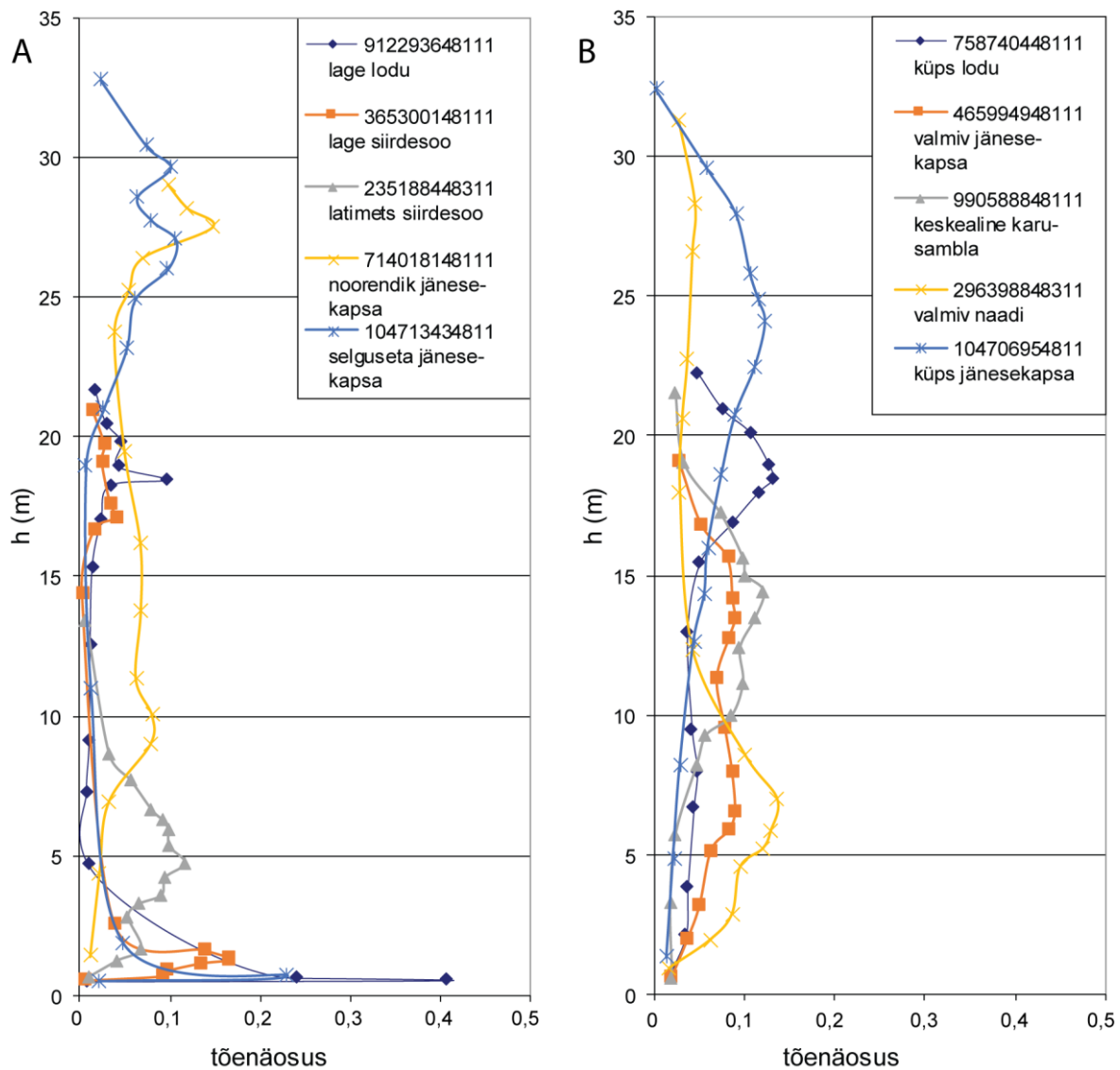
Lagedate, latimetsade, noorendike ja selgusetu eraldiste puhul esines enamikel eraldistel sarnane punktide kõrgusjaotuslik paiknemine (Joonis 8A). Selgelt eristuvad üksikute säilikpuude võrastike tagasipeegeldused ning kohati on määratletav madalal kõrgusel kasvav noor taimestik. Suurima punktide hulgaga madalal kõrgusel on siirdesoo latimets, kus kasvab noor kuusik, mille tihedalt asetsevad võrad põhjustavad peegeldusi. Kõrgusvahemikus 1–5 m on eraldistel 0,22–21,43 % kogu punktidest.

Nädiseraldiste põhjal jagunesid punktide kõrgusjaotused järgmiselt:

1. Kypses lodumetsas (758740448111), mille enamuspuuliigiks on sanglepp, on näha esimese rinde põhjustatud tagasipeegelduste suurenemine 18–19 m kõrguselt ning teises rindes olevate kuuskede tõttu tekkinud tagasipeegelduste suurem hulk 8 m kõrguselt (Joonis 8B). Seega võib pidada läbitavust mõjutavaks kõrgusvahemikuks 1–8 m.
2. Kypses jänese kapsa männikus (1047069548111) on näha esimese rinde võrastiku poolt põhjustatud tagasipeegelduste paiknemine 24 m kõrgusel (joonis 8B). Järelkasvuna alusmetsas kasvav kuusk ja mänd punktivilve kõrgusjaotuses ei eristu.
3. Valmivas naadi eraldises (296398848311), mille enamuspuuliigiks on saar, on näha tagasipeegelduste suur hulk kõrgusvahemikus 1–12 m. See on suurim 7 m kõrgusel (Joonis 8B). Seega võib vahemikus 1–7 m paikneda läbitavusele ja nähtavusele mõju avaldavat taimestikku.
4. Valmiv jänese kapsa-kõdusoo kaasik (465994948111) paistab silma kahe kõrgusvahemikuga, kus esineb punktide suurem hulk (joonis 8B). Esiteks on näha punktide hulga suurenemine maapinnalt 6–7 meetrini, mis läheb üle teiseks kõrge punktide esinemistõenäosusega vahemikuks 11–16 m. Võib arvata, et 1–7 m esineb alusmetsa kõrgusvahemik, mis võib avaldada mõju läbitavusele.

5. Keskealise karusambla-mustika männiku (990588848111) puhul eristub üksnes esimese rinde võrastiku tagasipeegelduste esinemine kõrgusvahemikus 9–18 m (Joonis 8B). Madalamal ei eristu suurema tagasipeegelduste hulgaga kõrgusvahemikku.
6. Jänese kapsa haava noorendiku (714018148111) punktipilve kõrgusjaotuses esineb 27–29 m vahemikus eristuv tagasipeegelduste suurem hulk, mis on põhjustatud üksikute säilikpuude võrastikest (Joonis 8A). Madalamal esineb mõningane tagasipeegelduste hulga suurenemine vahemikus 7–12 m.
7. Siirdesoo kuuse latimetsas (235188448311) esineb 1 m kõrguselt alates tagasipeegelduste hulga kasv, mille maksimum on 5 m ja lõpp 9 m kõrgusel (Joonis 8A). Vahemikus 1–9 m esineb tõenäoliselt taimestik, mis võib mõjutada läbitavust ja nähtavust.
8. Selgusetu jänese kapsa eraldise (1047134348111) puhul on väga madalal kõrgusel alahinnatud maapinna kõrgust ning seetõttu ei kujuta tagasipeegelduse suurem hulk ilmselt taimestikku (joonis 8A). Üksikute jäänukpuude võrastike põhjustatud peegeldused asuvad 25–31 m kõrgusel.
9. ja 10. Lagedate lodu ja siirdesoo eraldiste (912293648111 ja 365300148111) puhul on näha säilikpuude võrastikest pärinenud peegeldusi vahemikus 17–20 m (Joonis 8A). Lageda siirdesoo puhul esineb 1–2 m vahemikus suur tagasipeegelduste hulga suurenemine, mis võib olla põhjustatud madalast võsast. Lageda lodumetsa puhul on samuti alahinnatud reljeefi kõrgust, mistõttu madalad kõrguse punktid võivad pärineda maapinnalt.

Näidiseraldiste analüüsi tulemused näitavad, et maapinnast kõrgemal, kuid esimese rinde võrastikust madalamale jääb kogu punktipilvest vähe tagasipeegeldusi. Suur mõju tagasipeegelduste tekkimisele on kõrgema rinde võrastikul, mis omab teatavat varjutavat efekti. Kõrgusvahemikus 1–8 m esineb mõningal määral punktide hulga suurenemist, mis võib kujutada alusmetsa taimestikku.



Joonis 8. Nädiseraldiste punktpilvede vertikaalne jaotus. A) varajases arengujärgus metsatüübid, B) hilises arengujärgus metsatüübid.

3.2. Läbitavuse ja nähtavuse hindamine ALSi alusmetsasuse järgi

Välitöödel tulemustest selgub, et kõige rohkem (24 prooviala) hinnati alusmetsa tihedaks ehk 3. klassi (tabel 6). Läbitavust hinnati kõige rohkem (22 prooviala) takistatuks (klass 2) ning nähtavust kõige rohkem (30 prooviala) väga lähedaseks (klass 3). Kokkuvõttes anti kõige rohkem hinnanguid tiheda alusmetsa, takistatud läbitavuse ja piiratud nähtavuse tingimustes.

