

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

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias 30 EAP

Võsastunud ala läbitavus jalgsi liikuja näitel

Mart Randmäe

Juhendaja: prof. Tõnu Oja

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: /allkiri, kuupäev/

Osakonna juhataja: /allkiri, kuupäev/

Tartu 2016

Võsastunud ala läbitavus jalgsi liikuja näitel

Maastiku läbitavus on oluline mitmete valdkondade seas, kuid selle kaardistamine on aeganõudev ja nõuab ebatäpsete automatiseeritud meetodikate tõttu kaardistaja poolt läbiviidavaid välitöid. Kõige kiiremini ja enim muutuv läbitavust mõjutav tegur on taimestik. Töö käigus leiti aero LiDARi andmete põhjal lihtne kvantitatiivne läbitavusindeks, mis arvestab ainult võsa tihedust ja kõrgust. Lõplik läbitavuse rasterkaart edastab kolm läbitavusklassi: lage/hästi läbitav ala, keskmiselt läbitav ala ja raskesti läbitav ala. Leitud indeksi kontrollimiseks reaalsusega leiti kuuel Tartu linna ümbruses asuval katsealal katsealuste liikumiskiiruste aeglustumine ja võrreldi seda keskmise läbitavusindeksiga 100 meetri pikkusel teekonnalõigul. Antud meetodikaga leitud lihtne läbitavusindeks ei suutnud kõiki kuute katseala üheselt kirjeldada. Peamiseks põhjuseks puudulik info kõrgemate puude ja võsa all olevast taimestikust, mis põhjustas läbitavusindeksi ala- või ülehindamise.

Aero LiDAR, taimestiku katvus, alustaimestik, võsastunud ala, maastiku läbitavus

T181 Kaugseire

Permeability of overgrown areas by foot travelers

Current thesis concentrates on finding out the possibility to find a simple method to estimate permeability of overgrown areas using airborne LiDAR data. Unclassified airborne LiDAR data was used to calculate simple permeability index that showed brush permeability only on the basis of canopy height and canopy cover. The final permeability map had 3 permeability classes: treeless areas/areas with good permeability, areas with average permeability and areas with rough permeability. To verify the validity of the method with reality the speed reduction of respondent permeability in brush was compared to calculated permeability indicator data from six test areas that were located around the city of Tartu. No correlation between slowdown coefficient and permeability index was detected. The main reason was that there was no data from underneath of high canopy and for that reason the permeability index was under- or overestimated.

Airborne LiDAR, canopy cover, understory, overgrown area, landscape permeability

T181 Remote sensing

Sisukord

SISSEJUHATUS.....	5
1 TEORIA.....	7
1.1 KASUTATAVAD VÕSA MÕISTED.....	7
1.2 LÄBITAVUSE KÄSITLUS.....	8
1.3 LIDARI TÖÖ PÕHIMÕTE.....	8
1.4 PEEGELDUSTE REGISTREERIMINE.....	10
1.5 LIDARI ANDMETE PUUDUSED TAIMESTIKU KATVUSE HINDAMISEL.....	10
2 MATERJAL JA MEETODID.....	12
2.1 KATSEALAD.....	12
2.1.1 <i>Annelinn</i>	13
2.1.2 <i>Hiinalinn</i>	13
2.1.3 <i>Raadi lennuväli</i>	14
2.1.4 <i>Vahi</i>	14
2.1.5 <i>Tähtvere</i>	14
2.1.6 <i>Soinaste</i>	14
2.2 LIDAR- JA LÄBITAVUSE KIIRUSE ANDMED.....	15
2.3 ANDMETÖÖTLUS.....	16
2.3.1 <i>LIDARi andmed</i>	16
2.3.2 <i>Läbitavuskiiruse andmed</i>	18
2.4 ANDMEANALÜÜS.....	19
3 TULEMUSED JA ARUTELU.....	20
3.1 RADADE JA KATSEISIKUTE ÜLDISELOOMUSTUS.....	20
3.2 LÄBITAVUSINDEKSI JA LÄBIMISKIIRUSE VAHELINE SEOS.....	22
3.3 KATSEALADE PÕHINE LÄBITAVUSINDEKSI JA LÄBIMISKIIRUSE VAHELINE SEOS.....	23
3.3.1 <i>Annelinn</i>	23
3.3.2 <i>Hiinalinn</i>	25
3.3.3 <i>Raadi lennuväli</i>	26
3.3.4 <i>Vahi</i>	30
3.3.5 <i>Tähtvere</i>	32
3.3.6 <i>Soinaste</i>	34
4 JÄRELDUSED.....	36
KOKKUVÕTE.....	39
SUMMARY.....	41

TÄNUAVALDUSED	42
KIRJANDUS	43
LISAD	47

Sissejuhatus

Looduses liikujad teavad, et maastiku läbitavus sõltub paljudest asjaoludest: reljeefist, pinnase tüübist, taimestikust, erinevate takistuste kulgemisest (veekogud, aiad) jne. Eriti oluline on selline maastiku läbitavuse info valdkondades, kus tegutsetakse igapäevaselt looduses, näiteks militaarvaldkond, päästeteenistus, metsandus või tegeldakse spordialadega, kus selline teadmine on oluline. Palju abi oleks kaartidest, mis aitaks teekonda planeerida lähtudes maastiku läbitavuse andmetest. Metsa läbitavuse kaardistamine on siiani kõige aeganõudvam töö kaardistamisel, sest puudub piisavalt usaldusväärne automatiseeritud meetod, mis suudaks asendada välitöid (OGAD AG 2012).

Üheks läbitavuse esitamise näiteks on orienteerumiskaardid, mis esitavad maastiku joostavust 4 klassiga: hästi joostav, aeglaselt joostav, raskesti joostav ja väga raskesti joostav mets. See annab orienteerujale võimaluse teha valikuid, kas minna kergemini läbitavaid ja enamasti pikema distantliga marsruute mööda või valida lühemad, kuid raskemini läbitavad teekonnad. Maastik muutub ajas ning kiireimaks muutujaks maastikul on taimestik. Kuid välitööde töömahu tõttu ei jõuta kogu aeg kõiki kaarte uuendada. Seega oleks vaja leida meetod, mis aitaks välitööde osakaalu vähendada. OGAD AG (2012) on toonud välja orienteerumiskaartide läbitavuse leidmise lihtsustamiseks laserskaneerimise meetodi kiire arenemise, mis võiks ühel päeval välitööd asendada.

Tänapäeval on juba olemas programmid, mis kasutavad LiDAR tehnoloogia andmeid, et tuletada maastiku läbitavust taimkatte alusel, näiteks soomlase Jarkko Ryyppö (s.a.) loodud rakendus Karttapullautin. Programm koostab automatiseeritud meetodiga orienteerumiskaardi laadse toote, sest kujutab vaid joostavust, reljeefi ja kalju kujutisi. Karm (2015) ja Olvet (2014) leidsid, et antud programm ei ole kõige usaldusväärsem orienteerumiskaartide tootmiseks, kuid sobiks harjutuskaartide koostamiseks. Programm võib alahinnata hästi joostavate metsade joostavust. See võib juhtuda, kui on tegu näiteks hõreda männimetsaga, kus LiDARi maapinnapunkte salvestatakse rohkem kui tihedas metsas. See aga tekitab eksliku mulje programmile, et tegu on tiheda taimestikulisel metsaga. (Olvet 2014)

Käesolevas magistritöös uuritakse jalgsi liikuja näitel, kas aerolidarandmete alusel on võimalik hinnata võsastunud ala läbitavust.

Töö eesmärgiks on leida:

1. kas aerolaserskaneerimise andmete põhjal on võimalik leida lihtne kvantitatiivne näitaja võsastunud ala kohta, mis iseloomustab selle ala läbitavust jalgsi liikuja jaoks;
2. kas leitud kvantitatiivne näitaja vastab uurimisalade tegelikkusele.

1 Teooria

1.1 Kasutatavad võsa mõisted

Eesti keeles on enim kasutusel kaks mõistet: „võsa“ (ingl k. *bosk, brush, brushwood, coppice, copse* (Vahar 2010; Reinas 2002) ja „põõsastik“ (ingl k. *shrub* (Vahar 2010; Reinas 2002; Rautiainen et al. 2011)) või „põõsarinne“. Eesti Keele Instituut (2016) seletab võsa kui „kasutamata rohumaale, raiesmikule või mujale tekkiv peente tüvedega eeskätt lehtpuude noorendik või põõsastik“. Samas põõsastiku seletus puudub. Viktor Masing (1992) on defineerinud võsa järgnevalt: „jäätmaale, metsata metsamaale, kraavikaldaile või mujale tekkiv lühiealine järgkooslus, milles domineerivad madalad lehtpuud (paju, sookask, hall lepp) ja põõsad“. Põõsarinne – „põõsaist koosnev rinne taimekoosluses. Põõsarinne on hästi arenenud hõreda puurinde korral (näiteks salu- ja madalsoometsas). Põõsarinde kõrgus on harilikult 1-4 meetrit.“ (Masing, 1992) Maa-ameti 2009. aasta Eesti topograafia andmekogu (ETAK) reaalsusmudeli põõsastiku definitsiooni järgi on põõsastik „vähemalt 50% ulatuses põõsastega kaetud ala, kus puude esinemise korral puuvõrade liituvus on alla 30%“. Mõistet võsa ei kasutata. Metsa korraldamise juhend (2015) käsitleb ainult mõistet „põõsarinne“, mida võidakse vajadusel kirjeldada eraldi rindena ning mille hulka loetakse ka alusmets. Inglisekeelse alusmetsa mõistena on kasutatud sõna *understory* (Lang 2010; Alexander et al. 2013, Pisek et al. 2014). Rautiainen et al. (2011) toovad välja, et alusmets koosneb veel omaette kihtidest, näiteks puude järelkasv, põõsastik, rohu ja puhmavöönd ning samblad ja samblikud, mille liigiline koosseis ja maapinna katvus muutuvad pidevalt ajas. Eestis määratakse põõsarinde kirjeldamisel valitsev põõsa- või puuliik, rinde keskmine kõrgus ja liitus (Metsa korraldamise juhend 2015).

Võrade liitust (*tree canopy cover*) käsitletakse suhtarvuna, mis näitab mitu protsenti maapinnast katab võrade projektsioon maapinnal. Kasutatakse vähetootliku ja alusmetsa tiheduse määramisel. (Metsa korraldamise juhend 2015) Võrade liituse leidmise üheks võimaluseks on maapealne Cajanuse toru kasutamine, kus tehakse punktvaatlusi. Positiivsete ehk puuvõrasid tuvastanud vaatluste arv jagatuna lugemite koguarvuga edastab puuvõrade katvuse (crown cover) hinnangut (Lang 2010). Mõistus jt. (2014) toovad esile, et lisaks võib veel kasutada ka poolsfääriliste põhjal katvuse arvutamist ning taimkatte analüsaatorit, nt LAI-2000, kuid nende meetoditega saab leida ainult lokaalset katvushinnangut.

Põllumaade võsastumine on järkjärguline protsess ning võsastumise tulemusel kujuneb lõpuks püsikooslus. Eesti loodusoludes on selleks enamasti okaspuuenamusega mets. (Masing 1992) Eestis loetakse metsamaaks vähemalt 0,1 hektari suurust ala, millel kasvavad puittaimed on 1,3 meetri kõrgused ning nende võrade liitus on vähemalt 30% (Metsa korraldamise juhend 2015).

1.2 Läbitavuse käsitlus

Orienteerumiskaartidel käsitletav joostavus edastab kaardistaja nägemust jooksmiskiirusest alustaimestikku ja alusmetsa tihedusest sõltuvalt. Läbitavuse kaardistamisel ei võeta arvesse teisi faktoreid, mille jaoks on olemas eraldi leppemärgid, näiteks pinnase soostumist, kivisust, reljeefi ja muud sellist. Joostavus eristatakse kaardil värvidega, kus lagedad alad märgistatakse kollasega, hästi joostav mets tähistatakse valgega ning rohelisega metsa või alusmetsa läbitavus (mida tumedam värv või tihedam muster, seda raskemini läbitavam). (International Orienteering Federation 2000)

Säästva linnaplaneerimise käsitluses kasutatakse mõistet „*walkability*“ (paralleelselt kasutatakse ka mõisteid *proximity*, *accessibility* ja *suitability*), mida võib tõlkida otse, et kui kõnnitav on mingi marsruut/tänav või mõista kui läbitavust (Gilderbloom et al. 2015, Duncan et al. 2011). *Walkability* näitab erinevate indikaatorite abil, kui kõndimissõbralik või inimsõbralik on mingi piirkond. Indikaatoriteks võivad olla nii tänavate ühendatavus, maakasutus, asustustihedus, taimkatte rohkus, hoonete rohkus, juurdepääs eri hoonetele ja aladele, läbinähtavus jne. *Walkability* üheks kaardistamise võimaluseks on liikluskiiruse monitooring (ingl k. *Traffic Speed Monitoring*). Sellise kaardistuse tulemuseks on kaardid, mis näitavad eri aegadel sama meetodika alusel sama marsruudi läbimise ulatust etteantud aja jooksul. Eestis on sellist meetodikat kajastanud Imre Antso (2009) oma magistritöös. Töös kasutati Stratum OÜ (2003) loodud meetodikat ja nende poolt kogutud andmeid Tallinna linna kohta.

1.3 LiDARi töö põhimõte

LiDAR (ingl k *Light Detection And Ranging*) või laserskanner on aktiivne kaugseiremeetod, kus mõõdetakse laserimpulsi teekonna aega, mis kulub laserist objektini ja tagasi sensorile jõudmiseks (Jensen 2009). Kuna laserimpulss liigub valguse kiirusel ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$), siis

impulsi teekonna aeg (t) on seletatav valemiga:

$$t = 2 \frac{R}{c},$$

Valem 1. Ajavahemiku t leidmine, kus R on kaugus ja c valgusekiiruse konstant.

kus R on kaugus LiDARi sensori ja objekti vahel. Kaugus lennuki ja objekti vahel on eelnevast valemist tuletatav järgneval kujul:

$$R = \frac{1}{2}tc.$$

Valem 2. Kauguse R leidmine, kus t on ajavahemik ja c on valguse kiiruse konstant.

