



Anti Kasuk

**MOBIILSE LASERSKANEERIMISE KASUTAMINE
LIIKLUSMÄRKIDE ASUKOHA TÄPSUSTAMISEKS EESTI
TEEREGISTRIS**

LÕPUTÖÖ

Logistikainstituut
Juhendaja: Tarvo Mill

Tallinn 2024

Mina,

Anti Kasuk,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Tarvo Mill, /allkirjastatud digitaalselt/

Lõputöö on kaitsmisele lubatud logistikainstituudi direktori korraldusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anti Kasuk,

sünnikuupäev: 03.02.1979,

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Mobiilse laserskaneerimise kasutamine liiklusmärkide asukoha täpsustamiseks Eesti teeregistris“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas, /allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

LÜHENDID JA MÕISTED	2
SISSEJUHATUS.....	4
1 TEEREGISTRI OLEMUS.....	6
1.1 Liiklusmärkidega seotud andmed teeregistris.	7
1.2 Teeregistri aadress-süsteem.....	10
2 MOBIILSE LASERSKANEERIMISE TÖÖPÕHIMÕTE.....	13
2.1 Trajektooride töötlemise alused	14
3 KASUTATUD TARKVARA JA ALGORITMID	17
3.1 Kasutatud tarkvara.....	17
3.2 Kasutatud masinõppe lahendused	18
3.1 Olulisemad punktipilve töötlemis algoritmid.....	19
3.2.1 Simuleeritud kanga filter (CSF)	19
3.1.1 Ühendatud komponentide märgistamise algoritm.....	22
4 SEADMESTIK JA METOODIKA	24
4.1 Mobiilne laserskanner	24
4.2 Geinfosüsteemi loomine.....	26
4.3 Mobiilse laserskanneri andmetöötlus	28
4.4 Punktipilvede ettevalmistamine masinõppeks	30
4.5 Masinõppe mudelite koolitamine ja mudeli testimine.	31
4.6 Tuvastatud liiklusmärkide asukohtade kontrollimine	37
5 TULEMUSED, JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD.....	40
5.1 Masinõppe treenigu protsessi analüüs.....	40
5.2 Masinõppe treeningprotsessi analüüsi tulemused	40
5.3 Tuvastatud ja tuvastamata liiklusmärkide analüüs ja järeldused	42
5.4 Tuvastatud liiklusmärkide asukohaline täpsus	44
5.5 Teeregistrile sobilike asukoha kirjete loomine.....	44
KOKKUVÕTE.....	46
SUMMARY	47
VIIDATUD ALLIKAD.....	48
LISAD	50

LÜHENDID JA MÕISTED

2D	Kahemõõtmeline
3D	Kolmemõõtmeline
Andmeandja	Andmekogusse andmeid andev isik või haldusorgan
CORS	(ik. Continuously Operating Reference Station) Pidevalt töötav Globaalse Satelliit Navigatsiooni tugijaam, mis pakub asukohateavet
EHAK	Eesti haldus ja asustusjaotuse klassifikaatorid
GIS	(ik. Geographic information system) Geoinfosüsteem ruumiliste andmete haldamiseks
GNSS	(ik. Global navigation satellite system) Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem
GBDT	(ik. Gradient Boosted Decision Trees) Gradiendiga võimendatud otsustuspuud
GPKG	(ik. GeoPackage) Avatud platvormist sõltumatu ja standarditel põhinev andmevorming geograafiliste infosüsteemide jaoks
IMU	(ik. Inertial Measurement Unit) Inertsiaalandur, mis koosneb kiirendusandurist ja güroskoopandurist. IMU andmed on sisendiks Inertsiaalsele navigatsioonisüsteemile
INS	(ik. Inertial Navigation System) Inertsiaalne navigatsioonisüsteem
KF	Kalmani filter
LAZ	Kadudeta tihendatud laserskaneerimise punktipilve andmed
L-EST97	Eestis kehtiv tasapinnaliste ristkoordinaatide süsteem
LIDAR	(ik. Light Detection and Ranging) Kaugseiretehnoloogia, siinjuures käsitletud kui laserskaneerimise tehnoloogiat
MLS	Mobiilne laserskaneerimine
Octree	Hierarhiline andmestruktuur, mis jagab ruumi väiksemateks kaheksandik kuubikuteks
PPS	(ik. Points Per Second) Impulss sekundis
PPK	(ik. Post Processed Kinematic) Järel töödeldud Kinemaatika mida kasutatakse satelliitnavigatsioonisüsteemi vigade korrigeerimiseks
RF	(ik. Random Forest) Otsustusmets
RIHA	Riigi infosüsteemi haldussüsteem
RINEX	(ik. Receiver Independent Exchange Format) Vastuvõtjast sõltumatu vahetusformaad
RTK	(ik. Real Time Kinematic) Reaalajas kinemaatika positsioneerimis meetod mida kasutatakse satelliitnavigatsioonisüsteemi vigade korrigeerimiseks.
Vabavara	Tarkvara mida saab piiranguteta kasutada, muuta ja uurida

WMS	(ik. Web Maps Service) Veebi teenus geoinfo edastamiseks rastergraafikana
WFS	(ik .Web Feature Service) Veebi teenus geoinfo edastamiseke vektor kujul

SISSEJUHATUS

Transpordiamet on Teeregistri põhimäärusest tulenevaid Teeregistrisse kantavaid tee andmeid laiendanud ning viimases Riigi infosüsteemide haldussüsteemis RIHA avaldatud Teeregistri spetsifikatsioonis on kirjeldatud mitmeid täiendavaid tabeleid mida saab seostada liiklusmärkide asukohtadega [1], [2].

Täpne ja kvaliteetne liiklusmärkide asukoha info üleriiklikus keskselt hallatavas ning avaandmetena kättesaadavaks tehtuna loob võimaluse parandada liikluskorraldust ning liikuvuse planeerimist. Lisaks annab liiklusmärkide registri korrastamine võimaluse luua teeomanike ülevaade olemasolevatest liikluskorraldusvahenditest. Täpsed liiklusmärkide asukohad on eelduseks, et andmestiku saaks võtta kasutusele erinevates liikuvuse ja liiklusega ning taristuehitusega seotud valdkondades. Täpne liiklusmärkide asukoht saab olla aluseks iseseisvate sõidukite koolitamiseks simulatsiooni keskkondades, lihtsustab logistikute ning liikluskorraldajate tööd ja võimaldab kasutusele võtta navigatsioonilahendused milles on paremini kajastatud liiklusmärkidega kehtestanud liikumiskord.

Enamus Eesti riikliku Teeregistrisse kantud liiklusmärkide asukoht on saadud sõidukile paigaldatud teepikkusmõõturiga või siis lihtsa GNSS seadmega mõõtmise tulemuste teeteljele projitseerimisel. Tulemuseks on andmestik, millel märkide asukohad on tihti märgitud registrisse suure asukohalise veaga.

Teeregistrisse kantud liiklusmärkide info on osaliselt puudulik ning riigiteede lõikes teepiirkondade kaupa erineva kvaliteedi ning uuendamise sagedusega. Kohalike omavalitsuste avalikult kasutatavate teede puhul on liiklusmärkide infot kajastavad registri kirjed võetud kasutusele ainult üksikutes omavalitsustes.