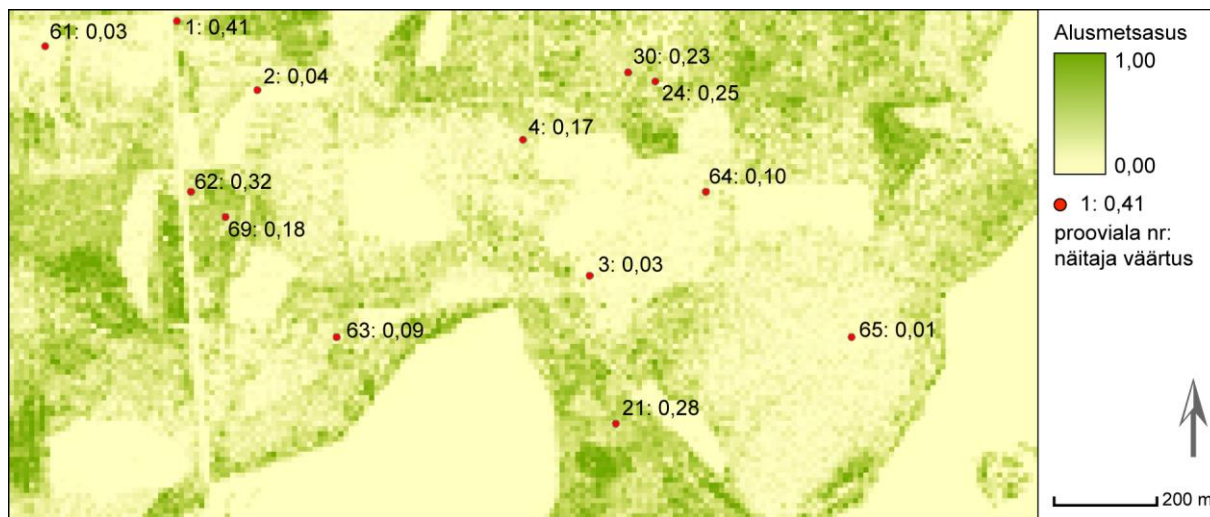
Tabel 6. Proovialade hinnangute jaotumine klassidesse tunnuste järgi.

hinnangu klass	0	1	2	3	4
alusmetsa tihedus / proovialade hulk	lage	hõre	möödukas	tihe	väga tihe
	4	15	19	24	7
läbitavus / proovialade hulk	takistusteta	lihtne	takistatud	raske	läbimatu
	7	17	22	21	2
nähtavus/ proovialade hulk	kauge	hea	piiratud	lähedane	väga lähedane
	6	14	16	30	3

3.2.1. Uurimisala 464x

Uurimisala kõrgeimaks prooviala alusmetsasuse tulemuseks osutus 0,41 ning väikseimaks 0,01 (Joonis 9). Kõrgeim tulemus saadi proovialalt nr 1, mis asus metsaserval ning väikseim alalt 65, kus asus ilma alusmetsata liigniiske madal männik (Joonis 10). Mõlemal juhul vastab alusmetsasuse tulemus hinnangulistele tunnustele. Proovialal 1 esines tihe alusmetsa taimestik, mis mõjutas nii läbitavust kui ka nähtavust. Alal 65 ei esinenud läbitavust ja nähtavust mõjutavat alusmetsa, kuid nähtavus oli piiratud tihedate kasvavate mändide tõttu. Proovialad 62 ja 69 asusid tihedas kuuse latimetsas, kus läbitavus ja nähtavus olid oluliselt takistatud.

Nimetatud proovialade alusmetsasuse väärtused olid oodatust mõnevõrra madalamad (0,32 ja 0,18), kuid ümbruskonna näitaja väärtused kõrged. Uurimisala löikes annab alusmetsasus taimestiku tiheduse kohta sobiva kujutise. Alusmetsasuse kujutis võimaldab määrata kohtasid, kus metsa taimestik suure tõenäosusega põhjustab jalgsi läbitavusele ja nähtavusele takistavat mõju. Lisaks on kujutiselt näha (proovialast 63 lõunas), et metsa servas esinevad kõrgemad alusmetsasuse väärtused, mis võivad olla põhjustatud tihedama taimestiku servaepektist.



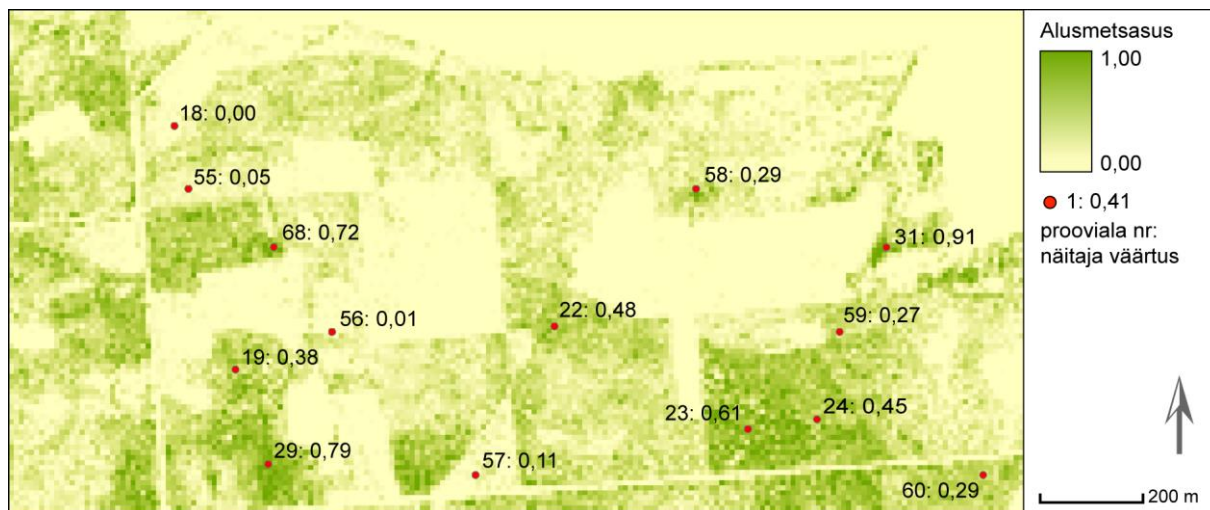
Joonis 9. Uurimisala 464x alusmetsasus (10 m) proovialade tulemustega.



Joonis 10. Vasakul prooviala 1 ja paremal 65.

3.2.2. Uurimisala 465x

Uurimisala kõrgeim alusmetsasuse (0,91) tulemus saadi kirdepoolses osas asuvalt proovialalt nr 31 ning madalaim (0,00) proovialalt 18 (Joonis 11). Kõrgeima näitajaga prooviala (31) on erand, mida ei saa käsitleda metsas tehtud vaatlusena. Prooviala asus loodusliku heinamaa servas, kus esines väga tihe noor kuusik (Joonis 12), mis muutis läbitavuse ja nähtavuse olematuks. Kõrgete tulemustega eristuvad veel proovialad 29 ja 72, mille alusmetsasuse väärtused on vastavalt 0,79 ja 0,72. Mõlemad proovialad asuvad tihedas latimetsas või keskealises kuusikus, kus läbitavus ja nähtavus olid oluliselt piiratud. Madalama näitajaga proovialal (18), mis asus küpses kuusemetsas, ei esinenud läbitavust ja nähtavust mõjutavat alusmetsa taimestikku (Joonis 12). Uurimisala alusmetsasuse kujutis iseloomustab alusmetsa tihedust ja võimaldab määrata kohtasid, kus läbitavus ja nähtavus võivad olla takistatud. Sarnaselt eelmisele uurimisalale on näha taimestiku põhjustatud servaeefekti ja kujutiselt eristub erineva arenguklassiga metsaeraldisi.



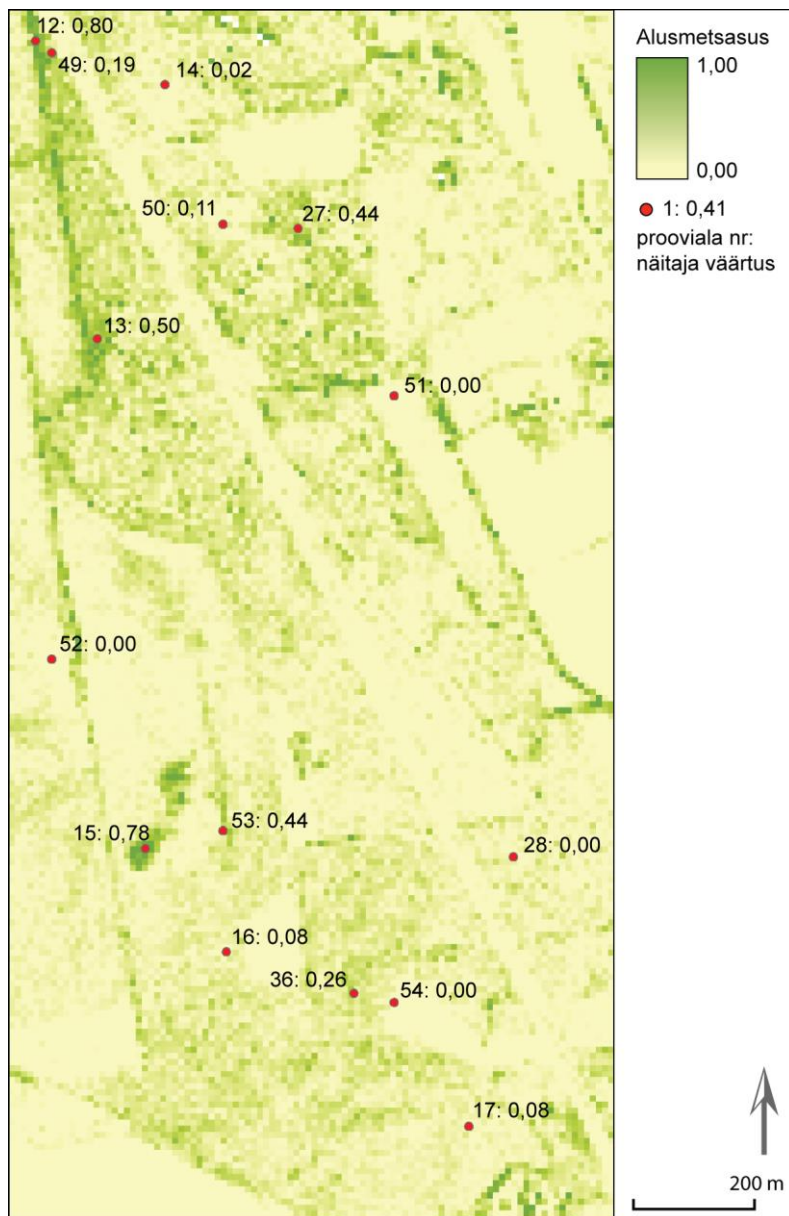
Joonis 11. Uurimisala 465x alusmetsasus (10 m) koos proovialade tulemustega.