Omassa *et al* (2008) on leidnud, et laserskaneerimine on üks täpsemaid meetodeid kolmemõõtmelisteks mõõdistusteks. Laserskaneerimise tehnoloogias eristatakse kahte tüüpi skaneerimist: aerolaserskaneerimist (*Aero Laser Scanning* - ALS) ja maapealset skaneerimist (*Terrestrial Laser Scanning* - TLS). Aerolaserskaneeringuid teostatakse lennukite või helikopterite pealt. Täpseid kõrgusandmeid saab LiDAR meetodil vaid siis, kui on teada lennukivahendi asukoht õhus hetkel, millal laserimpulss välja saadetakse. Lennuki asukoht saadakse läbi DGPSi (ingl k *Differential Global Positioning System*) x -, y - ja z -koordinaatides, IMU-seadmega (ingl k *Inertial Measurement Unit*) sensori nurga väärtuste mõõtmiseks maapinna suhtes κ -, γ - ja φ - telgede suhtes. (Jensen, 2009)

Aerolaserskaneerimise tulemusel saadud ruumilised koordinaadid arvutatakse kolme komponendi alusel: LiDARi sensorist, lennukil olevalt IMUst ning DGPSist. Sensorist saadakse info laserimpulsi nurkade ja kauguste kohta, IMUst lennuki kiirendusvektorid (κ , γ ja φ) ja kaldenurgad ning DGPSist geodeetilised koordinaadid WGS84 süsteemis. Enne andmete konverteerimist WGS84 ellipsoidile korrigeeritakse andmed DGPSi andmete ja IMUst saadud lennuki kallete abil. Mõõdistamisel lendab lennuk mööda etteantud lennutrajektoori ning LiDARi sensor skaneerib maapinda vastavalt seadme tüübist kas sinusoidaalselt (Z -tähe kujuliselt), ühes suunas ühelt küljelt teisele või elliptiliste ringidena. Oluline on, et skanneritava koridori keskmine osa on kõige suurema täpsusega. Tähtis on ka skaneeritavate koridoride piisav ülekattuvus, et uuritavasse maa-allas ei jääks katmata tükke. Saadava punktipilve tihedus sõltub lennu kõrgusest, kiirusest ning laserskaneerimise nurgast ja sagedusest. (Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. 2000)

Eestis kogub lidarandmeid aastast 2008 Maa-amet (Maa-amet 2015). Nende kasutuses on LiDAR seade Leica ALS50-II, mille sensor skaneerib maapinda sinusoidaalselt (Z-tähe kujuliselt) (Metsur 2012). Eestis on teostatud skaneerimist kolmel kõrgusel: tiheasustusega aladel 1300 - 1500 meetri kõrguselt, kaardistusotstarbel 2400 meetri kõrguselt ning põllumajanduse ja metsanduse otstarbel 3800 meetri kõrguselt. Eesti laserpunktide asukoht on arvutatud L-EST'97 süsteemis, Punktide kõrgused on BK77 süsteemi arvutatud kasutades geoidi mudelit EST-GEOID2003 ning alates aastast 2012 mudelit EST-GEOID2011. (Maa-amet 2015)

1.4 Peegelduste registreerimine

LiDARi „jalajälg“ ehk maale jõudnud laserimpulssi diameeter sõltub seadme kõrgusest ja nurgast, millega impulss välja saadeti. Keskmiselt on selle ringja kujuga impulssi diameeter maapinnal 30 cm (Jensen 2009). Tegelikult laserkiire diameeter suureneb vastavalt läbitud teekonna suurenemisele. Maa-ameti kasutuses oleva skanneri Leica ALS50-II puhul on punktide suurus maapinnal vastavalt kasutatavatele lennukõrgustele 33 cm, 54 cm ja 86 cm (Metsur 2012).

Laserkiirte jälg jaguneb kas üheks või mitmeks tagasipeegelduseks. Laserkiir, mis maandub ilma vahepealsete takistusteta maapinnale peegeldab tagasi ühe peegelduse. Kuid takistuste esinemisel (puud, põõsad, hein, hooned) skanneri ja maismaa vahel tekitavad väljasaadetud ühest impulsist mitu tagasipeegeldust. Neid erinevaid tagasipeegeldusi klassifitseeritakse kui peegelduste järjekorda objektidelt. (Jensen 2009) Maa-ameti kasutada olev skanner suudab registreerida kuni 4 peegeldust ühe impulssi kohta (Metsur 2012). Esimene tagasipeegeldus annab tavaliselt infot objektide ülemisest osast, näiteks puuvõra ülemisest osast. Viimane peegeldus annab tavaliselt teavet objekti kõige alumisest osast, näiteks maapinnalt. Vahepealsed peegeldused annavad infot vahepealsete objektide kohta, näiteks alusmetsa või puuvõra kohta. (Jensen 2009)

1.5 LiDARi andmete puudused taimestiku katvuse hindamisel

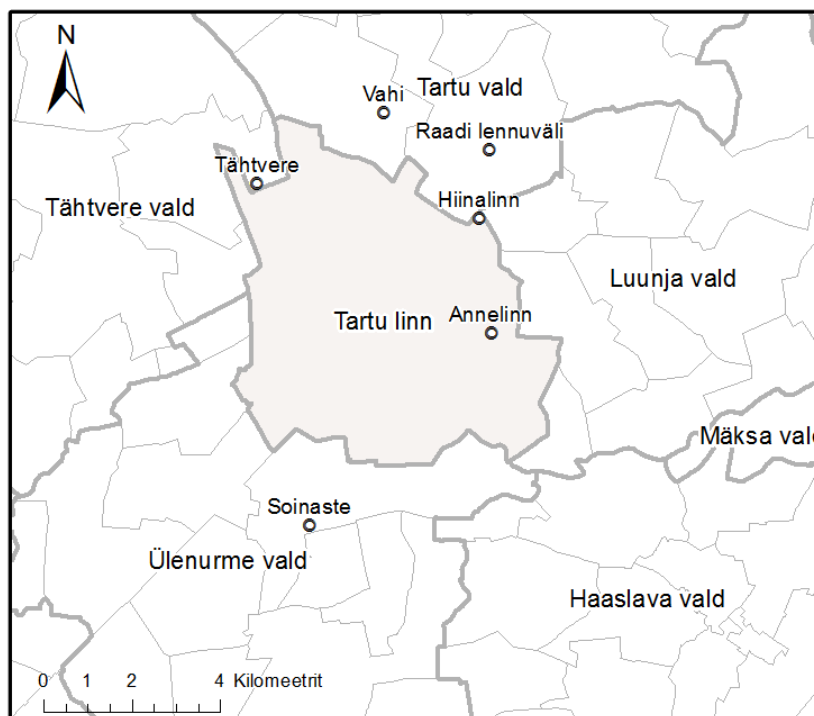
LiDARi andmete põhjal taimestiku katvuse hindamisel tuleb tähelepanu pöörata mitmete tegurite mõjule hinnangu täpsusele. Aastaaja mõju peetakse üheks enim mõjutavamaks teguriks taimkatte parameetrite hindamisel (Lang 2010; Mõistus jt. 2014; Stereńczak & Kozak 2011; Hill & Broughton 2009; Wagner et al. 2004). Peamine põhjus on laserimpulsi erinev tagasipeegeldumine lehtedelt, kus on oluline lehtede suurus, hulk ja struktuur. Lehtede

puudumine võib põhjustada puuvõra kõrguse alahindamise, sest tagasipeegeldused ei teki puuladvas olevatelt puulehtedelt, vaid võra sees olevatelt okstelt. Mõistus jt. (2014) kohaselt tuleb puittaimestiku katvuskardi loomisel arvestada kolme aspektiga: taustkõrgus (h_{\min}), piksli suurus ehk vähima vaatlusühiku suurus ja katvuse väärtus (K), millest alates määratakse piksel lagealaks, võsastunuks või metsaks. Õige taustkõrguse valik väldib kõrgemate rohundite ja põllukultuuride kaasamist katvushinnangusse. Mõistus jt. (2014) kontrollisid Eestis tausta kõrguse muutmise mõju võsakatvuse hindamisel, kus valiti kaks kõrgust: 1,3 ja 2,0 meetrit. Tulemuste erinevus kahe taustkõrguse vahel oli vaid paar protsenti, seega otsustati 2,0 meetri kasuks, et kindlalt välistada kõrge rohttaimestiku mõju katvushinnangus. Rastri mõõtmete valimisel tuleb arvestada Rautianen et al. (2005) kohaselt, et keskmiselt satuks rastri sisse 100 mõõtmispunkti, millest alates juhusliku vea piir muutub usaldusväärseks. Kui andmepunktid paiknevad hõredalt, siis tuleks valida suuremate mõõtmetega raster, et saada väiksema juhusliku veaga tulemus. Katvusindeksi puhul tuleb arvestada kohalike võsa või metsa definitsioonidega. Eesti puhul on metsa definitsioonis 30% puuvõrade liitus välja toodud, kuid Lang (2010) arvab, et tegu peaks oleme tegelikult võrade katvuse mõistega.

2 Materjal ja meetodid

2.1 Katsealad

Katsealadeks valiti sööti jäänud võsastuvad põllumaad või endised tasased looduslikud rohumaad Tartu linna ümbruses (Joonis 1). Maa-ameti kaardiserveri ortofotode ja ajalooliste kaartide visuaalse vaatluse alusel valiti kuus eri vanuses ja kooslusega võsastunud ala (Tabel 1). Katsealade asukohta (Tartu linna ümbrus) tingis esiteks uusimate lidarandmete asukoht (Lisa 1), mis esitavad kõige väiksemast ajalisest erinevusest tulenevalt kõige paremini viimast taimeistiku olukorda maastikul. Teiseks lidarandmete punktihedus, mis on tiheasustuspiirkondade lendude puhul madalamast lennukõrgusest (1300-1500 meetrit) tulenevalt tihedam (Maa-amet 2015).



Joonis 1. Katsealade asukohad tähistatud must-valgete punkidena.

Katsealade suurus varieeruvad 2,2 ha kuni 38,6 ha-ni (Tabel 1). Katsealadel esines enamasti paju (*Salix*) koos kõrgemate kaskedega (*Betula*). Erandiks olid Soinaste katseala, kus kasvasid peamiselt kased, Vahi katseala, kus kasvas ühtlane tihe pajuvõsa ning Raadi katseala, kus esines pajuvõsa kõrval ka rohkelt vanemaid haabu (*Populus tremula*).

Tabel 1. Testalade kirjeldus: testala nimi, pindala, keskpunkti koordinaadid (L-EST'97 süsteemis), peapuuliik.

Testala	Pindala (ha)	X (m)	Y (m)	Enamuspuuliik
Annelinn	12,8	6472764,47	662148,19	Kask/paju
Hiinalinn	10,3	6475354,14	661848,44	Paju
Raadi lennuväli	38,6	6476908,74	662091,77	Paju/haab
Vahi	22,5	6477742,26	659704,14	Paju
Tähtvere	2,2	6476144,09	656836,19	Paju
Soinaste	13,5	6468422,68	658032,91	Kask

2.1.1 Annelinn

Annelinna katseala asub Annelinna hoonestatud ala piiril, Lammi tee kõrval. Tegu on tasase maaga, kus kõrgus varieerub tööks saadud Maa-ameti lidarandmete alusel ühtlaselt umbes 2 meetri ulatuses. Maa-ameti kaardiserveri 1:20000 põhikaardi (kaardi viimane uuendus 2006. aastal) järgi on tegu loodusliku lagealaga, kus esineb lehtpuid ja mõned võsastunud alad. Hetkel esineb peamiselt paju- ja kasevõsa, kus näiteks ala keskel oleval lagedamal alal kasvavad lisaks üksikud noored männid (Lisa 2, pilt 1-2). Kõrgemad kasepuud ulatuvad 10-12 meetrini ning nende all on enamasti tihe pajuvõsa. Uuritavat ala läbib üks ida-lääne suunaline kraav, mis poolitab ala kaheks ning mitmed pinnasteed ja rajad, kus inimesed jalutamas käivad. Suuremate sadude ja kõrge põhjaveetaseme korral võib alale kohati koguneda seisev vesi.

2.1.2 Hiinalinn

Hiinalinna katseala asub Tartu linna, Tartu ja Luunja valla piiride ühinemiskohast lõunas oleval võsastunud alal. Maa-ameti 2006. aasta Eesti põhikaardi alusel on tegu loodusliku rohumaa, mis on lausaliselt ala lõuna ja edela osast kaetud põõsastiku ja osaliselt suuremate lehtpuudega (Lisa 4). Maapind on üldiselt tasane, kuid lidarandmete põhjal maapinnakõrgus suureneb edela- kirde suunal paari meetri ulatuses. Katseala lõunaservas jookseb lääne-ida suunaline kraav ja ida servas põhja-lõuna suunaline kraav. Suuremate sadude korral võib katseala lõunaserv muutuda kõrge pinnaseveetaseme tõttu osaliselt liigniiskeks alaks, millele viitasid ka mõningate mätaastarnade (*Carex cespitosa*) olemasolu. Välitööde läbiviimise hetkel oli ala kuiv. Katseala lõuna ja lääne osas kasvavad laiad ning kuni 4 meetri kõrgused pajupõõsad. Põhjapoolses osas esinevad kohati kuni 15-18 meetri kõrgused kased koos 2-3 meetri kõrguse pajuvõsaga (Lisa 2, pilt 4).

2.1.3 Raadi lennuväli

Raadi lennuväljal asuv katseala on endise lennuraja ja ruleerimisradade vaheline tasane ala, mis on peale lennuvälja sulgemist võsastunud (Lisa 5). Selle aja jooksul on alale kasvanud peale pajuvõsa ka haavad. Valgusnõudlikkusest ja kiirest kasvust tulenevalt on tüved alt laasunud ja nende alla pole tekkinud uut põõsarinet (Tamm, 2000) (Lisa 2, pilt 6). Maapinnakõrgus suureneb ühtlaselt katsealal loode-kagu suunal umbes 3 meetri ulatuses. Alale jäävad ka mõned kuni kolme meetri kõrgused vallid ja loode osas mõningad põhjalõuna suunalised kuni poole meetri laiused madalad umbkraavid. Tegu on pindalaliselt kõige suurema alaga (Tabel 1), kus võsa katab ala keskmise osa ning selle ümber on lage rohumaad.

2.1.4 Vahi

Vahi katseala asub endisel põllumaal, mis Maa-ameti 2006. aasta Eesti põhikaardi alusel on looduslikuks lagealaks määratud ehk ala katavad hõredalt, kuid ühtlaselt kasvavad lehtpuud. Hetkeseisuga on katseala kaetud suhteliselt tiheda ja ühtlase pajuvõsaga (Lisa 6), mis on umbes 4 meetri kõrgune ning mille vahel paiknevad mõned rohtunud lagendikud (Lisa 2, pildid 8 ja 9). Võsa ei ole puhmjas, vaid tüved on sirged ning diameetriga umbes 2-5 sentimeetrit. Tegu on tasase alaga, kus lidarandmete põhjal maapind tõuseb läänest-itta umbes 1 meetri võrra.

2.1.5 Tähtvere

Tähtvere katseala on endise põllumaa ots, mis on lastud võssa kasvada. Ala ei ole suur ning sellest tulenevalt on väga homogeense võsakasvuga (Lisa 7). Ala katab 5-6 meetri kõrgune pajuvõsa, mis on alt laasunud ning ei moodusta laiali vajunud põõsaid, mis on juba maapinnalt alates omavahel läbipõimunud (Lisa 2, pildid 9 ja 10). Samuti puudub alustaimestik pajude all, millest tulenevalt on võsa all palju vabaruumi. Tegu on pindalaliselt kõige väiksema tükiga ning reljefi mõju antud alal puudub.

2.1.6 Soinaste

Tegu on põlluotsaga, mis on hüljatud ning selle tagajärjel võsastunud (Lisa 8). Alal kasvavad enamasti kased, mis on kuni 15-16 meetri kõrgused ja paiknevad hajusalt väikeste saludena. Kased pole enamasti alt laasunud, seega ulatuvad tihedamates kohtades kaseoksad kohati omavahel kokku (Lisa 2, pildid 11 ja 12). Ida poolses otsas kasvavad kaskede vahel ka mõned

laiad pajupõõsad. Maapind langeb katsealal põhja-lõuna suunas umbes 2 meetri ulatuses, vastavalt lidarandmetele. Lagedamatel aladel esineb kohati kõrgemat alustaimestikku.

2.2 Lidar- ja läbitavuse kiiruse andmed

Aerolidari andmed uuritavate alade kohta pärinevad Maa-ameti arhiivist (andmete kasutamise leping KA-2918). Andmed telliti Eesti 1:2000 mõõtkavalise topograafilise kaardi ruudustiku alusel nii, et katseala oleks LiDARi andmetega kaetud. Aerolidari andmed on skaneeritud väikelennukilt skanneriga Leica ALS50-II, mis võimaldab registreerida kuni neli tagasipeegeldumist (Maa-amet 2015). Kõrgusandmed pärinevad 2015. aastal teostatud tiheasustusega alade (Tartu linn) lidarmõõtmistelt, kus lennukõrgus oli 1300 meetrit. (Maa-amet 2015) Sellisel kõrgusel kogutud andmed sisaldasid kõrguspunkte keskmise tihedusega 2 punkti ruutmeetri kohta.