Puuduliku ning vananenud andmestiku tõttu ei ole tänane teeregistri liiklusmärkide andmestik üldjuhul kasutava liikluskorralduslike otsuste tegemiseks, liikuvuse planeerimiseks ega ka navigatsiooni info täiendamiseks sobilik.

Mobiilne laserskaneerimine (MLS) on tehnoloogia, mida kasutatakse keskkonna või objektide ruumiliseks skaneerimiseks ja mõõtmiseks, kasutades liikuvat laserskannerit. Laserskanner kiirgab laserkiiri ja mõõdab nende kiirte tagasipeegeldumist objektidelt, võimaldades luua täpseid kolmemõõtmelisi mudeleid skaneeritud alast. Mobiilse laser skaneerimise peamised eelised on selle

kiirus ja paindlikkus. Mobiilne laserskaneerimine tagab piisava täpsuse planeerimistööde ja erinevate objektituvastuste läbiviimiseks.

MLS kaardistamise seadmed on tänaseks muutunud igapäevasteks töövahenditeks mitme Eestis tegutseva geodeesia ja kaardistamisega tegeleva ettevõtte jaoks.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on välja selgitada, kas AS Teede Tehnokeskuse kasutuses oleva MLS seadmestikuga kogutud toorandmetest on võimalik vabavaralisi lahendusi ja masinõpet kasutades tuvastada Teeregistrisse sobiva täpsusega liiklusmärkide asukohad. Lisaks on eesmärgiks luua prototüüplahendus liiklusmärkide asukohtade kirjade koostamiseks teeregistrisse sobival kujul.

1 TEEREGISTRI OLEMUS

Eesti riiklik teeregister on riigi infosüsteemi kuuluv andmekogu, mis on loodud vastavalt Teeregistri põhimäärusele eesmärgiga teede kohta vajalike andmete kogumiseks, töötlemiseks ning avalikustamiseks [2]. Teeregistri vastutavaks töötlejaks on täna Transpordiamet. Vastutava töötleja ülesandeks on Teeregistri majutamine, teenusete ja tehnoloogilise keskkonna haldamine ning teeregistri andmete töötlemine.

Teeregistri andmeandjateks on avalikult kasutatavate teede puhul Transpordiamet ning kohalikud omavalitused. Erateede, avalikusele ligipääsetavate erateede ning metsateede kohta võib andmeid anda teeomanik, kuid erateede registrisse kandmine ei ole kohustuslik.

Toimiva tervikliku teedevõrgu moodustamise eesmärgil kantakse tee teeregistrisse tervikteena [2]. Iga terviktee kohta moodustatakse teeregistris joonobjekt, mis peab vastama järgnevatele põhimõtetele:

- terviktee on katkematu ning algab ja lõpeb teisel tervikteel;
- ühendustee on terviktee ning algab ja lõpeb tervikteel;
- terviktee algab suuremast asulast või väiksema numbriga tervikteelt;
- tupiktee on terviktee, mille algus on teisel tervikteel.

Kohustuslikud on riigiteede ning kohalike omavalitsuste tervikteede puhul järgnevad parameetrid:

- terviktee number;
- terviktee nimi;
- terviktee asukoht kaardil koos alguspunktiga;
- teeosa kood ja pikkus meetrites ning tee kood;
- liigitus;
- haldusüksuse andmed;
- andmed kattuvate tervikteede kohta (Euroopa teedevõrgu tee number);
- suvine ja talvine seisunditase;
- andmed katte kohta – katte liik, katte laius, sõidutee laius, tugipeenra laius;
- andmed katteta tee kohta – pealiskihi liik ja tee laius;
- andmed kõnnitee;
- andmed silla, viadukti, estakaadi või tunneli kohta;

- andmed truubi kohta;
- raudteeületuskoha tüüp;
- teeregistri kande tegemise õigusakti või taotluse nimetus, number ja kuupäev;
- eratee avalikuks kasutamiseks määramise aluseks oleva dokumendi number ja kuupäev.

Teeregistri põhimäärus ei kajasta liiklusmärkide asukoha infoga seotud teeregistri andmeid. Kuid just liiklusmärkide info annaks võimaluse kasutada tervikteedel põhinevat võrgustiku erinevateks liikuvuse planeerimise ülesannete lahendamiseks. Näidetena võib tuua ühistranspordi planeerimise, suuremõõtmeliste vedude logistika ning mikro ja makro tasandi liiklusvoogude mudeldamised, mis kõik vajavad täpset infot.

Lisaks põhimääruses nõutud kohustuslikele andmetele, sisaldab kasutuses olev teeregistri versioon mitmeid erinevaid teede halduseks ja planeerimiseks vajalike täiendavaid andmestike. Info teeregistri avaandmete kohta leiab Riigi infosüsteemi haldussüsteemis (RIHA) avaldatud „Teeregistri spetsifikatsioonis“ [1].

1.1 Liiklusmärkidega seotud andmed teeregistris.

Liiklusmärkidega seotud info on Teeregistri veebiliidese andmemudelis esitatud tabeli kujul mille struktuuri näide on toodud, (Tabel 1). Liiklusmärkidega seotud andmestik võimaldab määrata 2D kujul märkide kanduri asukoha tee teljel ja lisada kanduri asukohale kuni kaheksa liiklusmärgi kirjed. [3]

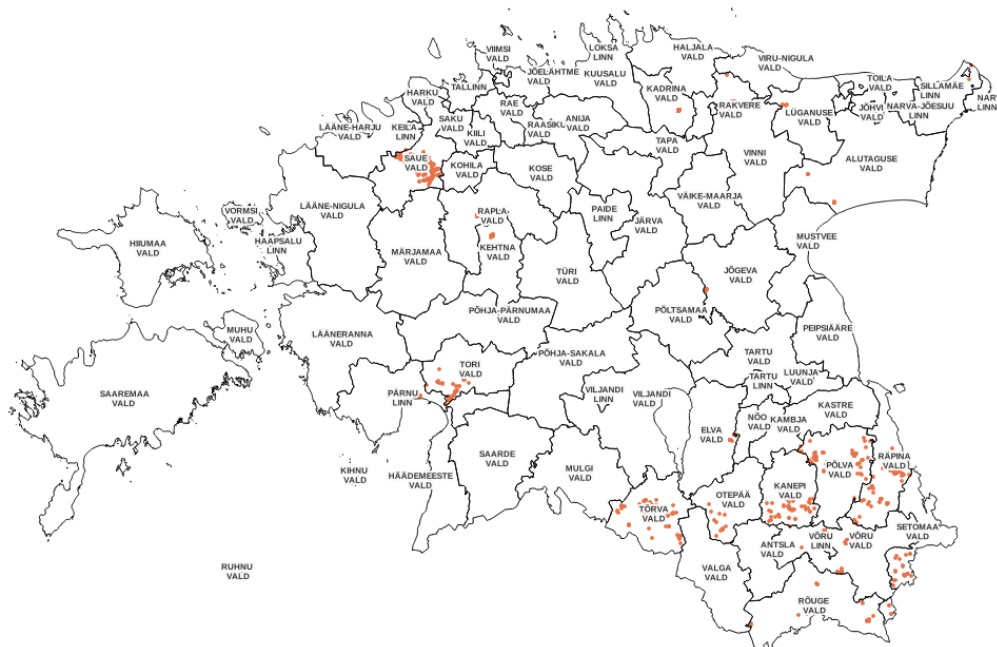
Tabel 1. Näide teeregistris liiklusmärkidega seotud infoväljadest „n_kandur“ [4]