Joonis 12. Vasakul prooviala 31 ja paremal 18.

3.2.3. Uurimisala 47x

Kõrgeimaks alusmetsasuse tulemuseks saadi 0,80 proovialal 12 (Joonis 13). Antud proovialal esines tihe alusmets (Joonis 14). Tähelepanuväärne on ala 15 alusmetsasuse kõrge väärtus, mis kajastab väga tiheda taimestikuga ala. Prooviala asus tihedas männinoorendikus, kus läbitavus ja nähtavus olid oluliselt mõjutatud. Näitaja 0,00 väärtused leiti proovialadelt 28, 51, 52 ja 54. Nimetatud proovialadel esinesid järgnevad metsad: küps männik (28), lageraie (51 ja 54) ja liigniiske männik (52). Loetletud proovialadest ei sobi alusmetsasuse tulemused proovialaga 28, kus esines läbitavust ja nähtavust mõjutav alusmetsa taimestik. Prooviala 52 on sarnane uurimisala 464x proovialaga 65, kus liigniiskes madalas männikus saadi madal näitaja (Joonis 14). Antud uurimisala näitel ühtisid alusmetsasuse tulemused ja hinnangulised tunnused enamikel juhtudel. Alusmetsasuse näitaja kajastas uurimisalal esinenud tiheda taimestikuga alasid ja eraldiste servasid.



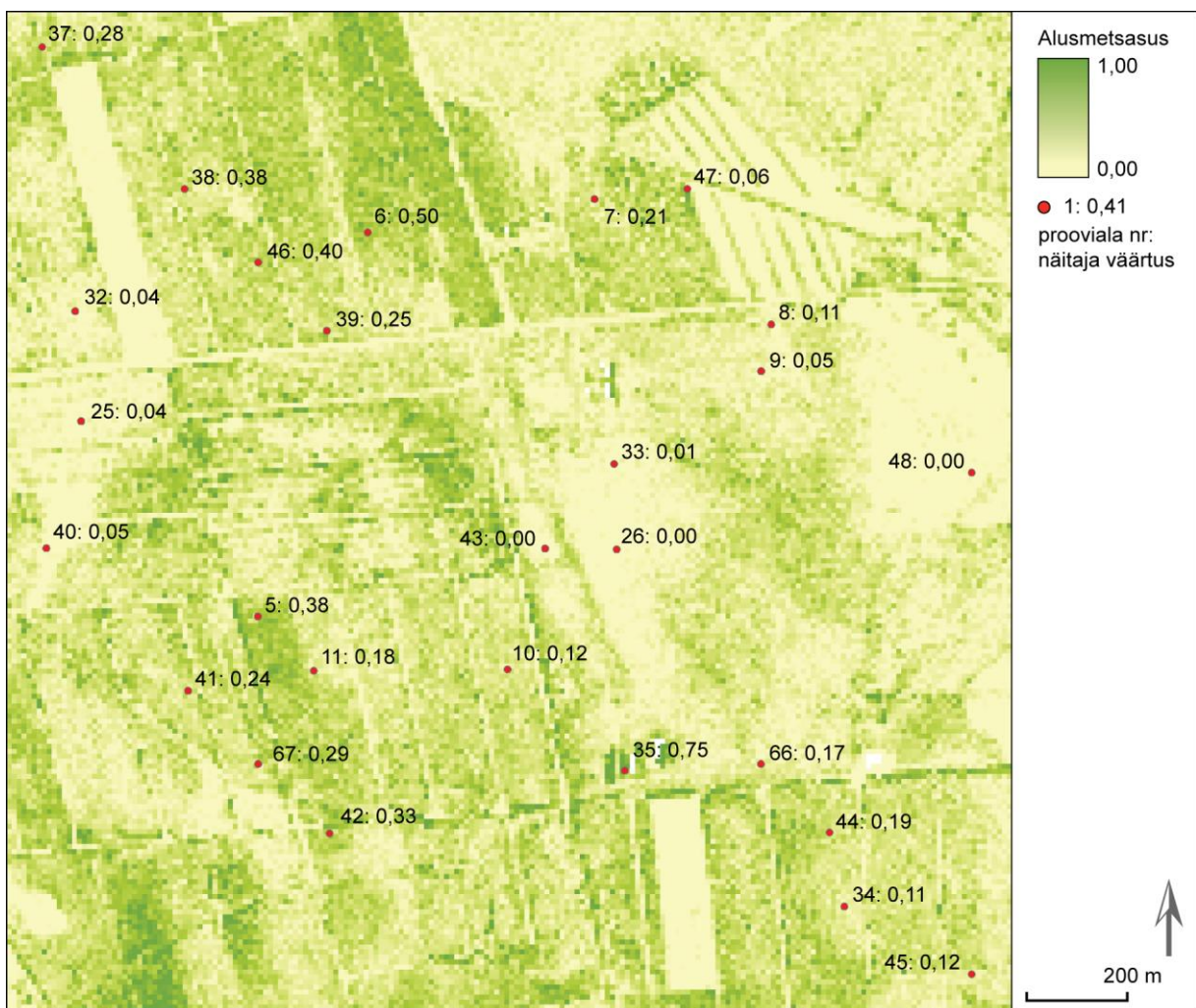
Joonis 13. Uurimisala 47x alusmetsasus (10 m) proovialade tulemusega.



Joonis 14. Vasakul prooviala 12 ja paremal 52.

3.2.4. Uurimisala 49x

Uurimisala 49x kõrgeima alusmetsasuse väärtus 0,75 saadi proovialalt 35 (Joonis 15). Antud prooviala asus liigniiske ala servas, kus kasvas tihe kuusik, mis takistas läbitavust ja nähtavust (Joonis 16). Prooviala 6 näitaja väärtusega 0,5 asus kultiveeritud küpses kuusikus, kus läbitavus oli takistatud risti kultiveeritud puude riviga. Näitaja 0,00 väärtus esines mitmel proovialal: 26, 43 ja 48. Nimetatud proovialad esinesid liigniiskes kaasikus (26, 43) või võsastunud lagedal (48). Liigniiskes kaasikus esines hõre madalam taimestik, mis mõjutas läbitavust ja nähtavust. Lagedal (prooviala 48) esines madal võsa, mis avaldas läbitavusele ja nähtavusele vähest mõju (Joonis 16). Uurimisala lõikes võimaldab alusmetsasus üsna täpselt määrata takistatud läbitavuse ja nähtavusega kohti.



Joonis 15. Uurimisala 49x alusmetsasus (10 m) proovialade tulemustega.



Joonis 16. Vasakul prooviala 35 ja paremal 48.

3.3. Alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed

Statistilise analüüsi tulemustes kajastub Spearmani ρ positiivne mõõdukas kuni tugev ($\rho=0,63-0,76$) seos alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahel (Tabel 7). Statistiline analüüs näitab, et kasutatud näitaja on adekvaatne iseloomustamiseks alusmetsa taimestiku tihedust, läbitavust ja nähtavust antud töös valitud parameetrite järgi. Tulemustes esines ootuspäraselt tugev seos alusmetsasuse ja läbitavuse vahel. Nähtavuse hinnangu ja alusmetsasuse vahel esines mõnevõrra nõrgem, kuid samuti oluline seos. Kõigi tunnuste vahelised seosed osutusid statistiliselt olulisteks ($p<0,05$).

Hinnangute lõikes (Tabel 7) osutus statistiliselt kõige tugevamaks alusmetsasuse ja läbitavuse hinnangu (K_TAKIS) vaheline seos ($\rho=0,71-0,76$). Sarnane tugev seos esines alusmetsasuse ja alusmetsa tiheduse hinnangu (K_TAIM) vahel ($\rho=0,67-0,72$). Mõnevõrra nõrgem seos ($\rho=0,63-0,66$) esines nähtavuse hinnangu (K_NÄHT) ja alusmetsasuse vahel.

Tabel 7. Alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed (Spearmani ρ).