Läbitavuse kiiruse andmed koguti katsealadelt, kus katsealustel tuli lahendada orienteerumisülesanne, läbida katsealal ideaalteekonnale võimalikult lähedane teekond. Ideaalteekonnad oli eri pikkustega, kus pikim teekond oli 911 meetrit ja lühim 150 meetrit (Tabel 2). Katsealuste teekond salvestati gpx failina, kas käsiGPS seadmega või mobiiltelefoni *Endomondo* rakenduse abil. Välitööde andmed katsealade kohta koguti aprilli kuus, kui lumi oli ära sulanud, puudus uus alustaimestik ja võsa ning puud polnud veel lehes.

Tabel 2. Katsealade ideaalteekondade pikkused meetrites.

Rajad	Pikkus
Annelinn	360
Hiinalinn	335
Raadi lennuväli	911
Vahi	420
Tähtvere	150
Soinaste	406

Katsealusteks olid 6 erinevate töövaldkondade ja orienteerumiskogemusega inimest (Tabel 3). Nende vanusevahemik jäi 20–28 aasta vahele, kellest 3 olid naissoost ja 3 meessoost (üks neis oli töö autor). Kõik katsealused said enne rajale minemist värvilise 2014. aastast pärit ortofoto (lennuaeg 10.04.2014), kuna 2015. aasta ortofoto oli pildistatud mai kuus (lennuaeg 04.05.2015), siis sellest tulenevalt olid puud ja võsa lehes ning maastiku lugemini raskemini

loetav. Ortofotol oli tähistatud alguspunkt ja lõpp-punkt, neid punkte ühendav ideaalmarsruuti tähistav sirgjoon ja ortofoto mõõtkava, mis muutus vastavalt katseala mõõtmetele (Lisad 3 kuni 8). Ideaalteekond valiti nii, et see ei läbiks ühtegi muud takistust peale võsa (vooluveekogu, vallid), mis segavad märgatavalt liikumist. Lisaks näidati stardipunktis osalejatele peamised visuaalsed orientiirid maastikul, mis ei jäänud ortofotole, kuid aitasid neil võsa sees enda asukohta määrata. Alguspunkt oli maapinnal tähistatud oranži nööri ja lõpp-punkt kollase õhupalliga, mis oli kinnitatud, nii et see oleks nähtav üle võsa. Katsealused läksid rajale ühekaupa 5 minutilise intervalliga, et vähendada üksteise mõjutamist teekonna valikul. Osalejad, kes kasutasid *Endomondo* rakendust oma teekonna salvestamiseks, said juhised, et teekonna salvestamist alustatakse alguspunkti ületamisega ning lõpetatakse 1 meetri raadiuses lõpp-punkti tähisest (kollane õhupall). Katsealad läbiti järjekorras: Annelinn, Hiinalinn, Raadi lennuväli, Vahi, Tähtvere ja Soinaste.

Tabel 3. Katsealuste pikkus meetrites ja nende enda hinnang oma orienteerumisosavuse kohta skaalal 1-5, kus 1 tähistab eelnevalt orienteerumisega kokkupuute puudumist ja 5 tähendab väga head ehk orienteerumisspordiga tegelemist.

Katsealune	Pikkus	Orienteerumisosavus
N1	1,75	4
N2	1,63	2
N3	1,68	1
M1	1,93	4
M2	1,88	4
M3	1,83	4

Katsealuste tavalise kõnnikiiruse hindamiseks paluti neil läbida 100 meetri pikkune lõik tasasel maapinnal, mida nimetati etalon teekonnaks. Antud lõik oli kaetud rohuga, puudus võsa. Katsealused läbisid antud lõigu kaks korda.

2.3 Andmetöötlus

2.3.1 LIDARi andmed

Maa-ametilt saadud LAS-formaadis aerolidari toorandmete töötlemiseks kasutati vabavara FUSION/LDV (McGaughey 2015). Andmetöötluses on lähtutud Mait Langi (2010)

metoodikast ja Pacific Northwest Research Station (2015) koostatud FUSIONI juhenditest. Esimese etapina liideti punktiparved *MergeData* abil üheks parveks, kui ühte katseala kattis mitu punktiparve. Teises etapis lõigati mooduliga *PolyClipData* punktiparvest välja need kõrguspunktid, mis jäid uurimisala sisse. Kolmandaks loodi lidarandmetest maapinna kõrgusmudel, kus esmalt mooduliga *GroundFilter* eristati eeldatavalt maapinnale jõudnud punktid. *GridSurfaceCreate* abil loodi maapinna kõrgusmudel ehk *Digital Terrain Model* (DTM) ning normaliseeritud maapinna kõrgusmudeli (nDTM) saamiseks kasutati *ClipData* moodulit, kus punktipilvest lahutati eelnevalt koostatud kõrgusmudel. Lidarandmetest statistikute leidmiseks kasutati *GridMetrics* moodulit, kus põõsastiku katvus K_1 arvutatati kasutades vaid esimest tagasipeegeldumist (P1), mis olid taustkõrgusest kõrgemal ($ht > 1$ meeter) ja peegelduste koguarvu ($P1_{total}$) suhtena:

$$K_1 = (\sum (P1_{veg} > ht) / \sum P1_{total}) * 100.$$

Puittaimestiku katvuse rasterkaardi piksli suuruseks on Lang (2013) käsitlusel mõistlik võtta 10 meetrit, sest siis jääb piisav arv peegeldusi ühe piksli sisse ning arvestades, et selliste mõõtmetega piksli puhul tuleksid üksikud puud ja põõsad esile. Sellest lähtuvalt leiti lidarandmete statistikud 10x10 meetriste pikslitena.

Katvus kui ka kõrguse andmed saadi algselt CSV failidena ning edasiseks ArcMapis kuvamiseks viidi andmed mooduliga *CSV2Grid* ASCII raster formaati. Rasteranalüüsi lihtsustamiseks klassifitseeriti tööriistaga *Raster Calculator* katvuse ja kõrguse rastervääruised ümber kolme klassi:

- läbitavusklassid võsa katvusväärtuste alusel:
 1. lage/hästi läbitav – puittaimestiku katvusindeks $K_1 < 20\%$;
 2. keskmiselt läbitav – puittaimestiku katvusindeks $20\% \leq K_1 < 50\%$;
 3. raskesti läbitav – puittaimestiku katvusindeks $K_1 \geq 50\%$.
- läbitavusklassid võsakõrguse alusel:
 1. lage/hästi läbitav – puittaimestiku keskmine kõrgus pikslis $h_v < 1$ meetrit;
 2. keskmiselt läbitav – puittaimestiku keskmine kõrgus pikslis $1 \leq h_v < 1,6$ meetrit või $h_v \geq 6$ meetrit;
 3. raskesti läbitav – puittaimestiku keskmine kõrgus pikslis $1,6 \leq h_v < 6$ meetrit.

Katvuse ja kõrguse näitajad määrati töökoostaja hinnangul, lähtudes katvushinnangute puhul Lang (2013) valitud näitajatest. Kõrgushinnangutes arvestati, et kogu taimestik, mis jääb alla 1 meetri, ei sega suurel määral inimese liikumist. Võsa millest on võimalik üle näha (1,6 meetrit) ning võsastunud ala, kus puittaimestik on üle 6 meetri ehk võsa võtab juba puu mõõtmed ja on altpoolt piisavalt laasunud, on keskmiselt läbitav. Raskesti läbitav on võsa, millest ei ole võimalik üle näha ning kõrguse tõttu pole veel tüvi alt poolt piisavalt laasunud.

Ümberklassifitseeritud rasterandmed liideti *Raster Calculator* tööriistaga, mille tulemusel saadi tervet uurimisala kattev rasterkaart. Kõrgus ja katvuskardid liideti omavahel ning tulemuseks saadi lõplik läbitavuse rasterkaart (Lisa 2), kus läbitavus on esitatud viie piksliväärtusega (2, 3, 4, 5, 6). Antud väärtused saadi järgmistest reeglitest lähtuvalt:

- lage/hästi läbitav:
 - $K_1 < 20\% + h_v < 1$ meetrit (rasterväärtus 2);
- keskmiselt läbitav:
 - $K_1 < 20\% + 1 \leq h_v > 1,6$ meetrit (rasterväärtus 3);
 - $20\% \leq K_1 < 50\% + h_v < 1$ meetrit (rasterväärtus 3)
 - $20\% \leq K_1 < 50\% + h_v \geq 6$ meetrit (rasterväärtus 4);
- raskesti läbitav:
 - $20\% \leq K_1 < 50\% + 1,6 \leq h_v > 6$ meetrit (rasterväärtus 5);
 - $K_1 \geq 50\% + 1 \leq h_v > 1,6$ meetrit (rasterväärtus 5);
 - $K_1 \geq 50\% + 1,6 \leq h_v > 6$ meetrit (rasterväärtus 6).

Katsealuste teekondade läbitavuse hindamiseks leiti keskmine läbimisindeks 100 meetri kohta. Arvesse võeti kogu pikslite arv ja nende väärtused, millega katsealuse teekonna joon lõikus. Pikslite väärtused ja arv 100 meetri kohta loendati visuaalselt ja kanti teekonna atribuuttabelisse.

2.3.2 Läbitavuskiiruse andmed

Läbitavuse kiiruse andmed 100 meetri kohta leiti kasutades vabavara GPS Utility 5.27. GPSi tööpõhimõttest tulenevalt, kus iga mingi aja järel salvestatakse koordinaadipunkt koos ajaga, polnud alati võimalik saada täpselt 100 meetri läbimise aeg. Sellest lähtuvalt valiti distantiliselt 100 meetrile kõige lähemal oleva koordinaatpunkti aeg. Läbimise kiirus teisendati m/s -ist km/h-iks.

2.4 Andmeanalüüs

Andmetöötluse käigus saadud läbitavusindeksid ja läbitavusajad koondati programmi MS Excel, kus need sorteeriti ja muudeti edasiseks kasutamiseks sobilikuks. Andmete statistiliseks analüüsiks ja visualiseerimiseks kasutati programme Statistica 8 ja MS Excel. Saamaks teada läbitavuse indeksi ja aeglustuse vahelist seost, teostati Spearmani korrelatsioon. Selleks kasutati samuti programmi Statistica 8.

Katsealuste sugude ja isikute eristamiseks omistati igale osalejale unikaalne kaheosaline kood (N1/M1), kus N tähistab naissoost isikut ja M meessoost isikut. Number tähistab isiku järjekorranumbrit. Töö koostaja indeks on M3.

Aeglustuse leidmiseks katsealuste lõikes leiti nende etalon teekonna läbimise keskmised kiirused. Etalon marsruudi keskmine läbimiskiirus jagati katsealuse 100 meetrise teekonnalõigu läbimise kiirusega. Seega aeglustamise kordaja näitab, et mitu korda aeglustus katsealuse läbimiskiirus katsealal võrreldes etalon marsruudi kiirusega.

3 Tulemused ja arutelu

3.1 Radade ja katseisikute üldiseloostus

Kuuest rajast kõige raskema läbitavusega ideaalteekond (sirgjoon ortofotol punktist A punkti B) on Tähtvere katsealal, mille keskmine läbitavusindeks on 4,5 (Tabel 4) ning kõige parema läbitavusega (2,9) on Soinaste marsruut. Kuue ideaalteekonna keskmine läbitavuse indeks on 3,8, mis on kõikide katsealuste keskmistest läbitavusindeksitest suurem, kuid erineb maksimaalselt 0,4 punkti ulatuses. See näitab, et kõik rajad koosnesid nii raskesti läbitavatest aladest kui ka kergesti läbitavatest aladest, mis tasandasid radade keskmised läbitavuse tulemused keskmiselt läbitavaks (väärtusvahemik 3-4).

Katsealune N2 valis endale keskmiselt kõige kergemad teekonnad (3,4), kus Hiinalinna läbitavusindeks 3,0 on kõige madalam ja Raadi lennuväli indeks 4,1 on kõige suurema väärtusega. Kõige raskema läbitavusega teekonnad valisid katsealused N3 ja M3, nende keskmiseks läbitavusindeksi väärtuseks on 3,7. See erineb ideaalteekonna keskmisest 0,1 punkti võrra.

Tabel 4. 100 meetriste lõikude keskmised läbitavusindeksid radade ja katsealuste lõikes, skaalal 2 kuni 6, kus 2 tähistab kergesti läbitavat ala, 3-4 keskmiselt läbitavat ala ja 5-6 raskeski läbitavat ala.

Katsealused/Rajad	Annelinn	Hiinalinn	Raadi lennuväli	Vahi	Tähtvere	Soinaste	Katsealuse keskmine
N1	3,0	3,5	4,1	2,9	4,5	3,3	3,6
N2	3,1	3,0	4,1	3,3	3,5	3,1	3,4
N3	4,2	3,1	3,9	2,9	4,5	3,5	3,7
M1	3,7	2,8	4,0	2,4	4,6	3,5	3,5
M2	3,4	2,9	4,0	2,9	4,6	3,7	3,6
M3	3,8	3,0	4,0	3,4	4,6	3,6	3,7
Ideaalteekond	3,8	3,6	3,3	4,4	4,5	2,9	3,8
Raja keskmine	3,5	3,0	4,0	3,0	4,4	3,5	
Raja miinimum	3,0	2,8	3,9	2,4	3,5	3,1	
Raja maksimum	4,2	3,5	4,1	3,4	4,6	3,7	
Haare	1,1	0,7	0,3	1,0	1,2	0,5	

Katseisikute läbikäidud radade lõikes on keskmiselt kõige paremini läbitavad Hiinalinn ja Vahi (3,0), kuid nende tulemuste haarded on vastavalt 0,7 ning 1,0 (Tabel 4). Kõige väiksema

läbitavusväärtuste varieeruvusega on Raadi lennuvälja rada, mille haare on 0,3, kuid keskmine läbitavusindeks on 4,0. Suurima ehk halvima läbitavusega on Tähtvere rada, kus raja keskmine indeks on 4,4, mis erineb ideaalteekonnast vaid 0,1 võrra. Tähtvere rajal on kõige suurem keskmiste varieeruvus (1,2).

Kõige kiirema etalonmaastiku keskmise käimiskiirusega on katsealune M2, kelle keskmine kiirus etalonmaastikul on 5,8 km/h (Tabel 5). Madalaima kiirusega on M3, kelle keskmine kiirus on etalonmaastikul 5,0. Katsealune M3 puhul esineb Soinaste rajal erind, kus tema Soinaste katseala keskmine läbimiskiirus on etalontekonna keskmisest kiirusest kiirem. Kõikide katsealuste keskmine kiirus ideaalmaastikul on 5,4 km/h, varieeruvusega 0,8.