Elemendi nimi	Elemendi tüüp	Selgitused
msGeometry	geometry	Point
tee_number	integer	Tee number, millel nähtuse objekt paikneb
tee_nimi	string	Tee nimi, millel nähtuse objekt paikneb
soidutee_nr	integer	Sõidutee number (1 - pärisuund, 2 - vastasuund)
km	double	Nähtuse objekti kaugus tee algusest km-tes
teeosa	integer	Teeosa number, millel antud nähtuse objekt paikneb
teeosa_meeter	integer	Nähtuse objekti kaugus teeosa algusest meetrites
lmpool_lmpool_xv	string	Liiklusmärgi kanduri asukoht (klassifikaator)
lmpool_lmpool_val	string	Liiklusmärgi kanduri asukoht (nimetus)
post	integer	Posti number
asuk_kirj	string	Asukoha kirjeldus
markus	string	Märkus
oid	longinteger	Nähtuse objekti unikaalne identifikaator süsteemis
tee_oid	longinteger	Viit tee objektile
teeosa_oid	longinteger	Viit alguse teeosa objektile
muudetud_kpv	date	Viimase muudatuse kuupäev
lm1	string	Liiklusmärgi 1 number
lm1_lmsuhe_lmsuhe_xv	string	Liiklusmärgi 1 suurusgrupp ja seisukord
lm1_tekst	string	Liiklusmärgi 1 tekst

Teeregistri andmemudelist võime leida ka andmeväljad kiiruspiirangute alguste ja lõppude kohta ning autobussi peatuste asukohad. Kiiruspiirangute algused on liiklusseaduse kohaselt tähistatud liiklusmärkidega. Kiirusepiirangute lõpud on tähistatud kas uue märgiga või piirangu alguses olnud märgi lisatahvliga. Autobussi peatustes on valdavalt olemas peatuste nimedega märgid.

Eelpool viidatud võimalikud märkide asukohad peaksid kajastuma teeregistri andmetabelis „n_kandur“ konkreetsete märkidena.

Kuna liiklusemärgid kirjeldavad andmeväljad ei ole teeregistris kohustuslikud, siis Teeregistri WFS teenuse andmete kohaselt on märkide asukohtade kirjeldamist võimaldavad tabelid võetud osaliselt kasutusele ainult üksikutes omavalitustes (Joonis 1) [4]. Riigiteedel on teeregistri liiklusemärkide kanded piirkonniti erineva kvaliteediga ning märgi asukohtade uuendamine ei toimu järjepidevalt. Eelnevast tulenevalt on kasutusel oleva teeregistri liiklusemärkide info avalikult kasutatavat teede võrku vaadates ebaühtlase kvaliteedi ja kvantiteediga ning ei ole olemasoleval kujul kasutatav liikuvuse ülesannete lahendamiseks ja liikluskorralduse planeerimiseks.



Joonis 1. Omavalituste poolt teeregistris registreeritud märgid seisuga 05.12.2023

Näiteks toimivast liiklusemärkide andmekogust saab tuua Soome Transpordi Infrastruktuuri Ameti poolt hallatava Digiroad andmebaasi koos oma geoinfosüsteemidega [5]. Soome Digiroad-i WMS teenuse märkide info GIS-is ning märkide asukoha info Google Earth rakenduses Google StreetView vaates (Joonis 2).



Joonis 2. Vasakul Soome Digiroad andmed WMS teenusena. Paremal samad andmed Google Earth rakenduses Google Street View vaates. Märkide asukoht teeteljele välja toodud punase ringina.

1.2 Teeregistri aadress-süsteem

Teeregistri aadress-süsteem on aluseks teid iseloomustavate andmete asukoha määramisel looduses ja andmete andmebaasi sisestamisel. Tee on oma iseloomult joonobjekt ning kõik andmed kantakse teeregistrisse seotuna tee teljega. Tee teljele on kindel suund tee algusest tee lõppu.

Juhul kui sõidusuunad on füüsilise takistusega (muru või sillutisega kaetud eraldusriba, piire vmt) eraldatud, on tegemist kahe sõiduteega teega, kus mõlemal sõiduteel võib olla üks või mitu sõidurada – näiteks nn 2+2 või 2+1 teed.

Sõidutee koodid kahe sõiduteega teel või teelõigul:

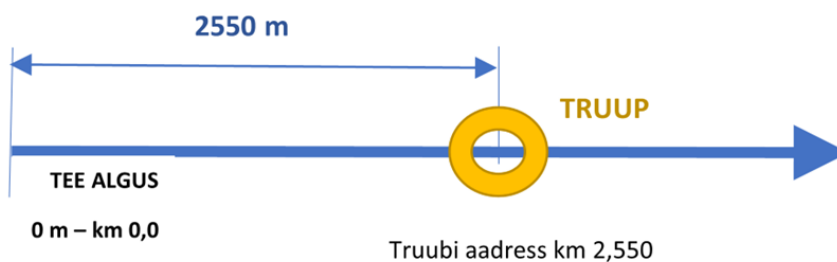
- kood 1 – parempoolne sõidutee tee kulgemise suunas;
- kood 2 – vasakpoolne sõidutee tee kulgemise suunas. [6]

Andmete esitamisel teeregistrisse peab arvestama teeregistri aadress-süsteemiga. Lisaks eelpool kirjeldatud terviktee joonobjektidele, mis moodustavad tervikliku teedevõrgu, jagatakse tervikteed teesadeks.

Teesade kasutamine hõlbustab aadress-süsteemi kasutamist välitöödel, inventeerimisel ning tööde planeerimisel. teesad algavad ning lõppevad jaotuspunktides, mis reeglina algavad ristumistelt teiste teedega. Erandina on tupikteed, mis lõppevad tee lõpus või õueala piiril. [6]

Teeregistri liiklusmärkide andmetabel on aadress-süsteemi kohaselt punktandmete kogu. Punktandmete puhul tuleb andmed esitada, vastavalt teeregistri juhendile, lähtuvalt järgnevast

põhimõttest: „Punktoobjekti - sild, truup, bussipeatus, liiklusmärk, liiklusõnnetus jmt – puhul määrab asukoha kaugus tee algusest“ [6] (Joonis 3).



Joonis 3. Punktoobjekti aadressi määramine [6]

Teeregistris on teeosad kajastatud andmetabelis „teeosa”. Andmetabel „teeosa” koos selgitustega on esitatud tabelis (Tabel 2).