Spearmani ρ	K_TAIM	K_TAKIS	K_NÄHT
N_10	0,70	0,71	0,63
N_20	0,67	0,68	0,62
N_50	0,72	0,76	0,66
K_TAIM	-	0,81	0,83
K_TAKIS	0,81	-	0,71
K_NÄHT	0,83	0,71	-

Võrreldes alusmetsasuse rastrite erinevaid lahutusi, esines kõigi hinnanguliste tunnuste korral tugevaim statistiline seos 50 m rastri tulemustega. Kõigi tunnuste üleselt varieerus korrelatsioonikordaja rastri lahutuste lõikes 0,03–0,08 ühikut. Alusmetsasuse 20 m raster omas kõigi tunnuste korral väikseimat korrelatsioonikordajat. Analüüsi tulemuste põhjal saab

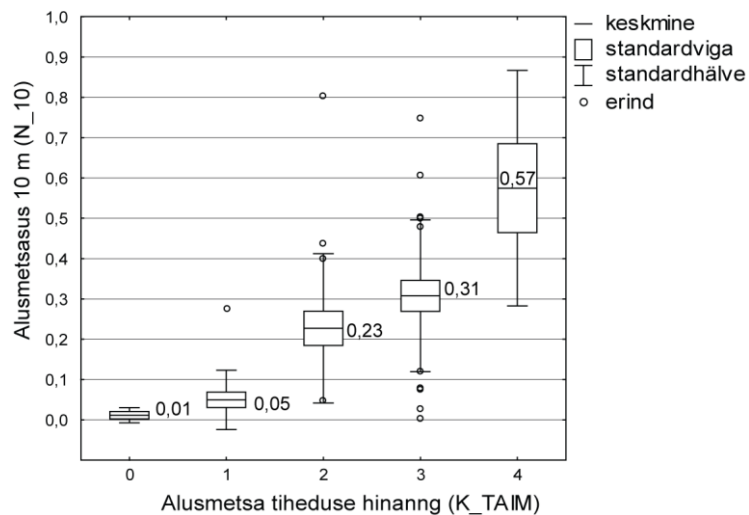
järeldada, et 50 m alusmetsasuse raster töötas antud tingimustes kõige paremini, kuid uuritud lahutuste lõikes trendi ei esinenud.

Lisaks näitas analüüs, et 0–5 m kõrgusvahemikus olevate tagasipeegelduste hulk 10 m rastri ühikus varieerus kõigi uurimisalade lõikes 0–58 punktini. Seega oli ühes 10 m rastri ühikus kuni 58 punkti, mida võib pidada statistilise usaldusväärsuse tagamisel minimaalseks. Väiksema lahutusega (20, 50 m) rastrite ühikutes oli tõenäoliselt peegeldusi rohkem, mis tõstis rastri ühiku usaldusväärsust.

3.3.1. Hinnangulise alusmetsa tiheduse ja alusmetsasuse vaheline seos

Alusmetsa tiheduse hinnangu (K_TAIM) ja alusmetsasuse vahel esines suurim korrelatsioonikordaja ($\rho=0,72$) 50 m rastri (N_50) korral (Tabel 8). Sarnased korrelatsioonikordaja tulemused esinesid 10 m ($\rho=0,70$) ja 20 m näitaja rastriga ($\rho=0,67$). Rastri lahutuste lõikes ei esinenud trendi. Seega võib alusmetsasust hinnata nii detailsema (10 m) kui ka üldisema (50 m) lahutusega. Tugevate statistilise seoste põhjal võib järeldada, et näitaja sobib töös kasutatud uurimisalade näitel alusmetsa tiheduse suhteliseks hindamiseks.

Alusmetsasuse jaotamise alusmetsa hinnangu klasside järgi näitab, et esimesed neli klassi katavad näitaja vahemiku 0–0,5 ning viimane klass ülejäänud osa (Joonis 17). Antud tulemus viitab madalate klasside (0, 1, 2, 3) võimalikule kattumisele ning alusmetsa hinnangu ja alusmetsasuse vahelisele mittelineaarsele seosele.



Joonis 17. Proovialade ja alusmetsa tiheduse hinnangu jaotumine.

3.3.2. Läbitavuse ja alusmetsasuse vaheline seos

Läbitavuse hinnangu (K_TAKIS) ja alusmetsasuse vahel esines tugevam statistiline seos kui alusmetsa tiheduse hinnangu puhul ($\rho=0,76$). Suurim korrelatsioonikordaja esines 50

alusmetsasuse rastri ja läbitavuse hinnangu vahel. Teised alusmetsasuse rastrid (10 m ja 20 m) olid väiksema korrelatsioonikordajaga vastavalt ρ 0,71 ja 0,68.

Väiksema lahutusega alusmetsasuse rastri (50 m) ja hinnangulise tunnuse tugevam statistiline seos võis olla põhjustatud kujutise üldistamisest. Suurema lahtusühiku tõttu üldistatakse kujutist, mistõttu võis proovialadel esineda keskmiselt parem kokkulangevus hinnangulise tunnusega. Samuti ei saa välistada läbitavuse juhuslikult paremat kokkulangevust.

Tunnuste positiivne tugev korrelatsioon näitab, et kõrgema alusmetsasuse väärtusega proovialadel, kus esines tihedam alusmetsa taimestik, oli jalgsi läbitavus rohkem takistatud. Seega võib järeldada, et töös kasutatud meetodika, andmete ja parameetrite alusel on võimalik hinnata metsa jalgsi läbitavust. Erinevate alusmetsasuse rastrite seosekordajate lõikes ei esinenud trendi. Seetõttu ei selgunud lahutuse mõju alusmetsasusele.

3.3.3. Nähtavuse ja alusmetsasuse vaheline seos

Nähtavuse hinnangu ja alusmetsasuse vahel esines positiivne mõõdukas, kuid eelnevatest hinnangulistest tunnustest nõrgem seos. Nähtavuse hinnangu tugevaim seos ($\rho=0,66$) esines alusmetsasuse 50 m lahutuse rastriga (Tabel 8). Teiste näitaja rastrite (10 ja 20 m) korral oli seosekordaja $\rho=0,62-0,63$.

Nähtavuse ja alusmetsasuse vaheline nõrgem statistiline seos langeb kokku teoreetilise alusega. Nähtavuse puhul on tegemist alusmetsa tihedusest tuletatud tunnusega, mis võib olla mõjutatud muudest teguritest, mida lidar-andmed ei kajasta. Samuti võis nähtavuse hindamise meetodika osutada ebatäpseks. Antud analüüsi põhjal võib järeldada, et nähtavuse ning kasutatud lidar-näitaja vahel eksisteerib seos.

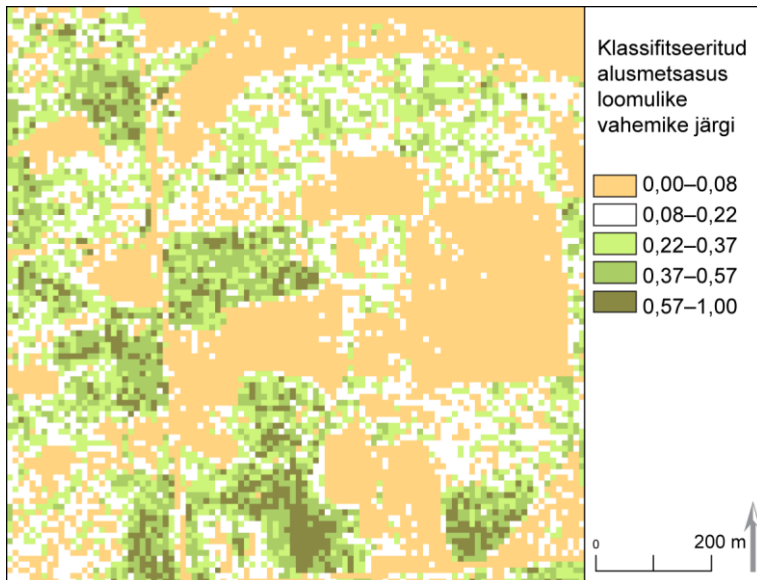
3.3.4. Hinnanguliste tunnuste omavahelised seosed

Hinnanguliste tunnuste omavahelised seosed on kõik tugevad ($\rho=0,71-0,83$), mis näitab vastavust teoreetilisele alusele, mille kohaselt alusmetsa tihedust peeti läbitavuse ja nähtavuse hinnangu aluseks. Alusmetsa tiheduse hinnang (K_TAIM) omas mõlema tuletatud tunnusega (K_TAKIS ja K_NÄHT) tugevat seost. Nähtavuse ja läbitavuse hinnangute statistiline seos oli nõrgim. Viimaste vahel puudus ka otsene teoreetiline seos.