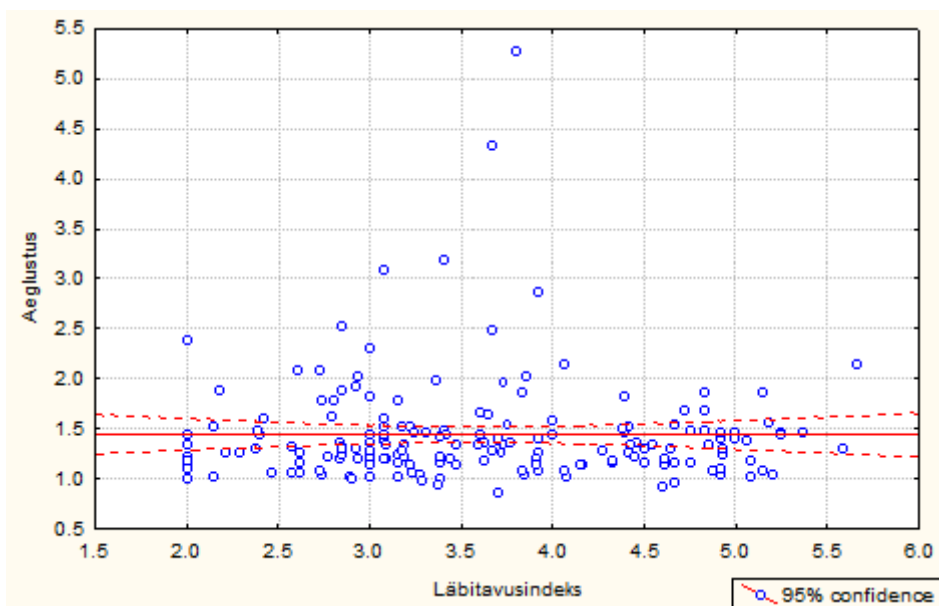
Radadest on keskmise kiireima läbimiskiirusega Soinaste, kus kiiruseks on 4,4 km/h (Tabel 5). Soinaste katseala läbimiskiirus varieerub katsealustel 1,5 ühiku ulatuses. Kõige suurema kiiruste varieerumisega (2,5) on Vahi rada, kus keskmiseks kiiruseks katsealustel on 3,3 km/h, mis on teiste radade läbimiskiirustest kõige aeglasem. Väikseima varieeruvusega on Tähtvere rada, kus haare on 0,8 ja keskmine läbimiskiirus on 4,2 km/h.

Tabel 5. 100 meetriste lõikude keskmised läbimiskiirused radade lõikes (km/h).

Katsealused/Rajad	Annelinn	Hiinalinn	Raadi lennuväli	Vahi	Tähtvere	Soinaste	Keskmine etalonkiirus
N1	4,1	3,5	3,5	2,8	4,3	4,0	5,2
N2	4,2	3,4	3,7	2,3	3,7	3,9	5,4
N3	3,6	3,4	3,4	2,4	4,6	3,8	5,4
M1	4,4	4,4	4,6	4,3	4,0	4,4	5,3
M2	5,1	5,0	4,9	4,7	4,1	5,3	5,8
M3	3,9	4,1	3,9	3,5	4,4	5,1	5,0
Keskmine liikumiskiirus	4,2	4,0	4,0	3,3	4,2	4,4	5,4
Miimum liikumiskiirus	3,6	3,4	3,4	2,3	3,7	3,8	5,0
Maksimum liikumiskiirus	5,1	5,0	4,9	4,7	4,6	5,3	5,8
Haare	1,5	1,6	1,4	2,5	0,8	1,5	0,8

3.2 Läbitavusindeksi ja läbimiskiiruse vaheline seos

Läbitavuskaardi 100m² pikslite kaupa arvatud läbitavusindeksi ja katsealuste liikumiskiiruse muutumise vahel puudub lineaarne seos. Positiivse lineaarse seose korral oleks läbitavusindeksi kasvades aeglustuse näitaja pidanud kasvama. Jooniselt 2 on näha, et sõltumata läbitavusindeksi kasvust muutus 100 meetri pikkuste teekondade kiirus enamasti katsealustel ühtemoodi.



Joonis 2. Kõikide katsealuste keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonnalõikude kohta.

Peamiselt aeglustus katsealuste kiirus proovialadel kuni 1,5 korda, kus üks tähendab, et aeglustust etalonkiiruse suhtes pole toimunud. Selline aeglustus peaks toimuma ka juba arvestades katsealustele püstitatud orienteerumisülesandest, kus neil paluti liikuda võimalikult mööda kaardil etteantud ideaalteekonda. Orienteerumisülesandest põhjustatud aeglustumise mõju võis vähendada enamuse katsealade väiksus ehk katsealusel oli kohe rajale minnes olemas kaudne lõpp-punkti suund, mida mööda liiguti ning puudus otsene vajadus oma asukohta pidevalt ortofoto põhjal määrata ja uusi orientiire valida. Seega võidi kompenseerida möödakõndimine ühtlase ja kiire tempoga maastikul.

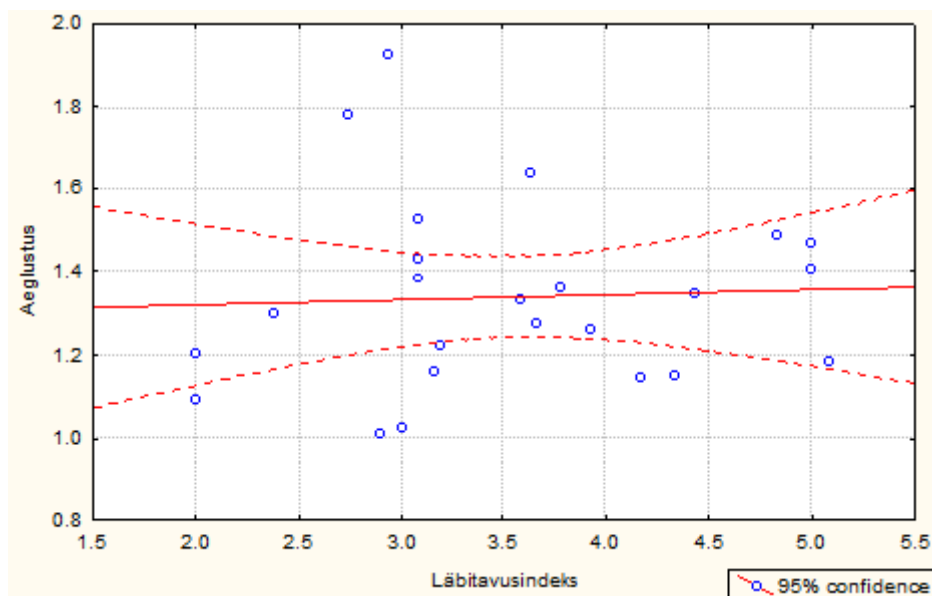
Läbitavusindeksi ja aeglustuse suhte punktiparvest võib lugeda välja mõned erandid, mis on üldisest punktiparvest eraldi (Joonis 2). Hästi tulevad esile kaks punkti, mis on võrreldes etalonkiirusega üle nelja korra aeglasema läbimiskiirusega. Mõlema puhul on tegu Raadi katsealaga, kus oli kohati väga tihe pajuvõsa, mis aeglustas tugevalt katsealuseid. Lisaks

esines mõne katsealuse puhul ka negatiivset aeglustumist ehk katsealused liikusid katsealal kiiremini, kui etalonrajal. Selline erind tuli ka andmete üldiseloomustusest välja katsealuse M3 puhul, kus tema keskmine kõndimise kiirus Soinaste katsealal oli kiiremi, kui etalonrajal.

3.3 Katsealade põhine läbitavusindeksi ja läbimiskiiruse vaheline seos

3.3.1 Annelinn

Annelinna läbitavuse indeksi ja läbimiskiiruse aeglustuse jaotus on suhteliselt hajus (Joonis 3). Aeglustumise näitaja on kõikide teelõikude puhul suurem kui 1, seega keskmisest etalonkiirusest keegi kiiremini ei liikunud. Enamus aeglustuskordajad jäävad väärtuste 1,2 ja 1,5 vahele, kui läbitavus indeks on üle 3 ehk tegu pole enam kergesti läbitava alaga. Esile kerkivad kaks erindit, kus läbitavusindeks on madal, kuid aeglustus on teistest suurem. Mõlemal juhul on tegu katsealusega N2 ning tegu on raja algusotsaga ehk esimese 200 meetriga. Jooniselt 4 on näha, et raja esimesed 200 meetrit on suhteliselt hea läbitavusega (kollane).

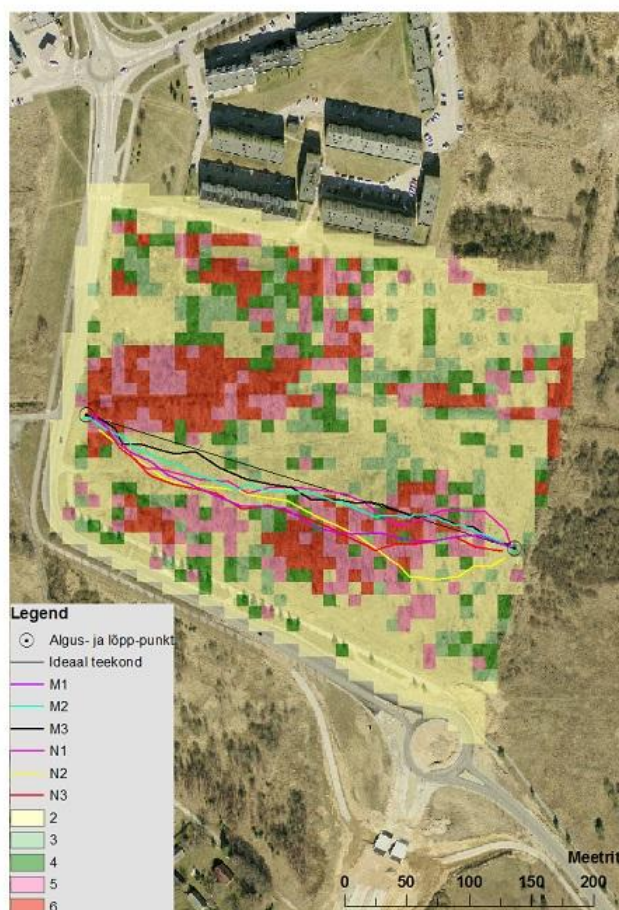


Joonis 3. Annelinna katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonna lõikude kohta.

Tegu võib olla katsealuse vähese orienteerumiskogemusega, mis sundis kohe alguses tähelepanelikult kindlat suunda valima, sest pärast lagedamat ala järgneb kõrge kasesalu, mille all on tihe pajuvõsa ehk punane ala. Samas võib tegu olla ka esimesest katsealast tingitud suurema ettevaatlikusega, mis samuti tuleneb vähesest orienteerumiskogemusest.

Sarnane aeglustus esineb ka Katsealusel N3, kuid kelle teekond on olnud ka veidi halvema läbitavusega.

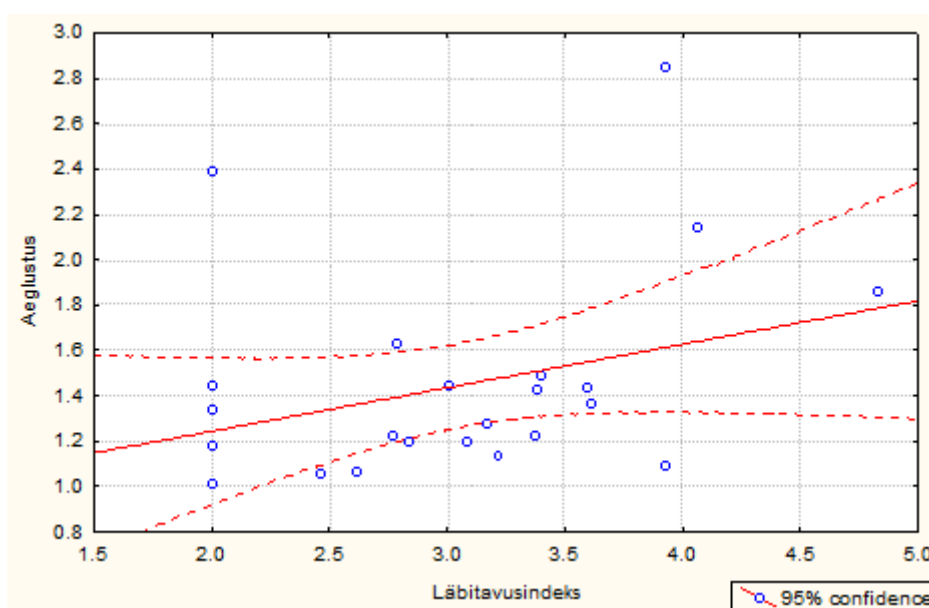
Katsealused N1, M2 ja M3 on liikunud raja teises pooles läbi raskesti läbitava ala (Joonis 4), kuid nende kiirus pole ülejäänud aegadega võrreldes langenud (Joonis 2, 4 punkti läbitavusindeksi väärtuse 5 ümber). Viimase lõigu puhul võib seda seletada kui lõpp-punkti nägemisest tekkinud kindla orientiiri suunas liikumist, mis võib alateadlikult tõsta kõndija tempot. Annelinna lõpp-punkti tähis asus lagedamal alal üksiku puu küljes ehk liikudes võsast lagedale muutus nähtavus paremaks ja tiheda võsa puudumine lubas kiiremat liikumist. Olles katsete ajal tihti lõpp-punkti, oli näha millal katsealused nägid visuaalselt lõpp-punkti tähist ning muutsid oma suunda ja tundus, et tihti võis ka liikumiskiirus tõusta.



Joonis 4. Annelinna katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

3.3.2 Hiinalinn

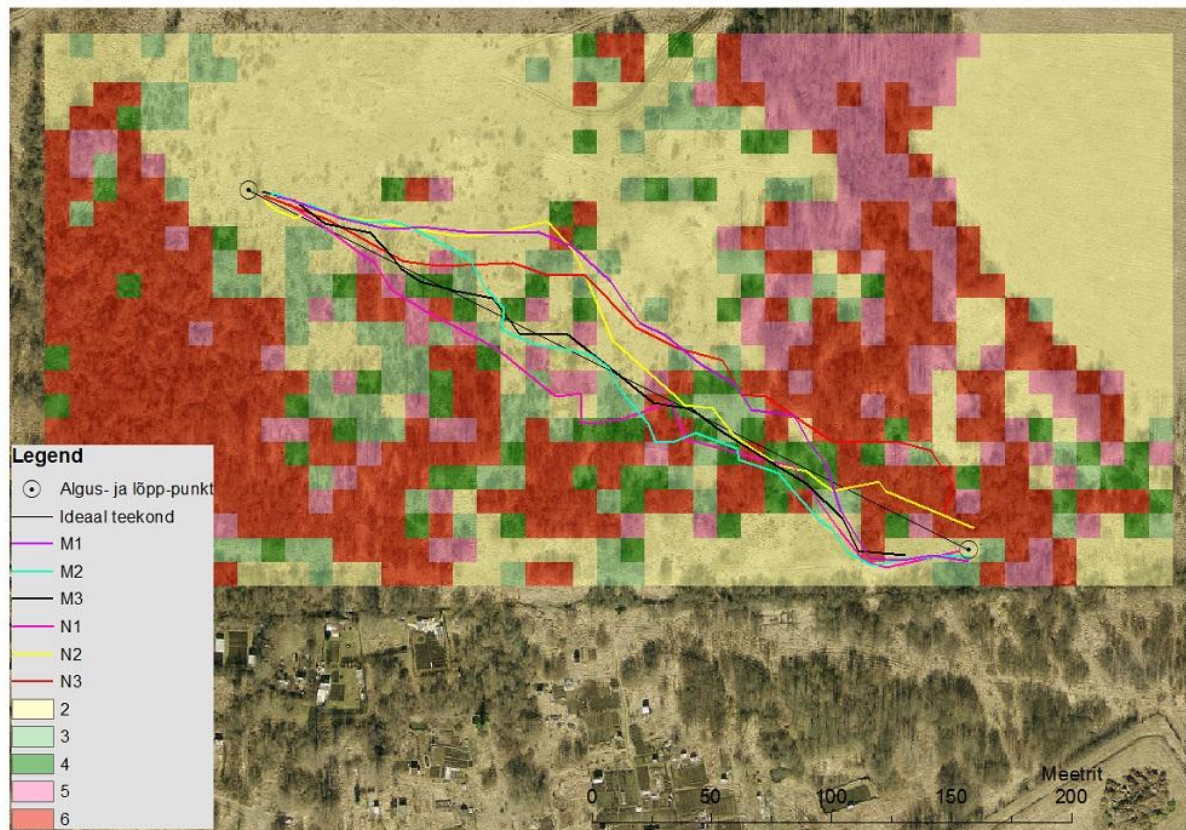
Hiinalinna läbitavuse ja aeglustuse 100 meetriste teelõikude vahel on näha kerget tõusvat trendi (Joonis 5). See on küll positiivsele lineaarsele seosele omane, kuid hajuvus on endiselt suur ning mingit statistiliselt usutavat seost ei ole. Esineb küll mõningaid erindid. Kergesti läbitaval alal on katsealuse N3 liikumiskiirus aeglustunud 2,4 korda. Aeglustus toimus raja viimases osas. Selle põhjustas lõpp-punkti otsimine madala ja tiheda võsa sees (Lisa 2, pilt 4). Arvestades katsealuse pikkust (1,68 m), võis visuaalse kontakti otsimine tempot vähendada.