Tabel 2. Teeregistri andmetabel „teeosa” koos selgitustega

Elemendi nimi	Elemendi tüüp	Selgitused
msGeometry	geometry	LineString
tee_number	integer	Tee number
nimi	string	Tee nimi
soidutee_nr	integer	Sõidutee number (1 - pärisuund, 2 - vastassuund)
jrknr	integer	Teeosa jrk nr tee algusest alates
m_aadress	integer	Teeosa algus tee algusest meetrites
pikkus	integer	Teeosa pikkus meetrites
kasitlusviis_xv	string	Teeosa käsitusviis (klassifikaator)
kasitlusviis_val	string	Teeosa käsitusviis (nimetus)
suund_soidusuund_xv	string	Sõidusuund (klassifikaator)
suund_soidusuund_val	string	Sõidusuund (nimetus)
on_arvestuslik	string	Tunnus, kas tegemist on teeregistri mõttes arvestusliku teosaga (true / false)
on_katkestus	string	true – sõidutee esimene teeosa ei alga 0-meetrilt; false – sõidutee esimene teeosa algab 0-meetrilt või ei ole tegemist esimese teeosaga sõiduteel
tee3	integer	Teeosa kood: tee_number + sõidutee + teeosa

Elemendi nimi	Elemendi tüüp	Selgitused
geom_pikkus	double	Tee ruumikuju pikkus meetrites cm täpsusega
oid	longinteger	Teeosa unikaalne identifikaator süsteemis
tee_oid	longinteger	Viit tee objektile
muudetud_kpv	date	Viimase muudatuse kuupäev

Andmete adresseerimiseks teeregistris fikseeritakse tee number, sõidutee kood, teeosa number ja kaugus teeosa algusest. Juhul kui andmeid ei edastata tabeline kasutatakse adresseerimisel välja eraldajana all kriipsu. Näiteks teel numbriga 11340, parempoolsel sõiduteel, teeosal 3, teeosa meetril 1011 asuva liiklusmärgi aadressi kirjeldamiseks võib kasutada järgnevat kirjet 11340_1_3_1011. [6]

Punktandmete adresseerimisel on oluline arvestada, et väljad „pikkus” ja „geom_pikkus” ei ole alati sama väärtusega. Sellest tulenevalt peab punktandmete projitseerimisel teeteljele ning kannete tegemisel teeregistrisse, vajadusel arvestama teeosa väljade „pikkus” ja „geom_pikkus” suhtega.

Teeregistri andmetabelisse „n_kandur“ asukoha andmete kandmiseks on minimaalset vaja esitada järgnevad andmed:

- tee_number,
- soidutee_nr,
- teeosa,
- teeosa_meeter,
- lmpool_lmpool_xv.

Klassifikaatoril lmpool_lmpool_xv võivad olla omakorda järgnevad väärtused:

- 1– kandur paremal pool teed,
- 2– kandur vasakul pool teed,
- 3– portaal tee kohal,
- 4– kandur tee keskel,
- 5– kandur tee lõpus.

2 MOBIILSE LASERSKANEERIMISE TÖÖPÕHIMÕTE

Mobiilne laserskaneerimine (MLS) on suhteliselt kiire ning paindlik laserskaneerimise meetod, mille käigus saadakse 3D punktipilv. MLS süsteem koosneb minimaalselt ühest laserskaneerimis seadmest ning asukohta määravast GNSS/INS süsteemist. Meetod võimaldab koguda ruumilisi andmeid maastiku ja objektide kohta, kasutades liikuvat sõidukit, millele laserskaneerimis seade on paigaldatud. Mobiilse laserskaneerimise abil saab kaardistada maanteid ja liiklusmärke ning muid ruumilisi objekte, mis jäävad seadme tööulatusse.

Kaardistamise tööde jaoks piisab üldjuhul MLS seadmest, mille kaugusmõõde täpsus jääb vahemiku $\pm 3 - 4$ cm ning GNSS/INS seade suudab pakkuda horisontaalset täpsust $\pm 0,01-0,30$ m.

Teeregistri mõõtmisloogika kohaselt piisab liiklusmärgi asukoha teetelje täismeeetrile projitseerumiseks horisontaalsest täpsusest alla $\pm 0,5$ m ning rahuldavaks võib lugeda asukohalist täpsust kuni ± 1 m.

Toimiva MLS-i jaoks liiklusmärkide asukohtade tuvastamiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused:

- MLS peab olema võimeline teostama mõõtmisi liiklusvoogu sobiva kiirusega ning taluma vibratsiooni ja temperatuuri muutusi;
- MLS peab olema kalibreeritud vastavalt tootja juhiste ja georeferentseeritud, et tagada andmete õige asukoht;
- sõiduki teekond tuleb planeerida selliselt, et optimaalse läbikuga oleks kaetud kogu kaardistatav ala;
- sõiduki kiirus peab olema kooskõlas soovitud andmete kvaliteediga;
- skaneerimise ajal peab jälgima skanneri ja GNSS/INS seadme tööd ja vältima takistusi või häireid, mis võivad mõjutada andmete usaldusväärsust;
- MLS välitööde programm peab lõpetama andmete salvestamise ja sulgema korrektselt failid;
- Laserskaneerimis ja GNSS/INS andmed tuleb üle kanda arvutisse edasiseks töötlemiseks ja analüüsiks.

Liiklusmärkide asukoha andmed tuleb kontrollida ja vajadusel täpsustada järeltöötusega. Andmed tuleb puhastada müra ja ebaolulistest objektidest ning ühendada punktipilveks.

Peale georeferentseeritud punktipilve moodustamist saab tuvastada ja klassifitseerida soovitud objektid, kasutades spetsiaalseid algoritme, statistilisi mudeleid või masinõppe lahendusi.

Lõpuks saab genereerida kaardid või registri tabelid, mis näitavad liiklusmärkide asukohta.

2.1 Trajektoorie töötlemise alused

Töös kasutatav MLS seade kasutab asukoha määramiseks Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteemi (GNSS) ja Inertsiaalne navigatsioonisüsteem (INS) seadet. GNSS seadme satelliitsignaali vastuvõtmine võib olla ehitistest ning looduslikest oludest häiritud. Kõrged hooned ja puud varjavad satelliidi signaali või põhjustavad signaalide peegeldumisi. GNSS signaali puudumise ajal saab seade kasutada INS-i seadme liikumise trajektoori määramiseks. INS kasutab trajektoorie määramiseks kalde ning kiirenduse andmeid. Pikaajalisel GNSS signaali puudumisel hakkavad INS-i positsioneerimisvead kuhjuma. INS töötab põhimõttel, kus mõõdetakse kiirendust ja kaldeid, mis seejärel integreeritakse aja suhtes, et saada kiirus ja asukoht. Iga väike mõõtmisviga kiirenduses või kalletes kuhjub aja jooksul, põhjustades suuremaid kõrvalekaldeid tegelikust trajektoorist. Lisaks mõõtmisvigadele on kõigis seadmetes ka algoritmilased piirangud. Aeg, kiirendused ja nurgad mõõdetakse kindlate piiratud auväärsustena ning matemaatiliselt tekivad väiksed vahed arvutatud ja tegeliku asukoha vahel. Täiendavaks vea allikas on ka keskkonnatingimused milles INS seade peab töötama. Tulemust võivad oluliselt mõjutada vibratsioon ja järsud löögid. Täpsemate tulemuste saamiseks tuleb GNSS ja INS asukohad ühtlustada ühtseks asukoha infoks.