3.4. Klassifitseeritud alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahelised seosed

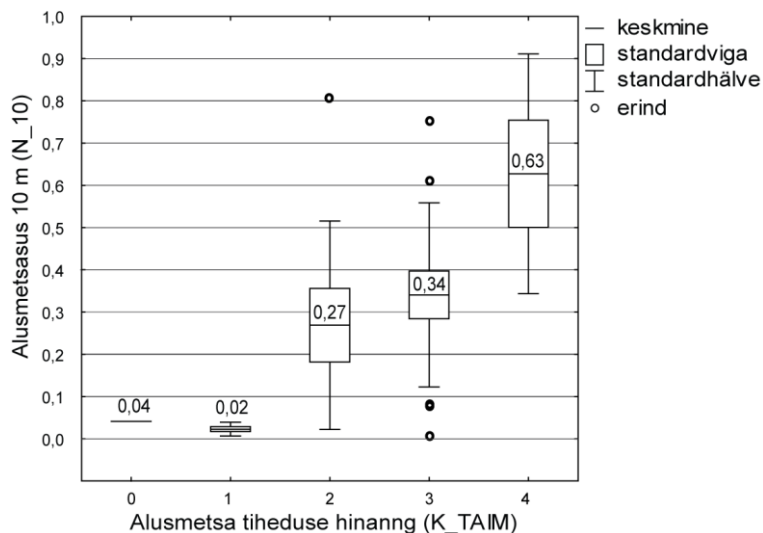
Klassifitseeritud alusmetsasuse raster omas nõrgemat statistilist seost hinnanguliste tunnustega. Antud meetodite ja parameetritega klassifitseerimine täitis eesmärgi osaliselt. Alusmetsasuse

rastri klassifitseerimine proovialade lihtstatistikute järgi osutus puudulikuks meetodiks, kuna hinnanguklasside statistikute vahemikud olid suuresti kattuvad. Alusmetsasuse rastri klassifitseerimine loomulike vahemike meetodiga muutis näitaja rastri loetavamaks (Joonis 18), kuid saadud tulemus ei taganud algsele tulemusele samaväärset vastavust alusmetsa tiheduse või läbitavuse hinnanguga.



Joonis 18. Uurimisala 465x klassifitseeritud alusmetsasuse kujutis.

Klassifitseerimiseks valitud proovialade ehk kalibreerimisalade alusmetsasuse väärtustes esinesid järgmised erindid prooviala numbriga: 12, 16, 17, 23, 28 ja 35. Samuti ei saanud lugeda klassi 0 ühte liiget piisavaks, et eristada näitaja väärtusvahemikku. Klassid 2 ja 3 kattusid standardvea ja standardhälbe lõikes (Joonis 19 ja Lisa 2). Klasside 3 ja 4 väärtusvahemikel kattusid ainult nimetatud gruppide standardhälbed. Seega ei võimaldanud proovialade statistikute kasutamine määrata üheselt hinnanguliste tunnuste klassidele vastavaid alusmetsasuse väärtusvahemikke.



Joonis 19. Kalibreerimisalade alusmetsasuse jaotus klasside järgi.

Alusmetsasuse klassifitseerimine rastri loomulike vahemike meetodi alusel võimaldas määrata uurimisalade üleselt ühtsed rastri väärtusvahemike klassid (Tabel 8). Leitud klassid sarnanevad osaliselt eelmise klassifitseerimise meetodi tulemustega.

Tabel 8. Proovialade alusmetsasuse klassid rastri loomulike vahemike (Jenks) alusel.

klass / uurimisala	0	1	2	3	4
464x	0-0,08	0,08-0,23	0,23-0,40	0,40-0,60	0,60-1
465x	0-0,08	0,08-0,21	0,21-0,37	0,37-0,57	0,57-1
47x	0-0,06	0,06-0,17	0,17-0,31	0,31-0,52	0,52-1
49x	0-0,10	0,10-0,24	0,24-0,38	0,38-0,57	0,57-1
uurimisalade ühine vahemik	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-1

Spearmani ρ korrelatsioonikordajad osutusid loomulike vahemike alusel klassifitseeritud alusmetsasuse ja hinnanguliste tunnuste vahel nõrgemaks kui kalibreerimata andmete puhul ($\rho=0,52-0,66$) (Tabel 9). Kõigi tunnuste puhul olid leitud seosed statistiliselt olulised ($p<0,05$). Tugevaim seos ($\rho=0,66$) esines alusmetsasuse ja nähtavuse hinnangu vahel, mis oli aga vastuolus klassifitseerimata näitaja ja hinnanguliste tunnuste vaheliste seostega.

Tabel 9. Klassifitseeritud alusmetsasuse ja tunnuste vahelised seosed.

Spearman ρ	K_TAIM	K_TAKIS	K_NÄHT
N_10_K	0,52	0,58	0,66

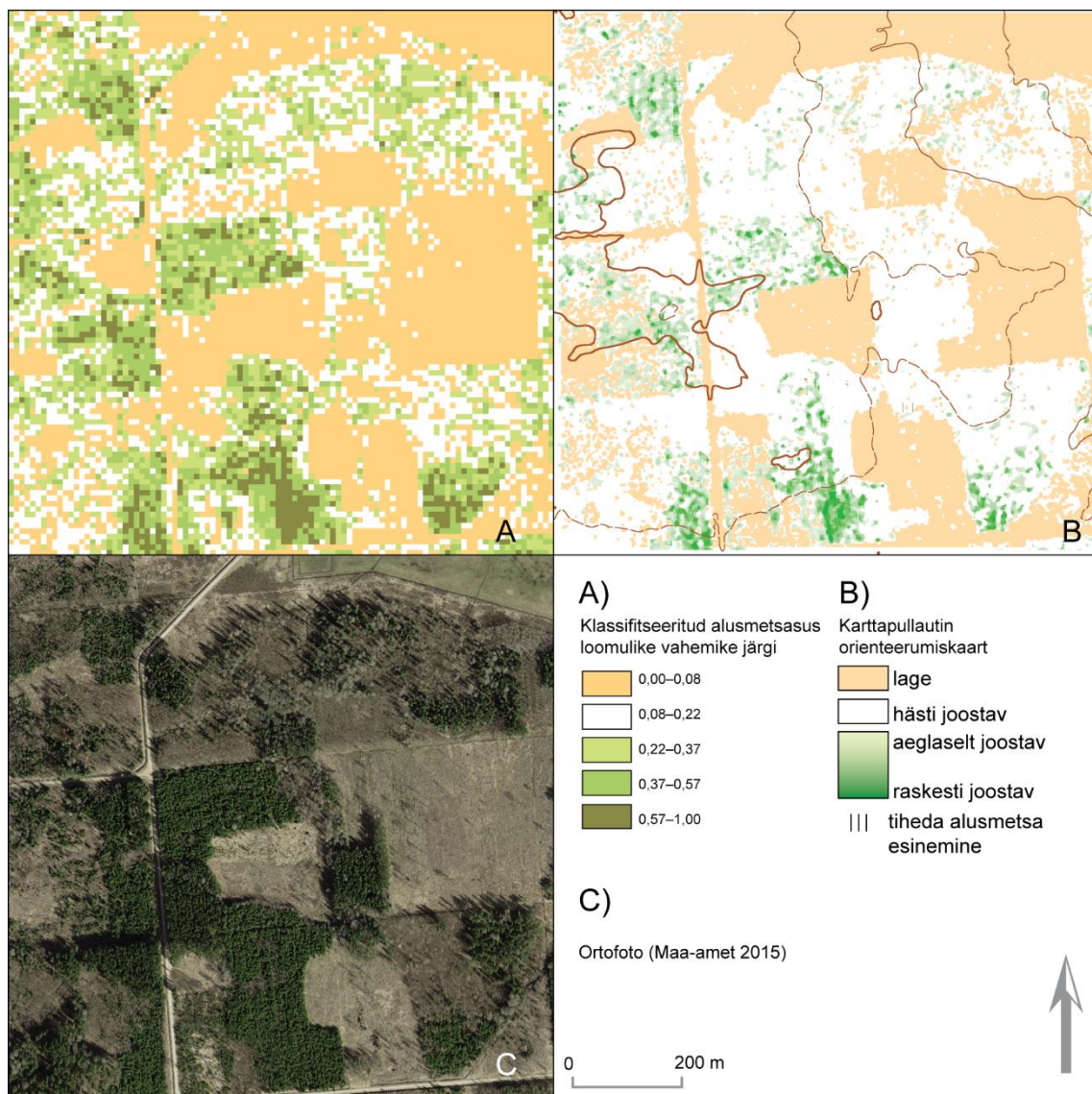
Analüüsi tulemusest järeldub, et alusmetsasuse rastri klassifitseerimine kõigi uurimisalade üleselt muutis statistilised seosed tunnustest nõrgemaks. Klassifitseerimise eesmärk –

alusmetsasuse kujutise loetavuse tõstmine – täideti osaliselt, kuid antud tegevuse käigus muudeti näitaja raster ebatäpsemaks. Saadud tulemus võis olla tingitud järgmistest asjaoludest:

- alusmetsasuse rastri põhjal eristatud klasside vahemikud ei sobi lokaalsete eripärade tõttu kõigile uurimisaladele ühtemoodi;
- määratud väärtusvahemike klassid osutusid liialt üldisteks;
- alusmetsasuse ja hinnangulise alusmetsa tiheduse vaheline statistiline seos pole rastri põhiseks klassifitseerimiseks piisav;
- loomulike vahemike meetod pole klassifitseerimiseks parim meetod;
- proovialade hinnangulised tunnused pole sobilikud alusmetsasuse väärtusvahemike eristamiseks;
- proovialade hinnangute seas võis esineda juhuslikke vigu, mis klassifitseerimist mõjutasid.