Joonis 5. Hiinalinna katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonna lõikude kohta.

Kaks erindit, mille läbitavusindeksi väärtused on üle 3,5 ja aeglustumine üle 1,8 korra, on pärit raja algusest, kus alguspunkti põhja jääb raskesti läbitav ala (Joonis 6), mis oli reaalsuses tiheda pajuvõsaga ala (Lisa 2, pilt 3). N2 ja N3 valisid oma teekonna teistest katsealustest erinevalt, läbides raskesti läbitava võsa ja sellest tulenevalt on ka nende teekonna esimese saja meetri läbitavusindeks teistest suurem. Teised katsealused läksid raskesti läbitavast võsast ringiga mööda, hinnates seda võsa läbimatuks (Joonis 6). N1 puhul on läbimiskiirus langenud kolmandas lõigus, mis jääb joonis 6 järgi jällegi raskemini läbitava ala sisse ning see aeglustus on reaalsusega kooskõlas. M2 puhul tuleb esile teist 100 meetrist lõiku iseloomustav punkt jooniselt 5, mille läbitavusindeks on 3,9 ja aeglustus jääb alla 1,2. Joonise 6 järgi läbis katsealune tõesti osaliselt raskesti läbitavat ala, mille vahel on ka keskmiselt läbitavaid alasid. Katsealade kirjelduses eelnevalt välja toodud Hiinalinna võsa

iseloomustas katseala lõuna ja lääne osas kasvavad laiad ning kuni 4 meetri kõrgused pajupõõsad. See tähendab, et põõsaste vahel oli teatud kohtades rohkem vaba ruumi ja põõsastik ei olnud hea orienteerumisoskusega ja kiiresammulise katsealuse puhul eriliseks takistuseks.



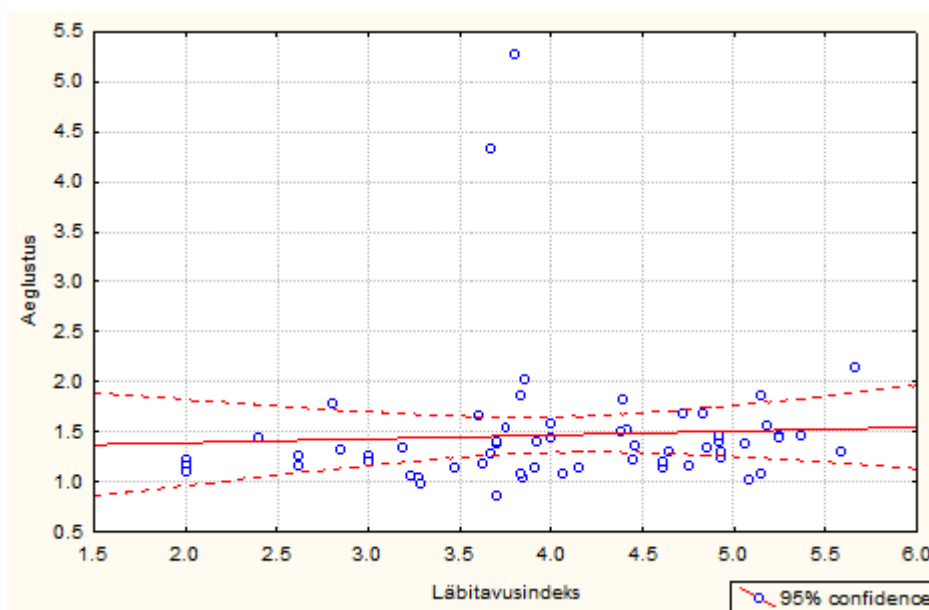
Joonis 6. Hiinalinna katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

3.3.3 Raadi lennuväli

Raadi lennuvälja katseala 100 meetriste teekondade keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse kordaja suhtest puudub lineaarne seos (Joonis 7). Läbitavusindeksi suurenemisest hoolimata on läbimiskiirus väga ühtlane, jäädes ühtlaselt alla 2 korra.

Joonisel 7 on kaks erindit, mille läbitavusindeks jääb 3,5 ja 4,0 vahele, kuid on teistest punktidest umbes 2,5 korda aeglasemalt läbitud. Mõlemad punktid kajastavad esimest 100 meetrist lõiku Raadil, mille läbisid N1 ja N3. Jooniselt 8 pole küll näha, et N1 valis teiste

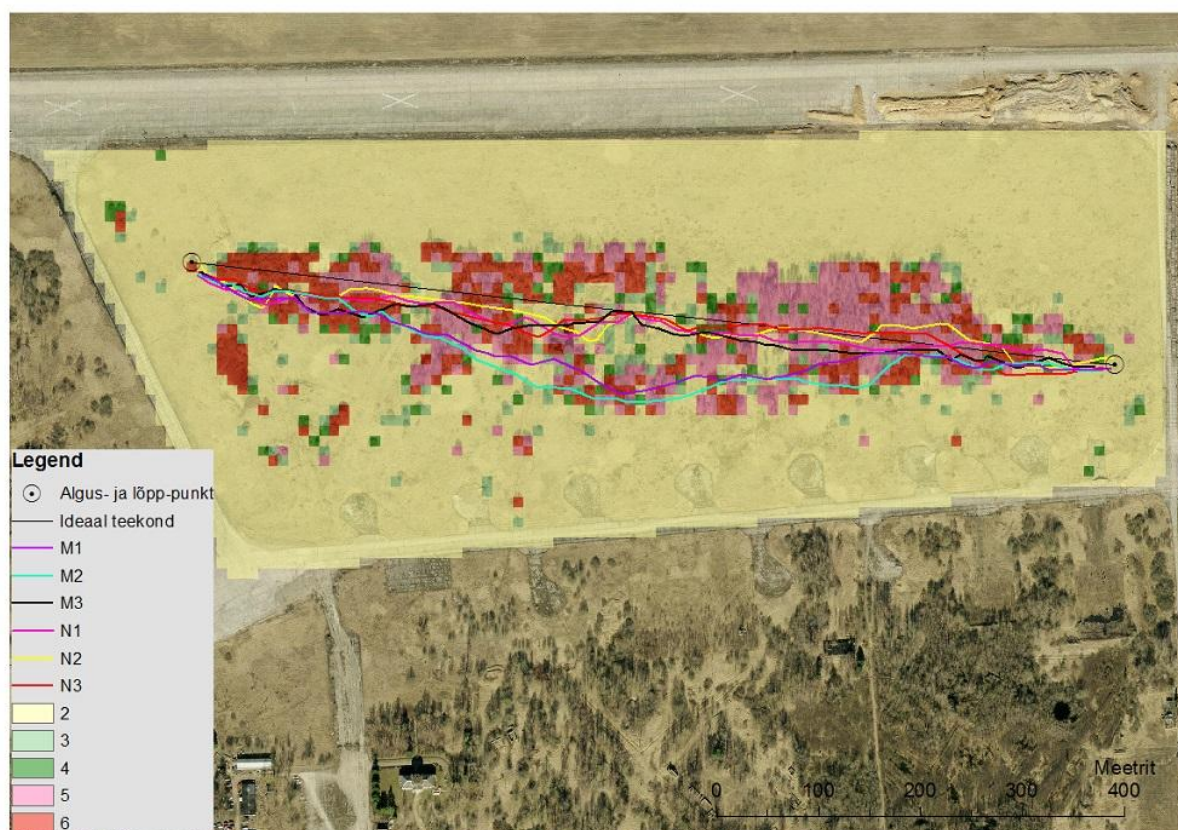
katsealustega võrreldes raskema läbitavusega teekonna alguses, kuid tegelikult see oli nii. See tuleneb GPS seadme asukohatäpsusest, mis alguspunkti suhtes tundub olevat hea, kuid järgneva 100 meetri osas valetab. N1 läbis üsnagi sirgjooneliselt esimesed 100 meetrit, mis on tihe paljuvõsa (Lisa 2, pilt 5), kus jooksevad ka katseala kirjelduses mainitud madalad ja kitsad kraavid. N3 üritas samuti algul läbida antud võsa, kuid loobus ja läks ringiga mööda, mida on ka teiste katsealuste puhul jooniselt 8 näha. Mobiiltelefoni GPSseadme asukohatäpsuse vea ja läbitavusindeksi leidmise meetodikast tulenevalt on katsealuse N1 esimese 100 meetri pikkusel lõigul väike läbitavusindeksi väärtus, mis peaks tegelikult suurem olema.



Joonis 7. Raadi lennuvälja katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonna lõikude kohta.

Raadi lennuvälja katsealal esines ka üks erind, kus katsealune N2 läbis 100 meetrise teekonnalõigu kiiremini, kui etalonraja. Seda iseloomustab joonise 7 punkt, mille aeglustumise kordaja on alla 1,0. See on katsealuse N2 neljas teekonnalõik, kus jõutakse kõrgemate puude alt lagedale, kus on orientiir „kuused“, mida mainiti ka ennem rajale minekut töö autori poolt katsealustele. Selline olukord võis põhjustada vähese orienteerumiskogemuse koosmõjul Annelinna katseala lõpp-punkti lõpuspurdi sarnase olukorra. Nähti eemalt kindlat orientiiri ja liiguti kiirelt selle suunas, kuid unustati oma liikumissuunda korrigeerida vastavalt orientiiril ja ideaalteekonnale. N2 viienda teelõigus on näha järsku suunamuutust, mis on põhjustatud vall-takistusest, mis asub lagedal ning

aeglustumise kordaja suureneb 1,7 korda. Kogenud orienteeruja oleks antud olukorras oma teekonda sujuvalt muutnud, mida on näiteks M3 puhul samas situatsioonis näha (Joonis 8).



Joonis 8. Raadi lennuvälja katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

Jooniselt 8 tuleb esile, et M1 ja M2 valisid teistest katsealustest nähtavalt teistsuguse teekonna, liikudes ideaalteekonnast tunduvalt lõuna poolt. Antud juhul ei saa seda kindlasti GPS seadme asukoha ebatäpsusest põhjustatud veaks lugeda. Mõlemad katsealused hindasid oma orienteerumiskogemust heaks (Tabel 3), kuid antud juhul tundub olevat kas teadliku või teadmatu püstitatud orienteerumisülesande eiramisega. Seda seletab ka mõlema katsealuse teistest märgatavalt kiirem keskmine läbitavuskiirus terve Raadi raja kohta (Tabel 5) ehk katsealused ei üritatud ennast maastiku ning ortofoto alusel ideaalteekona läheduses hoida. Valiti pigem endale sobiv teekond alguspunktist teekonna lõppu. Siiski on nii M1 kui ka M2 terve raja keskmine läbitavusindeks teistega võrreldes sarnane (Tabel 4).

Võrreldes teiste radadega on Raadi ideaalteekond kõige pikem, 920 meetrit (Tabel 2). See on enamusest radadest umbes kaks kuni kolm korda pikem. Sellel põhjusel vaadati Raadi raja

puhul lisaks, et kas teekonna esimese ja teise poole peal on näha aeglustuse erinevust, mis on põhjustatud inimese väsimusest. Ühegi katsealuse puhul otsest erinevust I ja II osa vahel välja ei tulnud (Tabel 6), kuigi väike aeglustus on toimunud. Seega inimesed liikusid suhteliselt ühtlase kiirusega terve raja ulatuses.

Tabel 6. Katsealuste keskmised aeglustuse kordajad Raadi katseala I osas ja II osas.

Katsealused	I osa	II osa
N1	1,6	1,4
N2	1,5	1,4
N3	1,7	1,5
M1	1,2	1,1
M2	1,3	1,1
M3	1,3	1,3

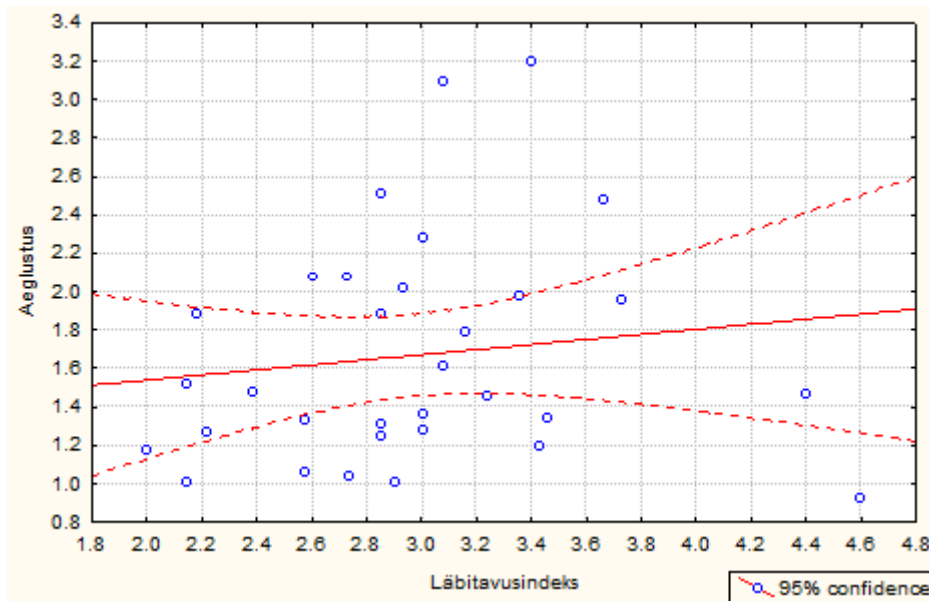
Vaadates joonist 8 on näha et võsastunud ala teine osa Raadi lennuvälja alast on punastes toonides ehk raskesti läbitav ala, kuid tabel 6 ja joonis 7 järgi pole mingit olulist aeglustumist katsealuste läbimiskiiruses. Seda seletab asjaolu, et II osa keskaigas, kust enamus katsealuseid läbi läksid, polnud mitte tihe võsa vaid kõrged haavad, mida katseala tutvustuses on kirjeldatud (Lisa 2, pilt 6). Katvusindeksi põhjal on tegu siiski raskesti läbitava alaga, kuna haabade võrastik on ülevalt ühtlaselt ning tihedalt kaetud. Kuigi puude kõrgused on üle 6 meetri, mis meetodi alusel vähendab läbitavusindeksi väärtust raskesti läbitavalt alalt keskmiselt läbitavale alale, eeldusel, et nii kõrged puud on juba alt piisavalt laasunud. Siiski pole Raadi katseala puhul selline üldistatud meetod töötanud. Selle peamiseks põhjuseks võib lugeda puude kõrguse alahindamist antud alal. Raadi võsastunud alal II osas domineerib joonise 9 põhjal klass 3, mis tähendab, et puude kõrgus LiDARi andmete põhjal on 10*10 meetrises pikslis keskmiselt alla 6 meetri. Ühtlase kõrgusega puude puhul, mis on tegelikult üle 6 meetri tundub see ebatõenäoline ning vihjab taimkatte alahindamisele. Selle peamiseks põhjuseks on ilmselt lehtede puudumine lennuajal, mille tulemusel on LiDARi punktid puuvõra seest tagasipeegeldunud. Seega ei esita puude tegelikku kõrgust.