Liikuva süsteemi trajektoori hindamiseks saab kasutada Kalmani filtrit (KF). MLS-i puhul on KF rekursiivne protsess, mis määrab koordinaadi ja asendi ajahetkel, võttes arvesse varasemaid mõõtmisi ning hetkel tehtavaid mõõtmisi [7].

Trajektoori silumine järeltöötlusega on vajalik kuna GNSS signaali katkestuse ajal võib trajektoor hakata triivima. Triivimine on INS-seadmetes esinev kumulatiivne viga, mis tekib aja jooksul kui süsteemi ei kalibreerita vahepeal väliste andmetega. Aja jooksul võivad väiksed mõõtmisvead ja algoritmilased vead summeeruda ja selle tulemusel saadakse vale asukohahinnang. Kui MLS trajektooris kasutada GNSS signaali katkestuste järeltöötluse käigus KF silumist, siis saadakse ühtlane üleminek.

Järeltöötlusega saavutatakse GNSS/INS seadme loogiline ja õigem sõidutrajektoor (Joonis 4).

Trajektoori PPK tulemust võib eelpool kirjeldatu tõttu pidada täpsemaks, kui GNSS-RTK andmetel põhinevat trajektoori, kuna RTK puhul pole satelliitide täpsed orbiidiandmed, satelliitide kellad ja mõõtmise asukohal olnud atmosfääri andmed teada [8].



Joonis 4. Lillaga on kujutatavad GNSS/INS trajektoori. Kollasega PPK töötuse läbinud GNSS/INS trajektoori

Kaardistamiseks kasutatavate GNSS/INS vastuvõtjate asukohamäärangu täpsusklassid on toodud (Tabel 3).

Tabel 3. Kaardistamise ehk GIS-vastuvõtjate asukohamäärangu täpsused [9]

Vastuvõtja funktsionaalsus	Absoluutne asukohamäärang (m)	Reaalaja paranditega mõõtmine (DGNSS, SBAS või RTK/RTN) (m)	Staatiline/kinemaatiline mõõtmine järeltöötusega (m)
L1 koodi mõõtmine	1–5	0,5–5,0	0,3–5
L1 koodi ja faasi mõõtmine	1–5	0,5–3	0,2–1
L1/L2 koodi ja faasimõõtmine	1–5	0,05–0,5	0,01–0,5
Mitmesageduslik GNSS-vastuvõtja	1–5	0,01–0,5	0,01–0,3
* Tabelis toodud suur täpsuse vahemik sõltub vastuvõtjast, satelliitide arvust ning keskkonnast, kus mõõtmisi tehakse.			

Lihtsustatult on GNSS/INS trajektoori järeltöötluse protsess järgmine:

1. laetakse seadmest alla GNSS ja INS andmed;
2. laetakse alla CORS jaamade vaatlusandmed ning võimalusel CORS jaama ilmastikuandmed;
3. laetakse alla satelliitide orbiidiandmed;
4. laetakse alla globaalsed ilmastiku ja atmosfääri kihtide andmed;
5. määratakse MLS seadme antenni parameetrid;
6. valitakse sobiv INS tasandus algoritm lähtuvalt kasutavast sõidukist;
7. valitakse sobiv GNSS/INS parandi arvutamise lahendus;
8. teostatakse trajektoori järeltöötlus;
9. kontrollitakse tulemusi ja vajadusel muudetakse näiteks baasjaama, baasjaamade võrgustikku või vahetatakse parandi algoritmi, et saada õigem tulemus.

3 KASUTATUD TARKVARA JA ALGORITMID

3.1 Kasutatud tarkvara

Lõputöö üheks eesmärgiks oli luua üldtuntud avatud lähtekoodiga ja vabavaralisi lahendusi kasutav lihtne prototüüplahendus, mida on võimalik kasutada AS Teede Tehnokeskuse MLS toorandmetega ning teiste analoogsete MLS toorandmete viimiseks teeregistri liiklusemärgi asukoha kandeks.

Tarkvara valiku oluliseks kriteeriumiks oli käsurea toe olemasolu. Käsuri tagab võimaluse lihtsate vahenditega liidesteta punktipilvede klassifitseerimine ning liiklusemärkide asukohtade tuvastamine olemaseolevasse punktipilve töötamise andmevoogu. GNSS/INS seadme trajektoore töötlemiseks kasutati SBG Systems tarkvara Qinertia PRO Version 3.4.304-stable ning punktipilvede loomiseks tarkvara EyeVi SuperScript.

Laserskaneerimise andmekorjeks oli kasutusel tarkvara EyeVi DataCapture ning andmete kontrollimiseks EyeVi Street-U mobiilse kaardistamise veebikeskkond.

Punktipilve peamiseks töötlemiseks valiti vabavaraline tarkvara CloudCompare 2.13.alpha, millel on olemas käsurea tugi. CloudCompare põhineb vabavaralisel avatud lähtekoodil CCCoreLib tarkvara arenduse teegil, mis omakorda annab võimaluse perspektiivis arendada välja lahendus MLS andmete töötlemiseks.

Punktipilve klassifitseerimise tarkvara valikul töötati läbi Toronto-3D andmestikus kasutatud klassifitseerimise meetodid ja tarkvara lahendused ning 2023 aastal UAV4GEO poolt avaldatud punktipilve klassifitseerimise tarkvara OpenPointClass. Erinevate klassifitseerimise lahenduste juures hinnati erinevate lahenduse klassifitseerimise tulemusi mis olid saadud Toronto-3D töö raames ning võrreldi saadud tulemusi samal pilvel OpenPointClass tarkvaraga saavutatud tulemustega. Lisaks arvestati võimaliku keerukuse ja ajakuluga erinevate punktipilve klassifitseerimise lahenduste kasutuselevõtul suuremahuliste punktipilve töötlemise jaoks. Punktipilvede klassifitseerimiseks valiti olemasolevasse süsteemi kiirelt integreeritav OpenPointClass tarkvara.

Punktipilvest liiklusmärkide asukohtade määramiseks ning teeregistrile sobiva sisendfaili loomiseks kasutatakse järgnevate tarkvarade vabavaralisi käsurealt töötavaid komponente:

- CloudCompare,
- GDAL,
- Point Cloud Library (PCL),
- Point Data Abstraction Library (PDAL),
- LAStools,
- LibLAS,
- OpenPointClass,
- QGIS,
- WhiteboxTools Open Core.

Lahenduste andmetöötlusvoogu integreerimiseks kasutati operatsioonisüsteemi Ubuntu 20.04.4 LTS käsurea skripte, mis omakorda toetuvad teksti- ja tabelitöötluse käsureaprogrammidele sed ja awk ning kalkulaatorile bc.