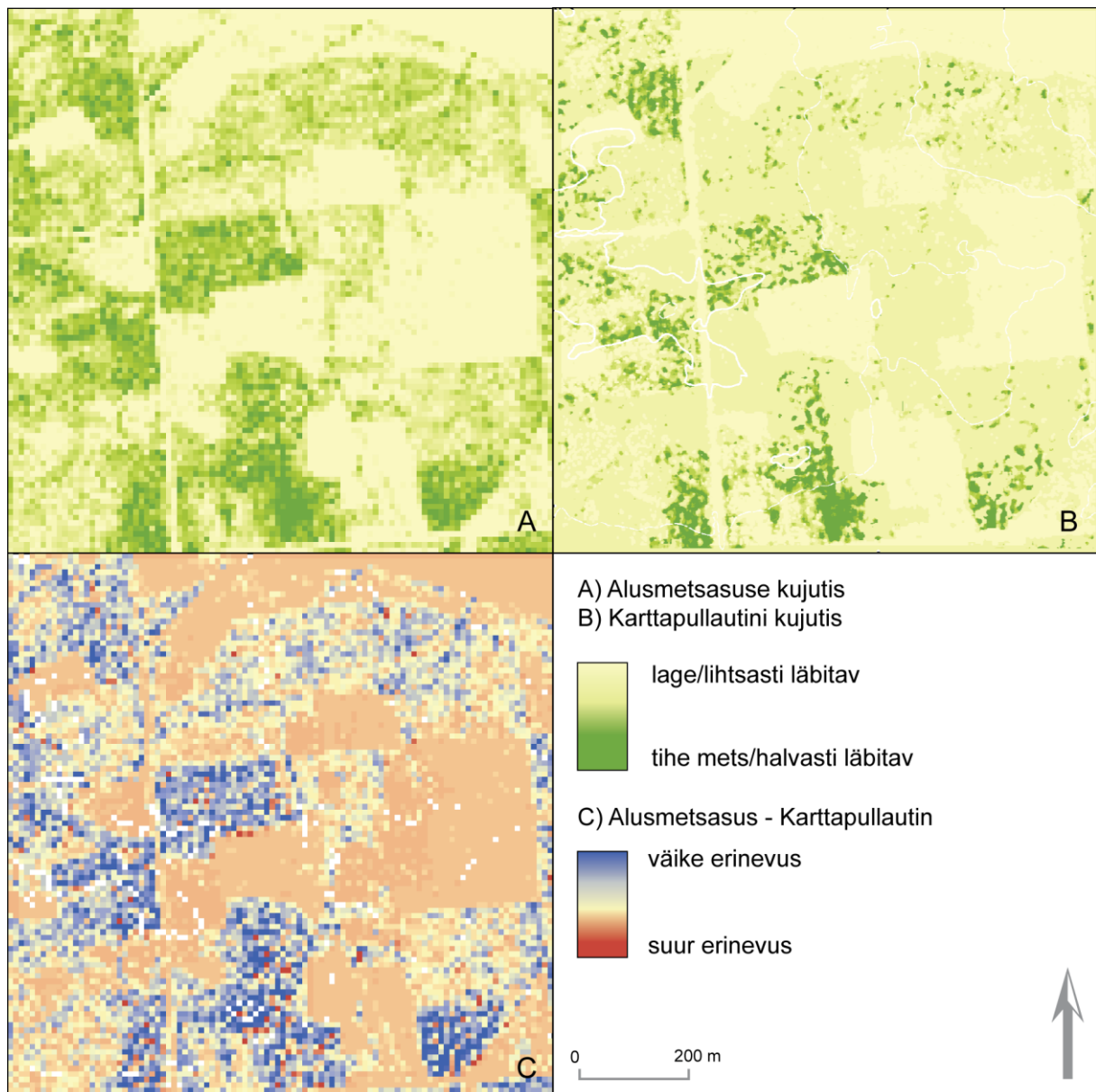
3.5. Karttapullautini orienteerumiskaartide läbitavuse analüüs

Alusmetsasuse ja Karttapullautini tarkvaraga koostatud joostavuse kujutised kattuvad suurel määral (Joonis 20). Mõlemal kujutisel on sarnaselt kujutatud tihedama alusmetsaga alad, kus läbitavus või joostavus on takistatud. Erinevusena eristab Karttapullautin lagedad alad ja hästi läbitava metsa. Alusmetsasuse kujutisel lagedad alad hõreda taimestikuga aladest eristatud ei ole, kuna seda funktsionaalsust antud analüüsi puhul ei vajatud.



Joonis 20. Alusmetsasuse (A), Karttapullautin (B) ja Ortofoto (C) võrdlus uurimisala 465x näitel.

Alusmetsasuse ja Karttapullautini kujutiste lahutamisel ilmnes, et suuremad erinevused esinevad lagedatel või hästi läbitavatel aladel (Joonis 21). Tiheda alusmetsaga ja tõenäoliselt raskesti läbitavad alad erinesid kujutistel vähem. Lisaks paistavad vahe kujutisel silma ka üksikud suure erinevusega pikslid, mis võib olla müra. Kujutiste võrdlemisel tuleb arvesse võtta, et võrreldavad objektid erinevad meetodika ja lahutusühiku alusel.



Joonis 21. Alusmetsasuse (A), Karttapullautin (B) ja vahe kujutis (C) uurimisala 465x näitel.

Karttapullautini kasutamise korral on oluline määrata optimaalsed seaded, nagu on ka tarkvara autor rõhutanud. Antud analüüsis kasutati võrdluseks vaikumisi seadetega koostatud kujutisi, mistõttu on tähelepanuväärne alusmetsasuse ja orienteerumiskaardi sarnasused. Karttapullautini läbitavuse määramine viiakse läbi ALSi punktide loendamise, väärtuste andmise ja summeerimise kaudu. Seetõttu on asjakohaste kõrgusvahemike ja punktide väärtuste määramine äärmiselt oluline, et saada objektiivset läbitavuse tulemust. Karttapullautini seadete määramine ehk kalibreerimine tähendab lisanduvaid välitöid metsa struktuuri hindamiseks või erinevate seadete proovimist. Sealjuures ei ole Karttapullautini läbitavuse kujutise klassid otseselt seotud metsa karakteristikutega, vaid tulenevad tarkvara kasutaja määratud parameetritest. Karttapullautini orienteerumiskaardid on seega pigem illustratiivse

tähendusega, mis täidavad eesmärgi orienteerumise abivahendina, kuid võivad osutada ebapiisavaks metsa struktuuri hindamisel.

Kokkuvõtvalt leiti, et alusmetsasusel on mõningad metoodilised eelised antud uurimistöös, kuid ka näitaja ulatusliku rakendamise korral. Seejuures ei ole välistatud, et Karttapullautini kasutamine täpsete parameetritega võib anda häid tulemusi, kuid parameetrite määramise otstarbekus võib osutada küsimuseks.

3.6. Vigade analüüs

Wing *et al.* on 2012. aasta uurimuses rõhutanud, et prooviala ebatäpne asukoht võib olla metsa käsitlevate analüüside puhul peamine vigade tekkepõhjus. Antud töös lähtuti prooviala asukoha määramisel teadmisest, et GNSS-käsitõlmega on metsas võimalik saavutada umbes kuni 7-meetrine asukoha täpsus. On võimalik, et pilvised ilmaolud, positsioneerimissatelliitide ebahühtlane asetus või tihe võrastik mõjutasid asukoha määramise täpsust nii palju, et proovialade asukohad metsas ja alusmetsasuse kujutistel ei ühti täielikult. Seetõttu võib proovialade valimis esineda kohti, mille alusmetsasuse väärtused ja hindelised tunnused ei iseloomusta täpselt sama kohta. Proovialade täpsema asukoha määramiseks on võimalik kasutada kaheageduslikku geodeetilist GNSS-seadet.

Samuti võisid vead tekkida ka proovialade tunnuste hindamisel. Uurimistöös oli oluline osa välitööde andmetel ja seetõttu eeskätt eksperthinnangul. Erinevalt alusmetsa tiheduse hinnangust, mida oli lihtsaim hinnata, võis läbitavuse ja nähtavuse määramisel esineda metoodilisi ebatäpsusi. Läbitavus ja nähtavus on alusmetsa tihedusest tuletatud tunnused, mistõttu võis tunnuste hindamise metoodika osutada liiga üldiseks. Läbitavus ja nähtavus metsas on tõenäoliselt lisaks alusmetsa tihedusele mõjutatud ka teistest taimestikute teguritest, mis lidar-andmetes ei kajastu.

Analüüsi määramatust ja vigu võis põhjustada ka lidar-andmete vähene detailsus. Kasutatud lidar-andmete tihedus varieerus vahemikus 0,4–0,6 p/m² ning keskmine punktide vaheline kaugus oli vahemikus 1,2–1,5 m. Seega pidi mõõdistatud objekt olema piisavalt suur või sattuma täpselt lidari trajektoorile, et impulss seda tabaks. Uurimistöös kasutatud näitaja puhul võis antud punktipilve tihedus olla piisav, aga detailsemate hinnangute puhul tuleks kasutada suurema tihedusega punktipilvi.

Kokkuvõte

Uurimistöö eesmärk oli Lõuna-Eestile iseloomuliku segametsa jalgsi läbitavuse hindamine aerolaserskaneerimise andmete põhjal. Metsade läbitavuse informatsioon on vajalik orienteerumisspordis, kuid ka relvajõudude tegevuste planeerimisel, kus seda veel rakendatud pole. Seetõttu sooviti antud töö raames välja töötada lausaline metsade läbitavuse hindamise metoodika.

Töös kasutati aerolaserskaneerimise andmete põhjal leitud alusmetsa kirjeldavat näitajat ehk alusmetsasust, et määrata metsade jalgsi läbitavus ning nähtavus kaugseireliselt. Arvutusliku alusmetsasuse statistiliste seoste kontrollimiseks kasutati välitöödel kogutud proovialade andmeid. Alusmetsa struktuuri, jalgsi läbitavuse ja nähtavuse hindamiseks kasutati kvalitatiivset eksperthinnangut.