Joonis 9. Raadi lennuvälja katseala läbitavusklassid taimestiku kõrguse alusel. 1. klass tähistab lagedat/hästi läbitavat ala, klass 2 vastab keskmiselt läbitavale alale ja 3. klass tähendab raskesti läbitavat ala.

3.3.4 Vahi

Vahi katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonna lõikude alusel omab kerge tõesvat trendi, kuid väga hajusa punktiparve tõttu puudub igasugune statistiliselt usutav seos (Joonis 10). Jooniselt 11 paistab, et ideaalteekonna ümbruses puuduvad suuremad raskesti läbitavad alad, mida kinnitab joonisel 10 katsealuste 100 meetriste teelõikude keskmise läbitavusindeksi väärtuste koondumine indeksi 3 ümber. Kaks erindit, mille aeglustuskordaja on üle 2, kuuluvad katsealustele N2 ja N3. N2 puhul on tegu raja esimese 100 meetriga, kus kohe esines üsna tihe kuni 4 meetri kõrgune võsa, mis võis katsealuse ettevaatlikuks teha, arvestades väikest orienteerumiskogemust. Katseisiku N3 puhul on tegu neljanda 100 meetrise teelõiguga, mis kulgeb läbi ühtlase keskmise läbitavusega ala. Sellel lõigul on ka näha järsku suunamuutust õiges suunas, mis on ilmselt orientiiri „elektriliin“ nägemisest põhjustatud. Võib oletada, et orientiiri otsimine põhjustas aeglustuse koos võsaga, milles puudus nähtavus kaugemale kui 30 meetrit (Lisa 2, pilt 8).

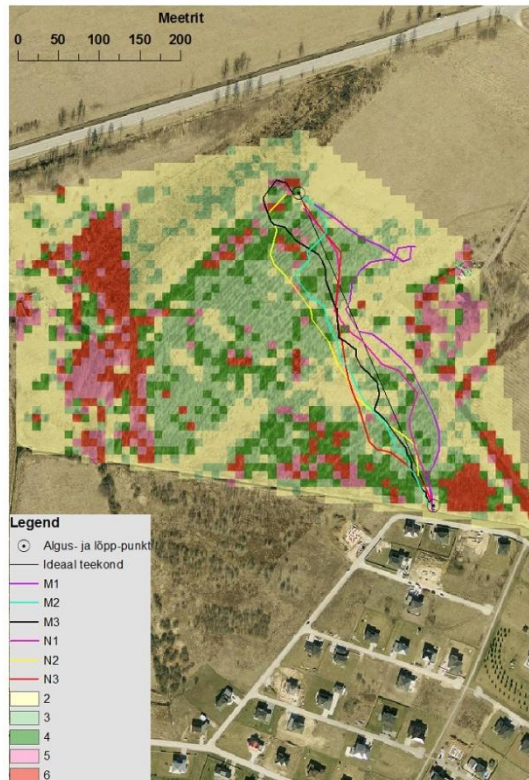


Joonis 10. Vahi katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetriste teekonna lõikude kohta.

Kaks punkti joonisel 10, mis jäävad aeglustuse kordaja väärtusevahemikku 2,4-2,6 kuuluvad katsealusele N1. Mõlemad esindavad raja viimast osa ehk ühtlast tihedat keskmise läbitavusega võsa. Arvestades, et lõpptähis oli instrueeritult elektriposti küljes ja väga sarnast teekonda katsealusega N3 võib oletada, et aeglustuse põhjustajaks antud lõigul on võsa takistus nähtavuse piiramise tõttu.

Jooniselt 10 kerkivad samas esile ka peaaegu olematu aeglustusega erindid. Erind, mis jääb alla aeglustuskordaja väärtusega 1 ning samas omab läbitavusindekit 4,6 kuulub katsealusele M3. Tegu on teekonna viimase osaga, mis joonise 11 kohaselt on raskesti läbitav, kuid antud juhul on tegu veaga, mis on põhjustatud vanadest andmetest. Katse läbiviimise hetkel asus antud kohas hiljuti võsast lagedaks raiutud elektriliini koridor ehk tegu oli hästi läbitava alaga. Aeglustuse negatiivseks muutmist võib ilmselt põhjendada juba eelnevalt seletatud lõpp-punkti nägemisest tekkiva kiirendusega. Teised aeglustuskordaja väärtuse 1 läheduses olevad punktid kuuluvad katsealustele M1 ja M2. Need punktid iseloomustavad just hästi läbitavaid alasid teekonna keskosas, kus maapinnal oli vaid kulu, mis neile eriliseks takistuseks polnud (Lisa 2, pilt 7).

Katsealuse M1 puhul on jooniselt 11 näha selget äraeksimist, millest tulenevalt on isik ringiratast liikunud. Peale orientiir „elektriliin“ märkamist on katsealune liikunud mööda võsast lagedaks raiutud elektriliini koridori.



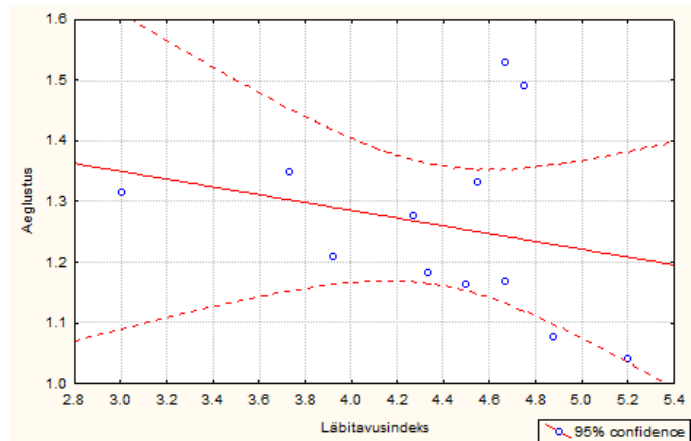
Joonis 11. Vahi katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

3.3.5 Tähtvere

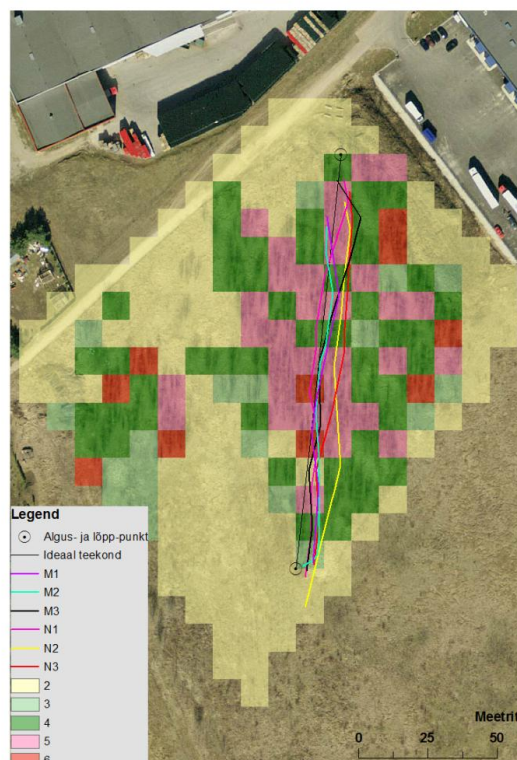
Tähtvere katseala oli pindalaliselt kõige väiksem (Tabel 1) ja ideaalteekonna pikkuselt kõige lühem (Tabel 2). Seega on sellelt katsealalt kõige vähem võrreldavaid tulemusi. Jooniselt 12 on näha negatiivset trendi tulemustes, kus punkt pilv on siiski suhteliselt hajus.

Katsealuste teekonnad on kõik väga sarnased (Joonis 13), mis tuleneb peamiselt ala väiksusest ja tegelikust võsa hõredusest, mis läbitavuskaardilt välja ei tule. Sellest põhjustatult on ka katsealuste teekondade läbitavusindeksite numbrid ühtlaselt kõrged, kuid aeglustuse kordaja seda ei kinnita. Seega antud juhul läbitavusindeksid valetavad. Selle peamiseks põhjuseks on just antud võsa eripära, mida Tähtvere katseala üldises kirjelduses ka kirjeldati. Võsa on kõrge ning võrad on ülevalt tihedalt koos. Võsa on alt laasunud põõsastes, sarnanedes sarapuupõõsastele (*Corylus avellana*), mille all on palju ruumi (Lisa 2, pildid 9 ja 10). Vea põhjuseks on meetodika eripära, et kasutati ainult LiDARi andmete esimest

peegeldust katvuse ehk võsatiheduse hindamisel, mille tulemusel on jäänud tiheda võsa mulje. Läbitavusindeksit ei tasanda ka asjaolu, et tegu pole veel üle 6 meetrise võsaga. Üheks läbitavuse indeksit mõjutavaks faktoriks võib antud juhul olla piksli suurus, mis on liiga suur ehk liialt üldistav ning ei esinda antud ala varieeruvust.



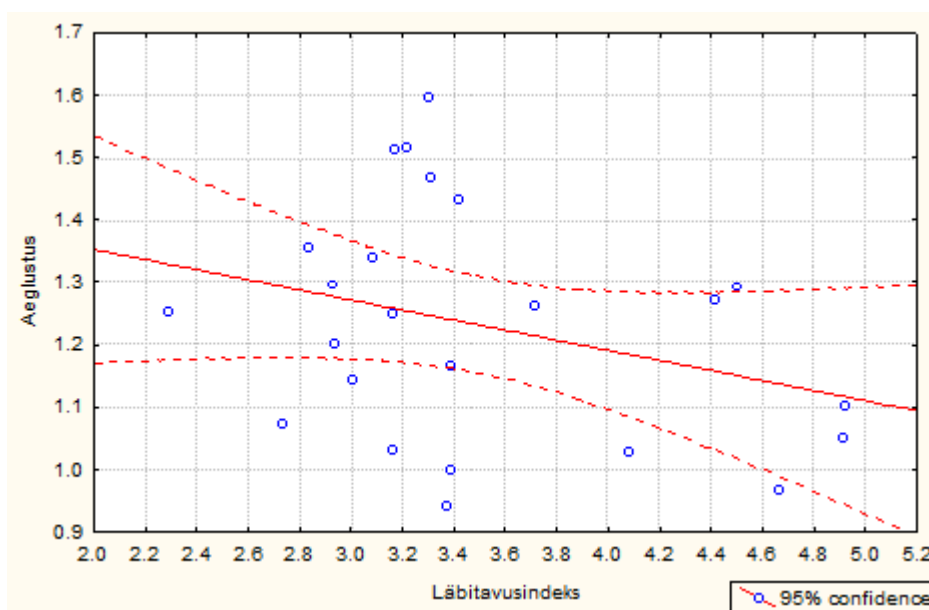
Joonis 12. Tähtvere katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe maksimaalselt 100 meetriste teekonna lõikude kohta.



Joonis 13. Tähtvere katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

3.3.6 Soinaste

Soinaste katseala läbitavuskaardi 100m² pikslite kaupa arvatud läbitavusindeksi ja katsealuste liikumiskiiruse muutumise vahel esineb nõrk negatiivne lineaarne seos, kus $r = -0,31$ (Joonis 14). Antud ala ideaalteekonnal on näha suhteliselt raskesti läbitavate alade vaheldumist kergesti läbitavate aladega (Joonis15). Keskmiselt läbitavate alade osakaal on väike. Siiski on peamine punktigrupp läbitavusindeksi vahemikus 2,8 kuni 3,4 (Joonis 14) ehk keskmiselt läbitav ala.

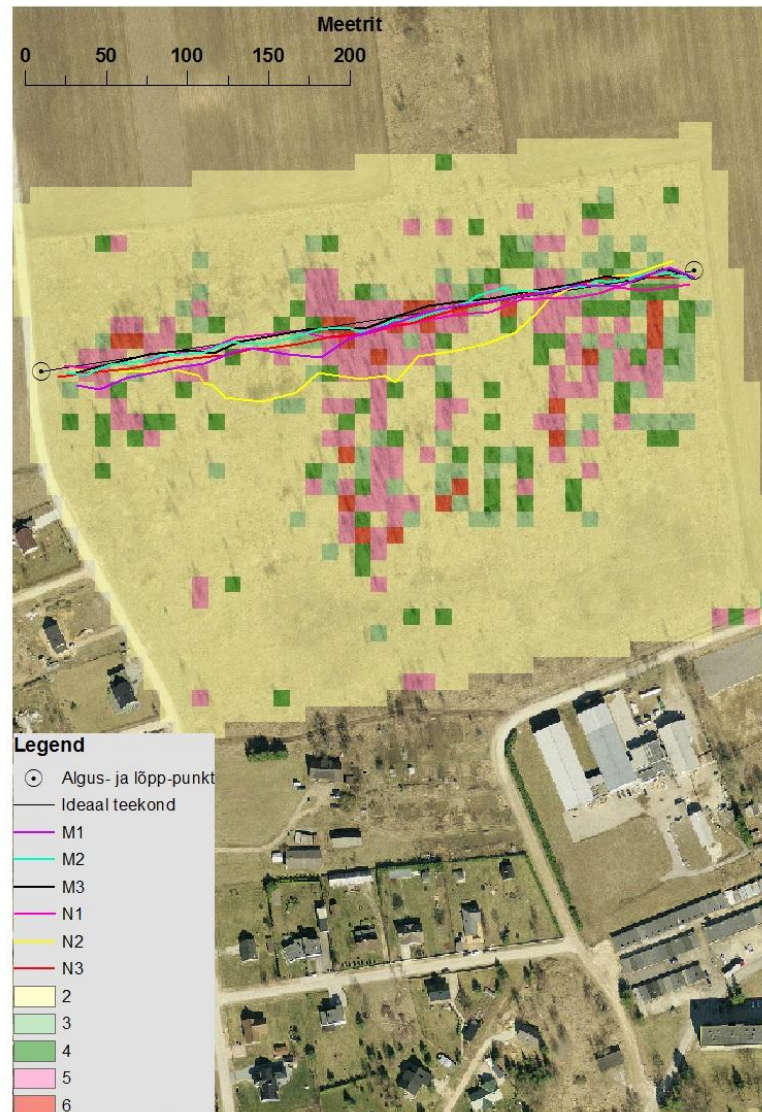


Joonis 14. Soinaste katseala keskmise läbitavusindeksi ja aeglustuse suhe 100 meetrite teekonna lõikude kohta.