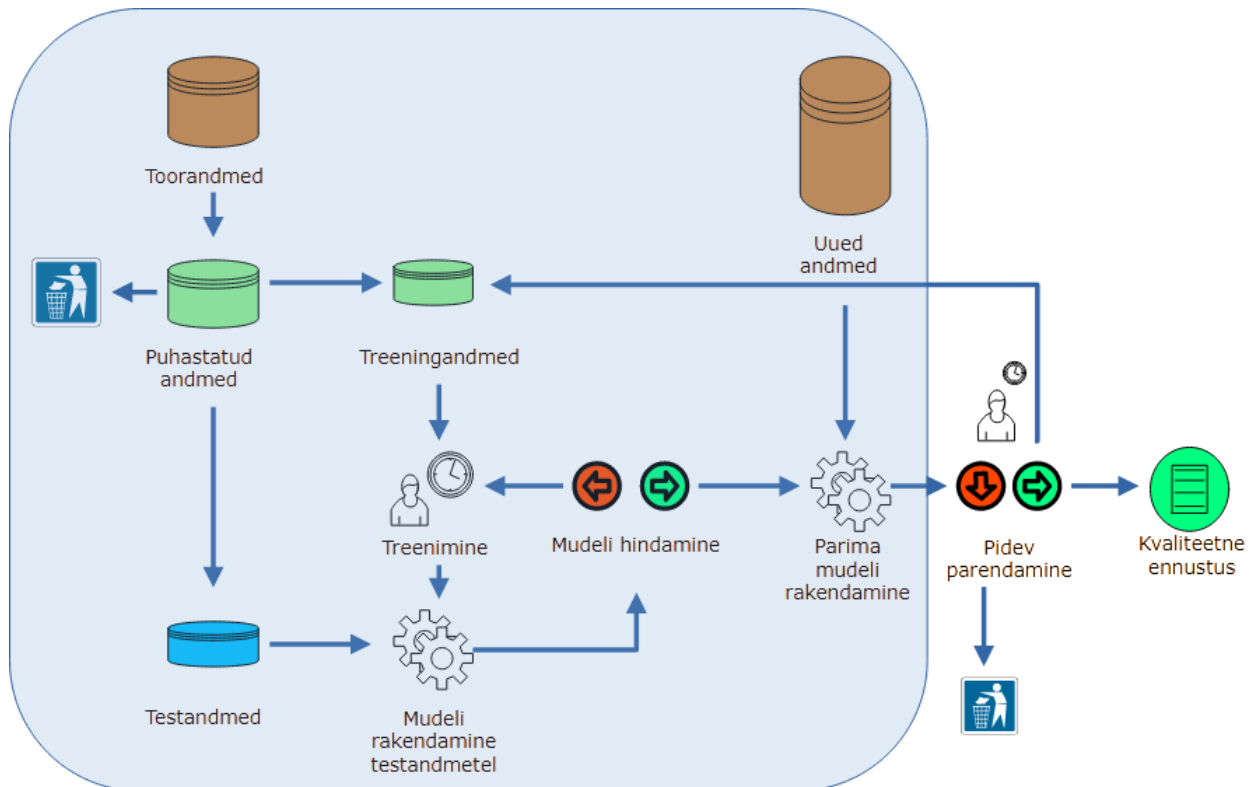
Punktipilvede testandmete klassifitseerimiseks ning tulemuste visualiseerimisel ja kontrollimistel oli kasutusel QGIS ja CloudCompare graafiline kasutajaliides.

3.2 Kasutatud masinõppe lahendused

MSL seadmega kogutud punktipilvede klassifitseerimise ülesanne, siis kiireid ning täpseid lahendusi saavad pakkuda ansambelõppel ja otsustuspuudel põhinevad masinõppe lahendused. Tarkvarapakett OpenPointClass on realiseeritud masinõppe meetoditena otsustusmets (RF) ja gradiendiga võimendatud otsustuspuud (GBDT).

Lõputöös kasutati juhendatud masinõpet (Joonis 5). Juhendatud õppe raames antakse masinõppe algoritmile eelnevalt klassifitseeritud andmestik. Masinõppe eesmärk on luua matemaatiline mudel sisestatud andmete põhjal. Masinõppe väljundiks on tõenäosuslik väärtus ehk ennustus.

Masinõppe puhul on hea mudeli loomiseks vaja leida parimad parameetrid mudelite treenimise käigus. Mudeleid treenitakse erinevate parameetritega koolitusandmete pealt. Peale esmase mudeli treenimist käivitatakse üldjuhul protsess, mille raames jätkatakse mudeli täpsustamist, lisades koolitusandmetele uusi kvaliteetseid klassifitseeritud väärtusi .



Joonis 5. Juhendatud masinõppe üldskeem

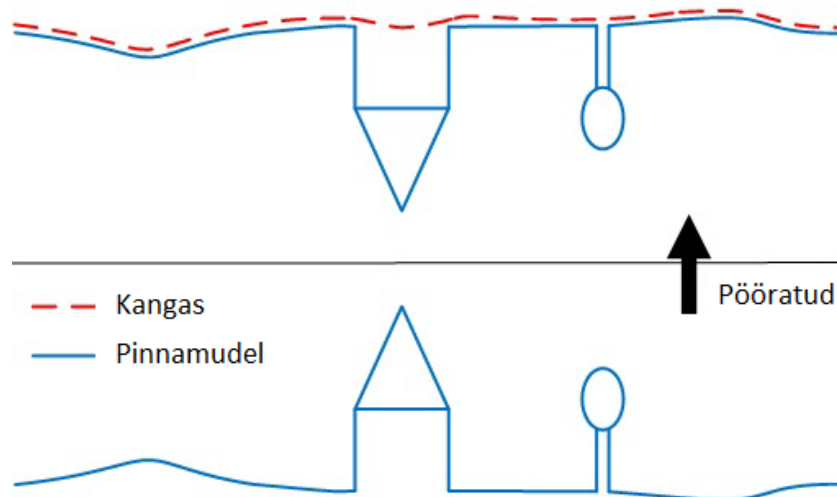
3.1 Olulisemad punktipilve töötlemis algoritmid

3.2.1 Simuleeritud kanga filter

Simuleeritud kanga filter (lk. Cloth Simulation Filter) on algoritm, millega saab eraldada ja klassifitseerida maapinda iseloomustavad punktid ülejäänud punktidest. Kuna märgid on vertikaalsed objektid, siis maapinna eraldamine vähendab liiklusmärkide klassifitseerimise protsessi käigus arvuti protsessori ja mälu kasutust ning kiirendab liiklusmärkide asukohtade tuvastamise protsessi.