Välitööde käigus kogutud proovialade andmete põhjal saab väita, et uurimisaladel esines rohkem tiheda kui hõreda alusmetsaga metsasid, kus läbitavus ja nähtavus olid piiratud. Kesiste läbitavuse ja nähtavuse tingimustega paistsid silma noorendiku või latimetsa arenguklassis olevad kuusikud. Lisaks kinnitati teoreetilist lähtekohta, et hästi liitunud ja päikesevalgust tugevalt varjava esimese rinde võrastiku all esineb vähem alusmetsa taimestikku.

Alusmetsasuse ning läbitavuse ja nähtavuse vahel esines statistiliselt tugev seos. Kõige tugevam oli seos alusmetsasuse ja läbitavuse, kõige nõrgem alusmetsasuse ja nähtavuse vahel. Alusmetsasuse kontrollimiseks valitud alusmetsa struktuuri hinnang oli samuti arvutusliku näitajaga tugevas seoses.

Aerolaserskaneerimise andmete põhjal leitud näitaja sobivust metsade läbitavuse ja nähtavuse iseloomustamiseks toetab tugev statistiline seos uuritud tunnuste vahel. Seega saab töö tulemustest järeldada, et valitud näitaja sobib läbitavuse ja nähtavuse suhteliseks hindamiseks ning seega täideti uurimistöös püstitatud eesmärk.

Töö tulemusi on võimalik kasutada metsade läbitavuse uurimise järgmistes etappides. Järgnevalt tuleks välja töötada parem meetod läbitavuse kujutiste klassifitseerimiseks. Seejärel on võimalik läbitavuse kujutisi testida otsestel kasutajatel ja anda hinnang läbitavuse informatsiooni asjakohasusele. Üle-eestiliseks andmestiku rakendamiseks tuleks läbi viia lisa välitöid ja vajadusel kalibreerida näitaja seadeid.

The assessment of foot mobility in Estonian temperate mixed forests using airborne laser scanning data

Ainar Härm

Summary

The aim of current research was to assess the foot mobility in mixed forests characteristic to South Estonia based on airborne laser scanning dataset. The information concerning foot mobility is essential for orienteering sports as well for planning movement of troops in military forces where it has not been implemented in Estonia yet. In framework of current research paper the evaluation of methodology for foot mobility assessment was set as a goal.

The index describing understory vegetation presence found on basis of airborne laser scanning to determine the forest foot mobility and visibility was used in research. Airborne laser scanning data was collected by Estonian Land Board during spring leaf-off period with ALS 50-II lidar device. In order to evaluate the statistical correlation between remote sensing index and research characteristics the field sampling data was used. The understory vegetation structure, potential foot mobility and field visibility were assessed in study area sample plots as qualitative expert opinion.

Resulting from field sampling data it can be claimed that study areas were covered more with dense understory vegetation, where foot mobility and visibility were restricted. Poor foot mobility and visibility conditions were very characteristic to low spruce woods. In addition the theoretical statement of dense canopy causes sunlight shading and therefore possessing less understory vegetation was confirmed.

Strong statistical correlations were found to be present between understory vegetation index and foot mobility ($\rho=0,71-0,76$) as well visibility ($\rho=0,63-0,66$), the strongest correlation with foot mobility, the weakest with visibility. The assessment chosen as control of the structure of understory vegetation presented as well the strong correlation with calculated index.

The eligibility of index found on dataset of airborne laser scanning to characterize the forest foot mobility and visibility is supported by substantial statistic correlation between study markers. Therefore can be concluded from the results that selected index can be qualified for relative assessment of foot mobility and visibility and consequently the posed objective was accomplished.

The results of current paper can be used in further stages of researching foot mobility in forests. Subsequently a better method for classifying images of foot mobility should be elaborated. Thereafter the images of mobility could be tested by direct users and the assessment given about the the relevance of information concerning foot mobility. In order to implement foot mobility assessment to nation wide dataset additional field sampling should be accomplished as well indicator settings calibrated when needed.

Tänuavaldused

Soovin avaldada tänu juhendajatele Jüri Roosaarele ja Kersti Vennikule mitmekülgse abi ja nõuannete eest. Samuti tänan Mait Langu ja Tauri Arumäed metsandusalaste nõuannete eest. Viimaseks soovin tänada lähedasi igakülgse abi eest töö kirjutamise perioodil.

Kasutatud kirjandus

- Anniste, J., Viilup, Ü., 2011. Metsa takseertunnuste määramisest laserskannerimise abil. Luua Metsanduskool. Artiklid ja uurimused, 10, lk 38-53.
- Arumäe, T., Lang, M., 2013. Puistu esimese rinde võrastiku alguse kõrguse. Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 58, lk 46-56.
- Birkel, P. A., 2003. Terrain Trafficability in Modeling and Simulation. Technical Paper SEDRIS 2003-1, The MITRE Corporation, pp. 1-40
- EOL – Eesti Orienteerumisiit. Orienteerumiskaardid. <http://orienteerumine.ee/kaart/index.php> (09.03.2016).
- ESRI – Environmental Systems Research Institute, I. What is lidar data? <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm> (08.03.2017).
- Fleming, S., Jordan, T., Madden, M., Usery E. L., Welch R., 2009. GIS applications for military operations in coastal zones. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, pp. 213-222.
- Goodwin, N. R., Coops, N. C., Bater, C., Gergel, S. E., 2007. Assessment of Sub-Canopy Structure in a Complex Coniferous Forest. IAPRS, 36 (3), pp. 169-172.
- Grünthal, E., 2013. Rannaprotsesside monitooring aerolaserskaneerimise korduvmõõtmistest. Tallinna Tehnika Ülikool.
- Heritage, G., Large, A., 2009. Laser Scanning for the Environmental Sciences. Wiley-Blackwell.
- Hill, R. A., Broughton, R. K. 2009. Mapping the understory of deciduous woodland from leaf-on and leaf-off LiDAR data: A case study in lowland Britain. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, pp. 223-233.
- Hirv, E., 2013. Topograafilistel kaartidel kajastatud reljeef LiDARi andmestiku võrdluses. Tartu Ülikool.

Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B., 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment*, 82 (2), pp. 295-308.

HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1990. FM 5-33 Terrain Analysis. Department of the Army: Washington, DC.

HQDA – Headquarters, Department of the Army, 1990. FM 3-25.26 Map Reading and Land Navigation. Department of the Army: Washington, DC.

IOF – International Orienteering Federation, 2000. International Specification for Orienteering Maps.

Isenburg, M. Density and Spacing of LiDAR. <http://rapidlasso.com/2014/03/20/density-and-spacing-of-lidar/> (08.03.014).

Jakubowski, M. K., Qinghua, G., Kelly, M., 2013. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 130, pp. 245-253.

Kalm, K., Oras, M., 2010. Selgise 2010004. 1:15 000

Karm, M., 2015. Orienteerumiskaardi tootmise optimeerimine LiDAR-i ja topograafilisi andmeid kasutades. Tartu Ülikool.

Lang, M., 2010. Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt laserskanneriga. *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 52, lk 5-17.

Lang, M., 2013. A simple method for mapping woody plant cover in agricultural fields using airborne lidar. *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 58, pp. 5-11.

Lang, M., Arumäe, T., Lükk, T., Sims, A., (2014). Estimation of standing wood volume and species composition in managed nemoral multi-layer mixed forests by using nearest neighbour classifier, multispectral satellite images and airborne lidar data. *Forestry Studies*, 61, pp 47-68.

Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J., 2012. Lennukilidari ja spektraalse kaugseireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal. *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 56, lk 27-41.

Leeuwen, M., Nieuwenhuis M., 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 4, pp. 749-770.

Lõhmus, E. 1984. Eesti metsakasvukohatüübid. Tallinn.

Maa-amet. Lidar kõrguspunktid. <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/LiDAR-korguspunktid-p499.html>

(24.04.2017)

Martinuzzi, S., Vierling, L. A., Gould, W. A., Falkowski, M. J., Evans, J. S., Hudak, A. T., Vierling, K. T. 2009. Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife. *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 2533-2546.

MOD – Ministry of Defence, 2001. Army Field Manual. Volume 2. Operations on specific Environments. Part 6. Operations in woods and forests.

Meyer M. P., Ehrlich, R. I., Sloss, D., Murrphy, N. R., Wismer R. D., Czake, T., 1977. International Society for Terrain-Vehicle Systems Standards. *Journal of Terramechanics*, 14, pp. 153-182.

Morsdorf, F., Marell, A., Koetz, B., Cassagne, N., Pimont, F., Rigolot, E., Allgöwer, B., 2010. Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information from airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 1403-1415.

Männa, M., 2016. Läheneissuundade automaattuvastus sõjaväelise maastikuanalüüsi kontekstis. Tartu Ülikool.

Olvet, M., 2014. Joostavuse määramise kaused meetodid orienteerumiskaardi näitel. Tartu Ülikool.

Optech, T. Optech Titan. <http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/titan/> (07.03.2017).

Park, W., Kim, D., Le, H., 2013. Terrain Trafficability Analysis for Autonomous Navigation. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 11 (2), pp. 354-361.

Peterson, U., Liira, J., Püssa, K., 2008. Metsaga alade ning lageraiete ja nendega sarnaste häiringute kaugseire. *Kaugseire Eestis*, lk 48-66.