Kolm kõige suuremat aeglustumist on toimunud raja alguses ning seda katsealuste N1, N2 ja N3 puhul. Meessoost katseisikutel erist aeglustust sellel rajalõigul ei ole, kus M1 on meestest suurim aeglustumine 1,2. Soinaste katseala kirjelduses on eelnevalt toodud esile, et ida osas kasvavad pajupõõsad, mida võib naissoost katseisikute aeglustumise põhjuseks lugeda. Seega tuleb välja sooline erinevus ehk meessoost isikuid sellel lõigul pajuvõsa ei seganud nii palju kui naissoost katsealuseid.

Aeglustuskordaja tulemused alla 1,0 esinesid vaid katsealusel M3. Nendeks olid teine ja viimane rajalõik. Teise rajalõigu läbitavusindeks väärtuseks on 4,7, mis on üks kõrgemaid antud rajal (Joonis 14). Samal rajalõigul on M2 ja M3 läbitavuse indeksid üle 4,8 ning aeglustumine jääb väärtuse 1,1 lähedale. Joonise 15 põhjal on tõesti tegu enamasti raskesti läbitava alaga. Siiski on ilmselt tegu läbitavusindeksi ülehinnanguga ehk tegelikult oli

maastikul kõrged kased, mille suhteliselt peened oksad olid altpoolt kohati koos (Lisa 2, pilt 12). See ei tundu meessoost isikuid nii võrd häirinud olevat, kui naissoost katsealuseid. Seega tekib meetodikast tulenevalt läbitavusindeksi määramisel sama probleem, mis oli Tähtvere katsealal. Kõrgete puude alust võsatihedust ei suuda antud meetodika täpselt kirjeldada.



Joonis 15. Soinaste katseala läbitavuse rasterkaart koos ideaal teekonna ja katsealuste GPS teekondadega. Lage/hästi läbitav ala - 2, keskmiselt läbitav ala - 3 ja 4 ning raskesti läbitav ala - 5 ja 6. (Ortofoto Maa-amet 2014)

4 Järeldused

Uurimistööks kasutatud Tartu linna ümbruses paiknevad katsealad olid võsastumiselt küllaltki erinevad. Oli võsastunud põllumaid, kui ka teatud oludes märgaladeks muutuvaid alasid, mille ühine tunnus oli maapinna tasasus. Sellega üritati vähendada reljeefi mõju läbitavusele. Peamiselt kasvas katsealadel paju- ja kasevõsa, mille kõrval esines ka suuremaid puude salusid nagu Anne, Raadi lennuvälja ja Soinaste katsealadel. Suurt rolli katsealade läbitavuses mängis võsaprofiil, kas tegu oli üksikute laiade põõsastega, mille vahel on teatud lage ala, tihe peenikeste ja sirgete tüvedega võsaga või on hoopis tegu alt laasunud kõrgete põõsastega, mis on ülevalt tihedalt kokkukasvanud.

Läbitavuskaardi 100m² pikslite kaupa arvatud läbitavusindeksi ja katsealuste liikumiskiiruse muutumise ehk aeglustumise vahel ei leitud seost. Sellest tulenevalt võib väita, et leitud lihtne läbitavuse indeks ei kirjelda tegelikku läbitavust antud katsealadel. Selle peamiseks põhjuseks on läbitavusindeksi arvutamise meetodikast tulenev kõrgemate puude ja võsa all oleva võsatiheduse otsese määramise puudumine. Kaudselt on seda probleemi üritatud leevendada taimkatte kõrgusel põhineva läbitavusindeksi kriteeriumiga, kus pikslile antakse parem läbitavus klass, kui piksli keskmine taimkatte kõrgus on üle 6 meetri. See põhineb eeldusel, et üle 6 meetrise võsa puhul on tegu juba pigem puudega, mis on alt piisavalt laasunud ning mille tõttu selline võsa ei takista enam nii palju inimese jalgsi liikumist.

Raadi lennuvälja, Tähtvere ja Soinaste katsealad näitasid, et selline lihtne lihtsustus ei tööta juhtudel, kus võsa võib olla küll üle 6 meetri kõrge, kuid LiDARi andmete kogumise eripäradest tulenevalt hinnatakse taimestiku kõrgust madalamaks, kui see tegelikult on. Töös kasutatud LiDARi andmete kogumine toimus kevadel enne suuremate lehtede tekkimist. Seega saaks täpsemad taimkatte kõrguse andmed, kui LiDARi andmed oleks kogutud ajal, millal puud on lehes. Aastaja mõju LiDARi andmete täpsusele ongi peetud üheks enim mõjutavamaks teguriks taimkatte parameetrite hindamisel (Lang 2010, Mõistus jt. 2014, Sterenczak & Kozak 2011, Hill & Broughton 2009, Wagner et al. 2004).

Teine põhjus, miks antud meetod ei suuda kõiki katsealasid võrdselt iseloomustada on läbitavusindeksi leidmine kasutades ainult esimest tagasipeegeldumist, hindamaks taimkatte tihedust. Antud meetod töötab, kui võsa on heterogeene terves võsaprofiilis. Kuid Tähtvere katseala näitlikustas antud probleemi kõige paremini. Katsealal kasvavad kõrged, kuid alla 6

meetrised pajupõõsad, mis on püstjad ja alt laasunud. Antud pajupõõsad sarnanevad sarapuupõõsastega. Sellest tulenevalt on võsa LiDARi andmetest lähtuvalt tihe, kuid tegelikult on võsa all inimesel piisavalt ruumi vabalt liikumiseks. Selle puuduse leevendamiseks oleks võimalus kasutada kõiki peegeldusi, mis eeldaks kahel aastaajal andmete kogumist. Põhjusel, et teise ja kolmanda peegelduse andmed on täpsemad, kui kõrgemal olevad puud ei ole veel lehes.

Rautianen et al. (2005) on toonud välja, et LiDARi andmete puhul mõjutab kõrguse hindamise täpsust LiDARi punktide arv pikslis, millega antud kõrgust tehetakse edasi anda. Nende kohaselt peaks piksli sisse jääma umbes 100 peegeldust, et vältida juhuliku vea mõju. Antud töö raames valiti piksli suuruseks Lang (2010) ja Mõistus jt (2014) eeskujul 10*10 meetrine piksel, mille sisse jäi umbes 20 peegeldust. See võis põhjustada suurt juhusliku viga ehk varieeruvust piksli sees. Kuid detailsema ja täpsema tulemuse jaoks oleks vaja valida isegi väiksemate mõõtudega piksel, mis suudaks näiteks suurte pajupõõsaste vahelisi „radu“ iseloomustada. Seega läbitavuse täpsemaks, detailsemaks ja usaldusväärsemaks määramiseks oleks vaja oluliselt tihedamat LiDARi punktipilve mitmest erinevast fenoloogilisest faasist.

Kontrollandmete tulemusi võis kohati mõjutada ka mobiiltelefonide GPS seadmete asukohatäpsus, mida kontrollandmete saamiseks kasutati. Üks põhjus on asukohatäpsus, mis võis oleneda telefonist, ilmastikust ja taimkatte paksusest. Teine põhjus, mis piiras kontrollandmetega täpsemaks kui 100 meetrit minna oli mobiiltelefonide GPS seadmete automaatne teekonnapunktide märkimine. Kui osal käsiGPS seadmetel on võimalik seadistada teekonnapunktide märkimise intervalli aja või teekonna alusel, siis mobiiltelefonidel antud võimalus puudus.

Kogutud andmete põhjal võib oletada, et läbitavuse kontrollimist mõjutab ka indiviidi olemus ja eelnev kogemus orienteerumises. Otsest seost sugude ja läbikäimiskiiruste vahel küll polnud, kuid Soinaste katsealal ilmnes teatud soolised erinevused. Meessoost isikute liikumiskiiruse aeglustumine oli naissoost isikutega võrreldes teatud lõikudel väiksem.

Kokkuvõtteks võib öelda, et antud uurimistöö põhjal ei suudetud aerolaserskaneerimise andmete põhjal leida lihtsat kvantitatiivset näitajat võsastunud ala kohta, mis iseloomustaks ala läbitavust jalgsi liikuja jaoks. Puudus seos leitud läbitavuse indeksi ja läbimiskiiruse vahel. Selle peamiseks põhjuseks oli metoodikast tulenev läbitavusindeksi ala- või

ülemääramine, mis tuleneb kõrgema võsa ja puude aluse taimestiku tiheduse otsese määramise puudumisest.

Kokkuvõte

Maastiku läbitavus mõjutab mitmete valdkondade tegevust, nagu militaar valdkonda või päästeteenistust. Läbitavus sõltub mitmetest erinevatest teguritest, näiteks reljeef, taimestik ja erinevad takistused (veekogud, aiad). Kõige kiiremini ja pidevalt muutuv on neist teguritest taimestik. Metsade läbitavuse kaardistamine toimub hetkel peamiselt välitööde käigus, kus välitöötaja hindab ka taimestikust tulenevat läbitavust. Ajamahukaid välitöid pole veel suudetud asendada piisavalt hea kvaliteediga automatiseeritud meetodiga.

Magistritöös uuriti jalgsi liikuja näitel, kas aerolidarandmete alusel on võimalik hinnata võsastunud ala läbitavust. Esmalt leiti lihtne kvantitatiivne läbitavusindeks ning selle reaalsusele vastavuse kontrolliks võrreldi saadud andmeid kuue katseala läbitavuskiirustega. Katsealad olid kõik tasased võsastunud alad Tartu linna ümbruses. Katsealusteks, kelle läbitavuskiiruseid võrreldi saadud andmetega, olid erineva orienteerumisoskusega noored inimesed. Sooliselt jagunesid 6 katsealust pooleks.

Läbitavusindeksi leidmiseks kasutati Maa-ametilt saadud LiDARi toorandmeid. LiDARi andmete põhjal koostati kaks läbitavusklassidega rasterkaarti. Esimesel kaardil esitati läbitavus taimkatte katvuse ehk võsatiheduse alusel ning teisel kaardil esitati läbitavus võsakõrguse, kui nähtavust segava faktori alusel kolme klassina. Lõpliku läbitavuskaardi saamiseks kaks eelnevat rasterkaarti liideti omavahel, saades lõplik kolme klassiline läbitavuskaart. Kaart kujutab lagedaid/hea läbitavusega alasid (rastri väärtus 1), keskmiselt läbitavaid alasid (rastri väärtused 3-4) ja raskesti läbitavaid alasid (rastri väärtused 5-6).

Kontrollandmeteks kasutati katsealuste läbimiskiiruse andmeid koos nende GPSteekondadega. Võrreldi läbitavuskaardi 100m^2 pikslite alusel arvutatud 100 meetri pikkuse teelõigu keskmise läbitavusindeksi ja katsealuste liikumiskiiruse muutumise ehk aeglustumise vahelist seost. Võrdlusandmete puhul leiti 100 meetri pikkuste lõikude keskmised läbitavuskiirused ja võrreldi neid kiirusega etalonrajal (rada, kus puudusid takistused), mille suhtest saadi aeglustuskordaja. GPSteekondade alusel hinnati kvalitatiivselt katsealuste erisusi omavahel ja võrreldi läbitavusindeksiga.

Töö tulemused näitavad, et leitud läbitavusindeks ei suuda kirjeldada kõigi valitud katsealade läbitavust üheselt. Katsealade 100 meetriste teekondade keskmiste läbitavusindeksite ja aeglustusekordajate vahel puudub statistiliselt oluline seos. Peamiseks põhjuseks võib lugeda

metoodikast tulenevat läbitavusindeksi ala- või ülemääramist, mis tuleneb kõrgema võsa ja puude aluse taimestiku tiheduse otsese määramise puudumisest. See on põhjustatud LiDARi töötamise eripärast, kus kõrgusandmete täpsus sõltub palju puude lehtes olemisest, punktipilve tihedusest ning antud metoodika eripärast, kus võsatiheduse määramisel kasutati ainult LiDARi esimese peegelduse andmeid. Seega läbitavuse täpsemaks, detailsemaks ja usaldusväärsemaks määramiseks oleks vaja oluliselt tihedamat LiDARi punktipilve mitmest erinevast fenoloogilisest faasist. Kontrollandmete õigsust võis mõjutada kogumisel kasutatud mobiiltelefonide GPS seadmete asukohatäpsus ja teekonnapunktide automaatne määramine. GPS seadmest tulenevaid probleeme saaks parandada käsiGPS seadmete kasutamisega, millel on võimalik teekonnapunktide intervalli muuta.

Summary

Permeability of overgrown areas by foot travelers

Current thesis concentrates on finding out the possibility to find a simple method to estimate permeability of overgrown areas using airborne LiDAR data. To verify the validity of the method with reality the speed reduction of respondent permeability in brush was compared to calculated permeability indicator data from six test areas. All test areas were located around the city of Tartu and had one common feature – they all had flat ground.

Unclassified airborne LiDAR data first reflections were used to make two rastermaps. First one showed the brush permeability on the basis of canopy cover and the second one showed brush permeability on the basis of canopy height which restricts visibility. Both maps were classified with 3 classes. Those two rastermaps were merged to get final permeability map that had 3 permeability classes: treeless areas/areas with good permeability (raster value 2), areas with average permeability (raster values 3-4) and areas with rough permeability (raster values 5-6).

To compare the calculated permeability index with reality, GPS tracks from six respondents were collected to get their speed of permeability and visual travel routes. The average permeability index was calculated by 100 metre slices along the track and it was compared to the slowdown coefficient. The slowdown coefficient was found as respondent average speed on the 100 metre travel route compared to average speed on the 100 metre reference route (route without obstacles). GPS tracks were also used to compare respondents paths to each other.

No correlation between slowdown coefficient and permeability index was detected. The main reason for that was the canopy leafs on/off effect for airborne LiDAR data height accuracy. Airborne LiDAR underestimates canopy height when canopy does not have any leaves. Permeability under- and overestimating was also influenced by sparse LiDAR data point cloud and usage of only LiDAR data first reflections, so there was no data from underneath of high canopy. GPS location accuracy and the method for determining trackpoints did also influence comparable data accuracy.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Tõnu Oja, kelle abi ja asjakohase nõuta poleks see töö valminud.

Lisaks tänan kõiki katsealuseid, kes olid nõus läbima etteantud katsealade teekonnad.

Kirjandus

Alexander, C., Moeslund, J. E., Bøchera, P. K., Argeb, L., Svenninga, J-C., 2013. Airborne laser scanner (LiDAR) proxies for understory light conditions. *Remote Sensing of Environment*, Vol 134, pp 152–161.

Antso, I. 2010. Autokasutuse muutuse mõju Tallinna liiklusele. Tartu, p 84.

Duncan, D. T., Aldstadt, J., Whalen, J., Melly, S. J., Gortmarker, S. L., 2011. Validation of Walk Score® for Estimating Neighborhood Walkability: An Analysis of Four US Metropolitan Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol 8(11), pp 4160-4179.

Gilderbloom, J. I., Riggs, W. W., Meares, W. L., 2015. Does walkability matter? An examination of walkability's impact on housing values, foreclosures and crime. *Cities*, Vol 42 (A), pp 13-24.

International Orienteering Federation, 2000. Rahvusvahelised nõuded orienteerumiskaartide koostamiseks. Soome, p 24.

Jensen, J. R., 2009. *Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective*. LIDAR Remote Sensing 2nd. Toim: Clarke, K., C. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, p 592.

Karm, M., 2015. Orienteerumiskaardi tootmise optimeerimine LiDAR-i ja topograafilisi andmeid kasutades. Tartu, p 73.

Lang, M. 2010. Metsa katvuse ja liituse hindamine lennukilt. *Forestry Studies*. Vol. 52, pp 5-17.

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

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., 2000. *Remote sensing and image interpretation*. Wiley, Ney York, pp 700–705.