Algoritmi tööpõhimõtte kohaselt asetatakse kujunduslikult punktipilvele pehme simuleeritud kangas. Kui see kangas on piisavalt pehme ning langeb gravitatsiooni jõul simuleeritud punktidele, saadakse punktipilve pinnamudel. Algoritmi tööpõhimõtte põhineb lihtsal simulatsioonil. Meetodi kirjelduse kohaselt määrab teoreetilise algse maapinna pööratud pinnamudelile asetatud määratud jäikusega kangas, mis langeb gravitatsiooni jõul (Joonis 6). Analüüsisid simulatsiooniks kasutatava teoreetilise

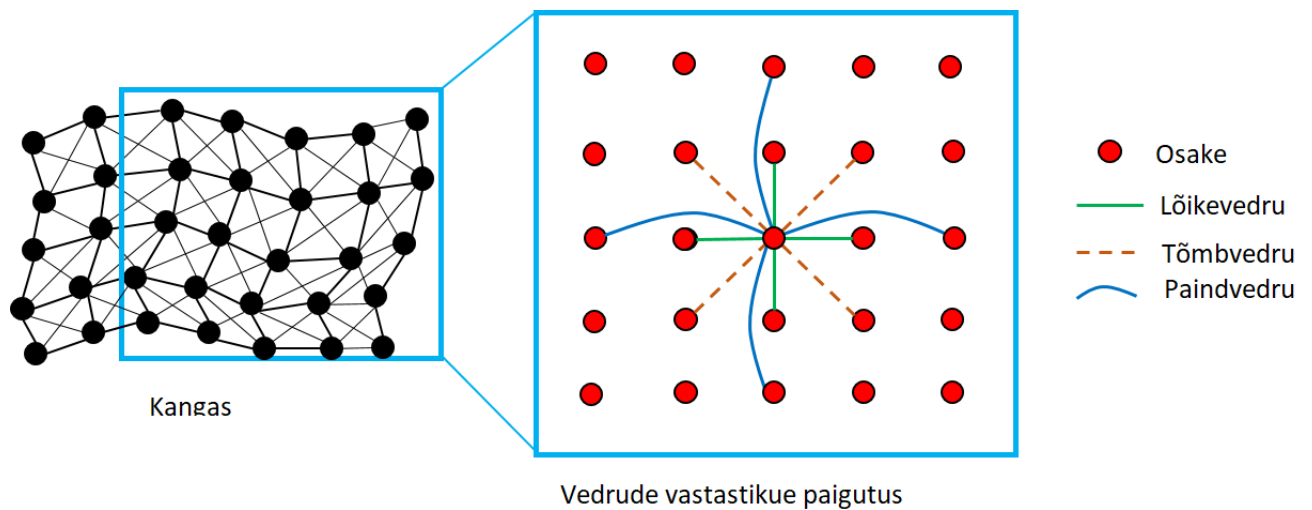
kanga sõlmpunktide ja vastava punkt pilve vahelisi seoseid. saab määrata kanga lõplikku kuju ja kasutada seda alusena punktide klassifitseerimiseks maapinnaks ja mitte maapinnaks. [10]



Joonis 6. Simuleeritud kanga filter tööpõhimõte [10]

Tehniliselt saab simulatsiooni ajal kangast modelleerida võrguna, mis koosneb massiga sõlmedest ja nende vahelistest elastsetest ühendustest. Mudeli olemuse võiks käsitleda kui mass-vedurmudelina. Võrgu sõlmedes olevatel osakestel ei ole suurust kuid on määratud konkreetne mass. Osakeste asendid 3D ruumis määravad kanga asendi ja kuju. Osakeste vahelist ühendust modelleeritakse kui virtuaalseid vedrusid, mis ühendavad kahte osakest ning alluvad Hook'i seadusele. Kanga omaduste täielikuks kirjeldamiseks on määratud kolme tüüpi virtuaalsed vedrud (Joonis 7):

- löikevedru,
- tõmbevedru,
- paindevedru.



Joonis 7. Simuleeritud kanga olem [10]

Algoritmi kasutamiseks saab kasutaja CloudCompare rakenduses implementeeritud CSF puhul sisestada järgnevad parameetrid:

- „Slop_smooth“ – nõlva silumine,
- „Cloth resolution“ – kanga resolutsioon,
- „Max iterations“ – maksimaalne simulatsioonide arv,
- „Classification threshold“ – lävend punktipilve ühikus simuleeritava kanga ning punktipilvede vaheline kaugus.

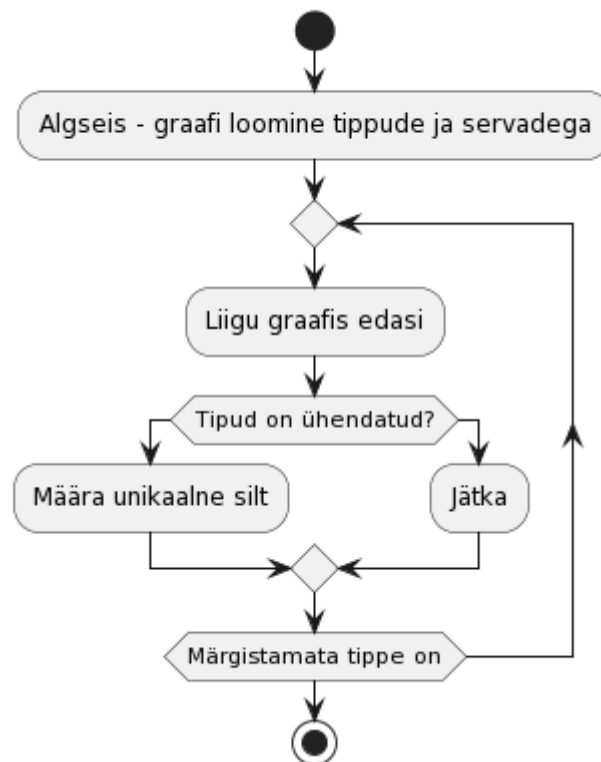
3.1.1 Ühendatud komponentide märgistamise algoritm

Ühendatud komponentide märgistamise algoritm (LCC) kasutatakse masinõppe poolt klassifitseeritud punktipilvest liiklusmärkide eraldamiseks.

CloudCompare tarkvaras on objektide segmenteerimiseks kasutusel 3D keskkonnas töötav algoritm, mis põhineb 2D ühendatud komponentide märgistamise lahendamisel 3D keskkonnas.

Ühendatud komponentide puhul 2D keskkonnas skaneeritakse binaarset pilti pikslite kaupa ülevalt alla ja vasakult paremale, et tuvastada pikslid, millel on samad väärtused. Kui see on tõene, uuritakse lähinaabrite väärtust (Joonis 8) [11].