Rebo, E. 2016. Lõuna-Eesti maastik sõdib meie poolel. *Sõdur*, 90, 9-15.

Rybanský, M., 2009. Cross-country movement, The impact and evaluation of geographical factors.

Ryypö, J. Karttapullautin. Allikas: <http://www.routegadget.net/karttapullautin/> (24.04.2017).

- Ryppo, J. 2013. Karttapullautin vegetation mapping guide. Karttapullautin documentation.
- Shoop, S.A., Richmond, P.W., Lacombe, J. 2006. Overview of cold regions mobility modeling at. *Journal of Terramechanics*, 43, pp. 1-26.
- Sivertun, Å., Gumos, A., 2006. Analysis of Cross Country Trafficability. *Progress in Spatial Data Handling*, pp. 921-941.
- Zellweger, F., Morsdorf, F., Purves, R. S., Braunisch, V., Bollmann, K., 2013. Improved methods for measuring forest landscape. *Biodivers Conserv*, 23, pp. 289-307.
- Zentai, L., 2009. The use of new technologies in making orienteering maps. *Scientific Journal of Orienteering*, 17, pp. 56-64.
- Wallace L. O., Lucieer, A., Watson, C. S., 2012. Assessing The Feasibility of UAV-Based Lidar for High Resolution Forest Change Detection. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, pp. 499-504.
- Vaus, M. (2004). Metsatakseerimine. Metsandusteaduskond. Tartu
- Vehmas, M., Packalen, P., Maltamo, M., 2011. Using airborne laser scanning data for detecting canopy gaps and their understory type in mature boreal forest. *Annals of Forest Science*, 68, pp. 825-835.
- Wing, B. M., Ritchie, M. W., Boston, K., Cohen, W. B., Gitelamn, A., Olsen, M. J. 2012. Prediction of understory vegetation cover with airborne lidar in an interior ponderosa. *Remote Sensing of Environment*, 124, pp. 730-741.
- Solnask, S., 2009. LiDARi kasutamine metsaaluse maapinna reljeefi kirjeldamisel. Tartu Ülikool.

Lisad

Lisa 1. Proovialade hindelised tunnused ja lidar näitaja tulemused.

ID	N_10_K	N_10	N_20	N_50	K_TAIM	K_TAKIS	K_NÄHT
1	3,50	0,41	0,16	0,19	3	3	3
2	1,06	0,04	0,05	0,04	0	0	0
3	1,25	0,03	0,02	0,05	1	0	0
4	2,50	0,17	0,14	0,07	2	1	2
5	3,50	0,38	0,57	0,42	3	3	3
6	4,00	0,50	0,45	0,48	3	3	3
7	2,50	0,21	0,19	0,23	2	2	3
8	1,50	0,11	0,12	0,09	2	1	2
9	1,00	0,05	0,05	0,07	2	2	3
10	1,50	0,12	0,17	0,22	3	2	3
11	2,00	0,18	0,17	0,22	3	3	2
12	5,00	0,80	0,24	0,15	2	1	1
13	4,54	0,50	0,47	0,27	3	2	3
14	1,00	0,02	0,03	0,05	1	1	1
15	3,66	0,78	0,23	0,53	4	3	4
16	1,00	0,08	0,08	0,09	3	2	3
17	1,00	0,08	0,07	0,09	3	2	3
18	1,00	0,00	0,08	0,04	1	1	1
19	3,50	0,38	0,26	0,41	4	3	3
20	3,00	0,25	0,21	0,24	3	2	3
21	3,00	0,28	0,31	0,34	3	2	3
22	3,89	0,48	0,54	0,48	3	3	2
23	4,50	0,61	0,62	0,65	3	3	3
24	4,00	0,45	0,40	0,50	3	3	3
25	1,00	0,04	0,03	0,06	1	1	1
26	1,00	0,00	0,02	0,02	1	1	1
27	4,00	0,44	0,30	0,32	2	3	1
28	1,00	0,00	0,10	0,07	3	2	3
29	5,00	0,79	0,76	0,66	4	3	3
30	2,72	0,23	0,27	0,27	2	1	3
31	5,00	0,91	0,76	0,40	4	4	4
32	1,00	0,04	0,04	0,06	1	1	1
33	1,00	0,01	0,01	0,02	1	1	1
34	1,96	0,11	0,13	0,13	2	2	2
35	4,50	0,75	0,87	0,29	3	2	3
36	2,50	0,26	0,28	0,23	4	4	3
37	2,93	0,28	0,28	0,33	2	1	1
38	1,86	0,38	0,22	0,19	2	3	2
39	2,00	0,25	0,27	0,25	2	3	2
40	1,00	0,05	0,01	0,06	2	2	2
41	2,50	0,24	0,24	0,27	3	3	3
42	4,00	0,33	0,42	0,39	3	2	3
43	1,00	0,00	0,00	0,05	1	1	2
44	3,97	0,19	0,22	0,33	3	3	3
45	2,00	0,12	0,19	0,19	2	1	2
46	4,00	0,40	0,35	0,31	2	2	3
47	1,17	0,06	0,02	0,09	2	2	3
48	1,00	0,00	0,03	0,02	1	1	0
49	3,00	0,19	0,45	0,21	2	2	3
50	1,00	0,11	0,05	0,19	1	0	1

Järg lisale 1.

ID	N_10_K	N_10	N_20	N_50	K_TAIM	K_TAKIS	K_NÄHT
51	1,00	0,00	0,00	0,08	0	0	0
52	1,00	0,00	0,00	0,01	1	0	1
53	1,54	0,44	0,29	0,15	3	2	3
54	1,00	0,00	0,00	0,08	0	0	0
55	1,17	0,05	0,04	0,16	2	2	2
56	1,97	0,01	0,05	0,05	1	1	1
57	2,00	0,11	0,13	0,08	2	2	2
58	3,50	0,29	0,31	0,16	2	2	3
59	3,97	0,28	0,28	0,30	1	3	2
60	3,00	0,29	0,33	0,35	3	3	3
61	1,00	0,03	0,06	0,03	3	2	2
62	3,17	0,32	0,27	0,41	3	3	3
63	1,74	0,09	0,29	0,18	1	1	1
64	1,66	0,10	0,05	0,08	1	1	0
65	1,00	0,01	0,03	0,03	0	0	1
66	3,00	0,17	0,14	0,17	3	2	2
67	1,00	0,29	0,37	0,37	3	3	2
68	4,61	0,72	0,37	0,44	4	3	4
69	2,00	0,18	0,30	0,37	4	3	3

Lisa 2. Kalibreerimisalade lidar näitaja väärtused alusmetsa tiheduse klasside järgi.

klass	keskmine	standard- hälve	standard- viga	keskmine - standarviga	keskmine + standardviga	keskmine - standardhälve	keskmine + standardhälve
0	0,04						
1	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00	0,04
2	0,27	0,25	0,09	0,18	0,35	0,02	0,51
3	0,34	0,22	0,06	0,28	0,39	0,12	0,56
4	0,63	0,28	0,13	0,50	0,75	0,34	0,91

Lisa 3. Taimestiku mõju taktikalisele tegevusele sõltuvalt metsa tüübist (MOD 2001) – allikas täiendatud.

Metsa tüüp	Puude vahe	Diameeter, 1,3 m kõrguselt	Puude kõrgus	Mõju taktikalisele tegevusele
Raiesmik, puukool	1–2 m	-	0,3–1,5 m	Soostuv pinnas, okasrisu takistab jalgsi liikumist; roomikmasinate liikumine vaba, ratasmasinaid takistavad kändud, segipööratud maapind.
Noorendik	1–2 m	3–10 cm	1,5–10 m	Kõige tihedam metsa tüüp, nähtavus kuni 2 m; otsetule ulatus kuni 50 m; vajalik raiuda laskekoridorid; jalaväe liikumine väga raske; masinate liikumist pidurdab piiratud nähtavus.
Latimets	2–3 m	10–20 cm	10–17 m	Sõltuvalt alustaimestiku olemasolust nähtavus tugevasti piiratud: 50–100 m, jalaväe liikumine pole piiratud; masinate liikumine piiratud.
Küps mets	3–4 m	20–30 cm	15–25 m	Nähtavus 150–200 m; otsetule ulatus kuni 100 m metsa sisse; jalaväe liikumine pole piiratud; masinate liikumist takistavad maha kukkunud puude kuhjatised.
Vana mets	4–8 m	Üle 30 cm	20–30 m	Alustaimestiku puudumisel nähtavus 200–300 m, efektiivne otsetule ulatus 120 m, jalaväe ja masinate liikumine pole piiratud.

Lisa 4. Hinnanguliste tunnuste näited.



Prooviala nr 3
K_TAIM: 1
(alusmets hõre)
K_TAKIS: 0
(läbitavus takistuseta)
K_NÄHT: 0
(nähtavus kaugel)



Prooviala nr 8
K_TAIM: 2
(alusmets mõõdukas)
K_TAKIS: 1
(läbitavus lihtne)
K_NÄHT: 2
(nähtavus piiratud)



Prooviala nr 69
K_TAIM: 4
(alusmets väga tihe)
K_TAKIS: 3
(läbitavus raske)
K_NÄHT: 3
(nähtavus lähedane)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Ainar Härm,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Metsa jalgsi läbitavuse hindamine aerolaserskaneerimise andmete alusel“, mille juhendajad on Jüri Roosaare ja Kersti Vennik,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace´i kaudu kuni 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.

Tartus, 29.05.2017