- Masing, V., 1992. Ökoloogialeksikon. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, p 275.
- Metsa korraldamise juhend. 2015. Elektrooniline Riigi Teataja. RT I, 23.03.2015, 210
- Mõistus, M., Lang, M., Sims, A., 2013. Puittaimestiku kaardistamine aerolidari andmete põhjal metsana lisanduvatel aladel. Forest Studies, Vol. 59, pp 45-58.
- Olvet, M., 2014. Joostavuse määramise kaudsed meetodid orienteerumiskaardi näitel. Tartu, p 42.
- Omassa, K., Hosoi, F., Uenishi, T. M., Shimizu, Y., Akiyama, Y., 2008. Three-Dimensional Modeling of an Urban Park and Trees by Combined Airborne and Portable On-Ground Scanning. LIDAR Remote Sensing Environ Model Assess, Vol. 13, pp 473-481.
- Pisek, J., Lang, M., Kuusk, J., 2015. A note on suitable viewing configuration for retrieval of forest understory reflectance from multi-angle remote sensing data. Remote Sensing of Environment, Vol 156, pp 242–246.
- Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T., 2005. Estimating canopy cover in Scots pine stands. Silva Fennica, Vol 39(1), pp 137-132.
- Rautiainen, M., Möttus, M., Heiskanen, J., Akujärvi, A., Majasalmi, T., Stenberg, P., 2011. Seasonal reflectance dynamics of common understory types in a northern European boreal forest. Remote Sensing of Environment, Vol 115, Issue 12, pp 3020–3028.
- Reinas, V., 2002. Metsa- ja puiduerialade inglise-eesti eesti-inglise sõnastik. OÜ Matsatark,, Tartu, p 284.
- Stereńczak, K., Kozak, J., 2011. Evaluation of digital terrain models generated in forest conditions from airborne laser scanning data acquired in two seasons. Scandinavian Journal of Forest Research, Vol 26, pp 374-385.
- Tamm, Ü., 2000. Haab Eestis. Eesti Loodusfoto, Tartu, p 257.

Wagner, W., Eberhöfer, C., Hollaus, M., Summer, G., 2004. Robust Filtering of Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Analysis. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 36 -8/W2, pp 56-61.

Internetiallikad

Eesti keele Instituut, 2016. Eesti keele seletav sõnaraamat. [<http://www.eki.ee/dict/ekss/>], 10.01.2016.

Maa-amet, 2009. Eesti kaart.

[http://xgis.maaamet.ee/maps/XGis?app_id=UU82A&user_id=at&LANG=1&WIDTH=1060&HEIGHT=668&BBOX=287500,6338000,817500,6672000&setlegend=SHYBR_ALUS01_82A=0,SHYBR_ALUS08_82A=1], 11.05.2016.

Maa-amet, 2009. Reaalsusmudel. Maa-ameti geoportaal.

[http://geoportaal.maaamet.ee/index.php?lang_id=1&action=kataloog&tyyp_id=15&page_id=88], 23.11.2009.

Maa-amet, 2015. Maa-ameti geoportaal. [<http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/LiDAR-korguspunktid-p499.html>], 10.06.2015.

McGaughey, R. J., 2015. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization.

[https://docs.google.com/viewer?docex=1&url=http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf], 10.2015.

Metsur, M., 2012. Aerolaserskanner (LIDAR) Leica ALS50-II. Maa-ameti geoportaal.

[http://geoportaal.maaamet.ee/index.php?page_id=336&lang_id=1], 26.01.2012.

OGAD AG, 2012. Vegetation Height Maps from Digital Elevation Models – the Next Innovation in Producing Orienteering Maps.

[https://www.ocad.com/downloads/ocad11/presseberichte/2012-07-10_VegetationHightMaps_Web_en.pdf], 07.2012.

Pacific Northwest Research Station, 2015. Remote Sensing Applications Center. Lidar Fusion Tutorial. [http://www.fs.fed.us/eng/rsac/lidar_training/Introduction_to_Fusion/story.html], 12.01.2016.

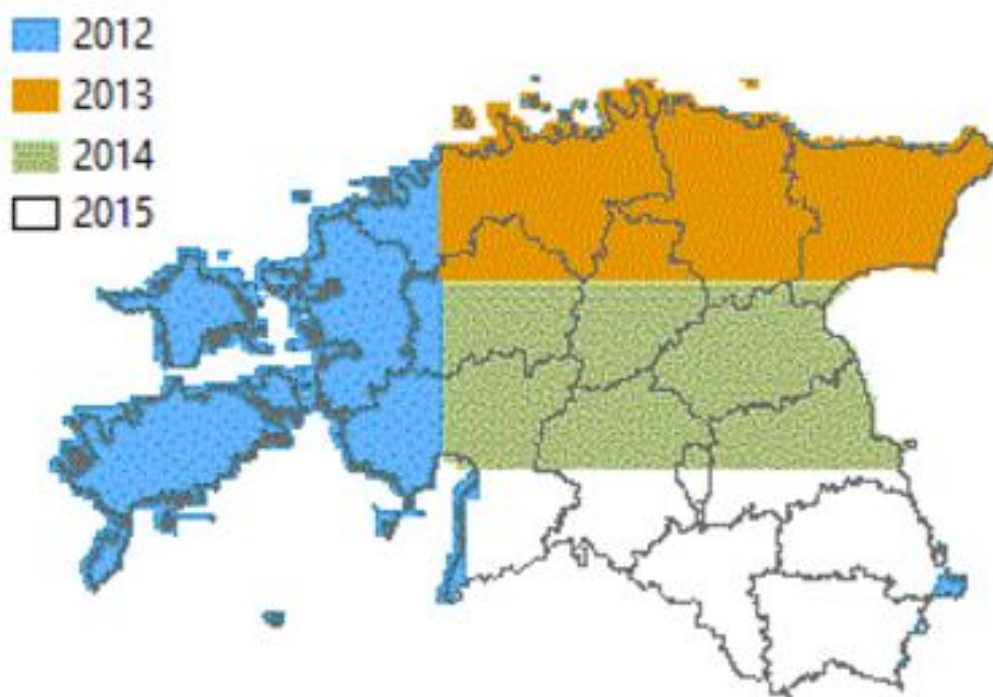
Ryypö, J. s.a.. The award winning* Karttapullautin - toolbox/workflow for generating O training maps without field checking. [<http://routegadget.net/karttapullautin/>], 11.01 2016.

Stratum OÜ, 2003. Kiiruste monitooring Eesti linnades.
[<https://docs.google.com/viewer?docex=1&url=http://www.mnt.ee/failid/Seletuskiri.doc>], 5.01.2016.

Vahar, S., 2010. Nastik. Inglise-eesti / eesti-inglise veebisõnastik.
[<http://nastik.spin.ee/index.php?et=võsa>], 5.06.2010.

Lisad

Lisa 1. Maa-ameti aerolaserskaneerimise andmestik (kõrguselt 2400m) aastate lõikes. (Maa-amet, 2015)



Lisa 2. Katsealasad iseloomustavad pildid. 1-2 Annelinn, 3-4 Hiinalinn, 5-6 Raadi lennuväli, 7-8 Vahi, 9-10 Tähtvere ja 11-12 Soinaste.



1 (18.04.2016)



2 (18.04.2016)



3 (20.05.2016)



4 (20.05.2016)



5 (20.05.2016)



6 (20.05.2016)



7 (18.04.2016)



8 (04.05.2016)



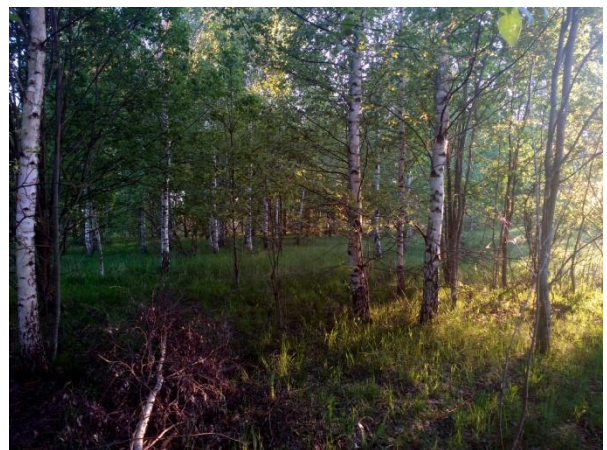
9 (19.05.2016)



10 (19.05.2016)

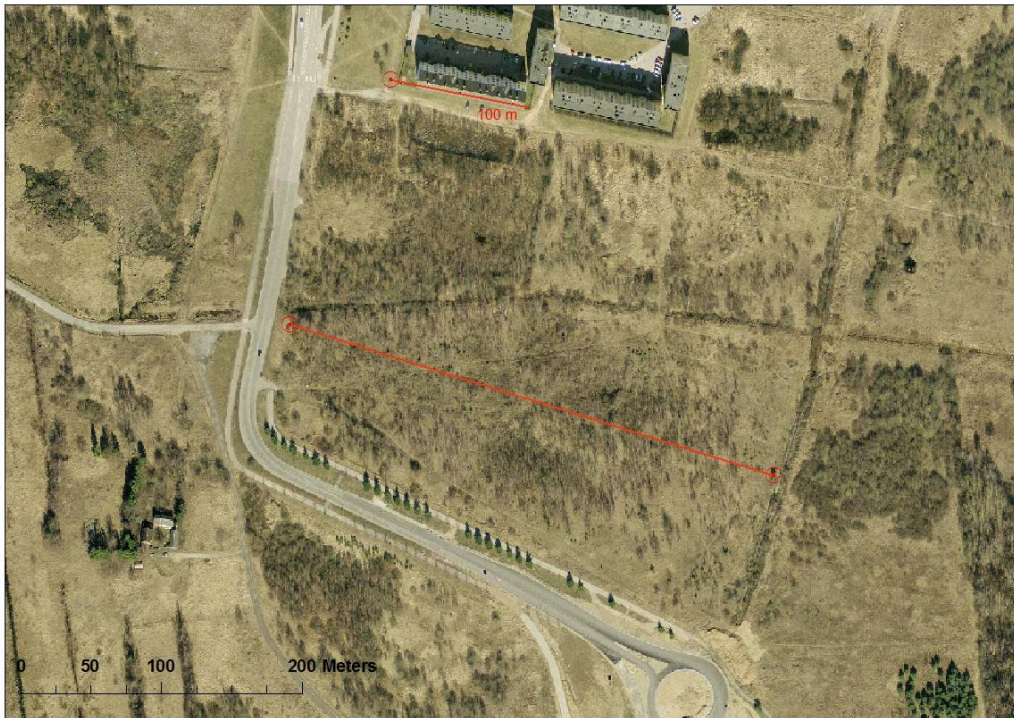


11 (19.05.2016)



12 (19.05.2016)

Lisa 3. Ortofoto Hiinalinna katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond ja etalonkiiruse mõõtmise rada (100m). Raja alguspunkt on läänepoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maa-amet 2014.



Lisa 4. Ortofoto Hiinalinna katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond. Raja alguspunkt on lõunapoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maa-amet 2014.



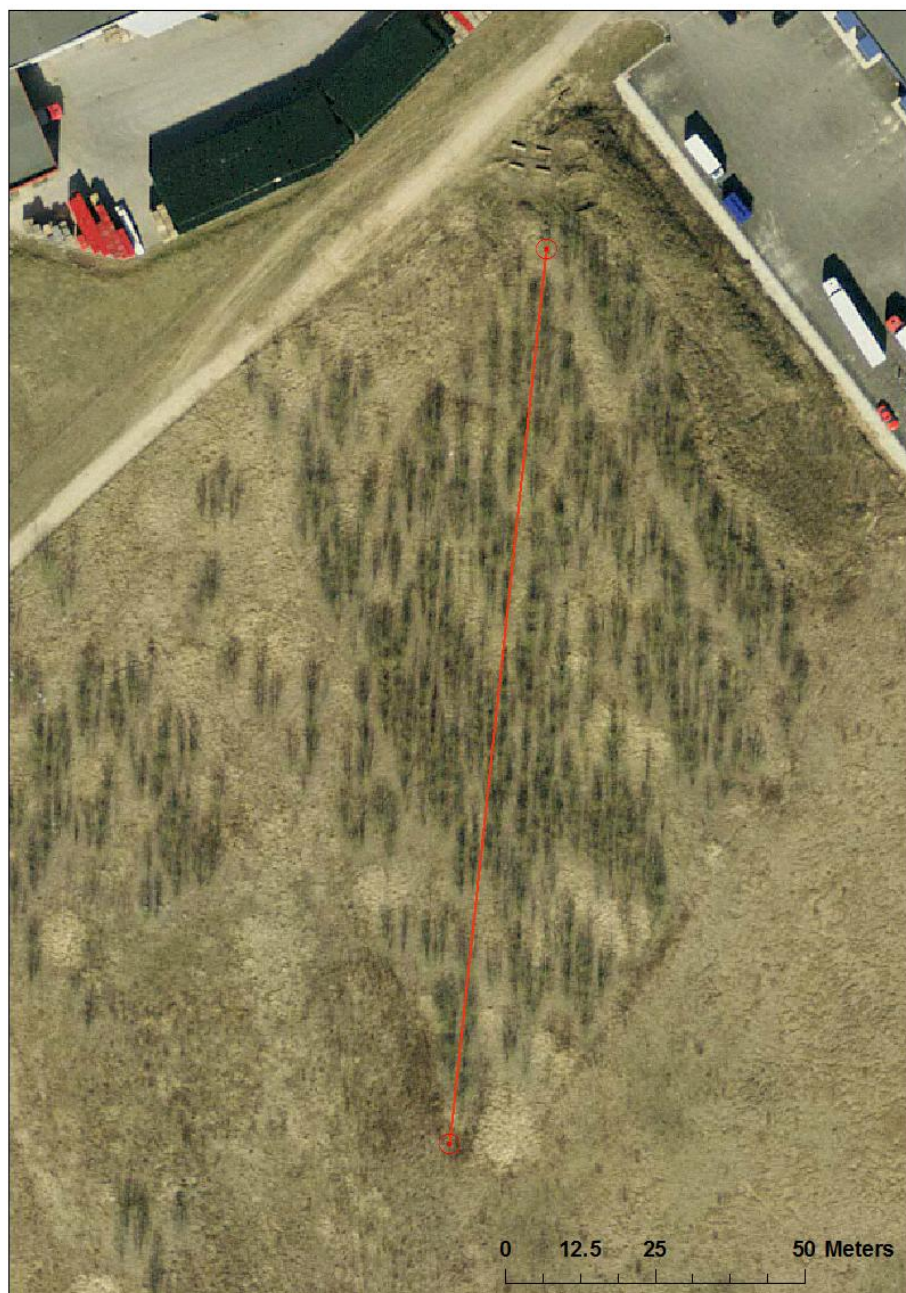
Lisa 5. Ortofoto Raadi lennuvälja katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond. Raja alguspunkt on põhjapoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maa-amet 2014.



Lisa 6. Ortofoto Vahi katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond. Raja alguspunkt on lõunapoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maaamet 2014.



Lisa 7. Ortofoto Tähtvere katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond. Raja alguspunkt on lõunapoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maa-amet 2014.



Lisa 8. Ortofoto Soinaste katsealast, mille alusel katsealused läbisid raja. Punase sirgjoonega on tähistatud ideaalteekond. Raja alguspunkt on idapoolne sirgjoone otspunkt. Ortofoto Maaamet 2014.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mart Randmäe,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Võsastunud ala läbitavus jalgsi liikuja näite“,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Tõnu Oja,

(juhendaja nimi)

- 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, **23.05.2016**