Ühendatud komponentide märgistamise algoritm



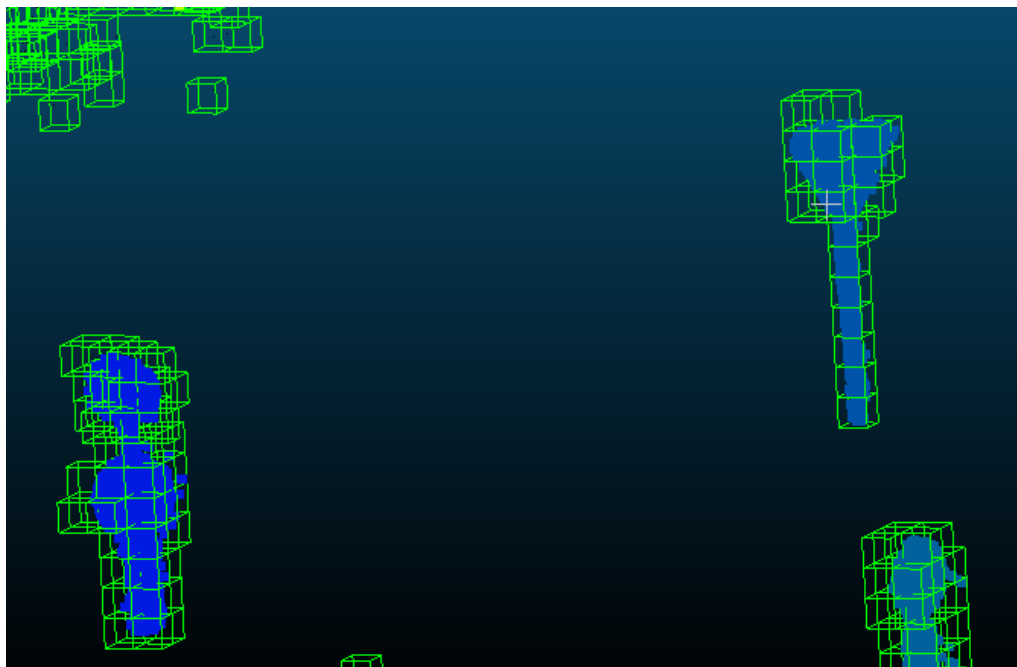
Joonis 8. Ühendatud komponentide märgistamise algoritm

Algoritmis tood loogikaga märgitakse lähinaabrid, mis ei puutu kokku teise naabriga, eraldi klassidesse. Algoritmi poolt teostatud segmenteerimise loogika on graafiliselt esitatud (Joonis 9) millel punased ruudud on eraldatud hulkadesse null kuni kolm.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	3	3	0	0
0	1	1	0	0	3	0	0
0	0	1	1	0	3	3	0
0	0	1	0	0	0	3	0
0	0	1	1	0	3	0	0
0	0	0	0	0	3	0	0
0	2	2		3	0	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Joonis 9. Ühendatud komponentide tööpõhimõtte 2D keskkonnas

CloudCompare puhul tehakse 2D keskkonnas kasutaud algoritmiga analoogne lähinaabrite võrdlemine 3D keskkonnas, kasutades pikslite asemel Octree põhimõttel määratud punktipilve osakuupe. Juhul, kui naaber octree sees on punktid, siis loetakse antud Octree piirkonnas olevad punktid elemendi osaks. Algoritmi rakendamiseks määratakse octree tase, mis määrab omakorda loodavate võrreldavate kuupide minimaalse vahe (Joonis 10). Teine komponent on minimaalne punktide arv ühes kuubis, millest väiksemat arvu loetakse 0 väärtuseks.



Joonis 10. Ühendatud komponentide kontrollimiseks kasutatavad Octree kuubid rohelisena

4 SEADMESTIK JA METOODIKA

4.1 Mobiilne laserskanner

Käesoleva lõputöö puhul kasutati laserskaneerimise andmekorjeks AS Teede Tehnokeskusele kuuluvat EyeVi Technologies OÜ poolt loodud mobiilse kaardistamise seadmestikku.

Kasutaud mobiilse kaardistamise lahendus koosneb 360° vaateväljaga kaamerast, kahe antenniga GNSS/INS seadmest, laserskaneerimis seadmest ning arvutist andmete salvestamiseks ja välitööde rakenduse kasutamiseks.

Kogu mobiilse kaardistamise seadmestik on paigaldatud alusraamiga sõiduauto katusele (Joonis 11).



Joonis 11. MLS seade paigaldanuna sõiduauto katusele

Mobiilse kaardistuskomplekti MLS lahendus põhineb VeloDyne VLP-16 LIDAR-anduril ja kahe antenniga GNSS/INS-süsteemil Advanced Navigation Spatial Dual. Kasutatavate seadmete spetsifikatsioonid on ära toodud (Tabel 4),(Tabel 5). Andurid sünkroniseeritakse teineteisega, saates kaks korda sekundis ühtlustavat aja signaali GNSS/INS-ist NMEA \$GPRMC lausega LIDAR-ile.

Mobiilse kaardistamise andmekorje käigus kogutakse EyeVi DataCapture tarkvaraga GNSS/INS ja LIDAR-i väljundid failid kõvakettale. Kettale salvestub Advanced Navigation poolt loodu Advanced Navigation Packet Protocol'i logi anpp failina ning Velodyne VLP-16 andmeväljund pcap formaadis.

Tabel 4. VeloDyne VLP-16 LIDAR spetsifikatsioon [12]

Parameeter	Väärtus
Korraga töötavad kanalid	16
Tööulatus	100 m
Täpsus	±3 cm
Vertikaalne vaateväli	30°
Horisontaalne vaateväli	360°
Vertikaalne nurkeraldusvõime	2°
Horisontaalne nurkeraldusvõime	0,1° - 0,4°
Pöörlemissagedus	5-20 Hz
Laser	Klass 1 - silmadele ohutu
Lainepikkus	903 nm
Väljund	Kuni 300000 punkti sekundis
Väljundfail	pcap mis sisaldab: - Vahemaad - Intensiivust - Pöörlemisnurkasid -GNSS-iga sünkroniseeritud aega

Tabel 5. Advanced Navigation - Spatial Dual GNSS/INS spetsifikatsioon [13]

Parameeter	Väärtus
Toetaud satelliit navigatsiooni süsteemid	GPS L1, L2, L5 GLONASS L1, L2 GALILEO E1, E5 BeiDou B1, B2
GNSS uuendus sagedus	20 Hz
Horisontaalne täpsus	1,2 m
Vertikaalne täpsus	2,0 m
Horisontaalne täpsus (RTK või PPK)	0,008 m
Vertikaalne täpsus (RTK või PPK)	0,015 m
Kiirus täpsus	0,007 m/s
Pikki ja külgskalde täpsus	0,1 °
Suuna täpsus	0,1 °
Pikki ja külgskalde täpsus (PPK)	0,03 °
Suuna täpsus (PPK)	0,06 °
Libisemistäpsus	0,1 °
Kõrgustäpsus	5 % või 0,05 m
Kuumalt initsialiseerimise kiirus	500 ms
Sisemiste filtrite sagedus	1000 Hz

4.2 Geoinfosüsteemi loomine

Tuvastatud liiklusmärkide asukoha kontrollimiseks, võrdleva analüüsi läbiviimiseks ning teeregistrile sobivale kujule viimiseks, loodi töö raames tarkvaral QGIS 3.28 ning geoandmebaasi formaadil GPKG põhinev geoinfosüsteem (GIS), mis sisaldab endas QGIS projektifaili ja lokaalseid andmebaasifaile. Kuna tegu on prototüüplahendusega andmete sisendandmete kvaliteedi kontrollimiseks ning andmete teisendamiseks, siis ei tehtud töö raames loodavale GIS lahendusele graafilist kasutajaliidest. Kõik tööks vajalikud päringud on salvestatud GPKG koosseisu kuuluvasse QGIS'i projektifaili andmebaasi päringutena.

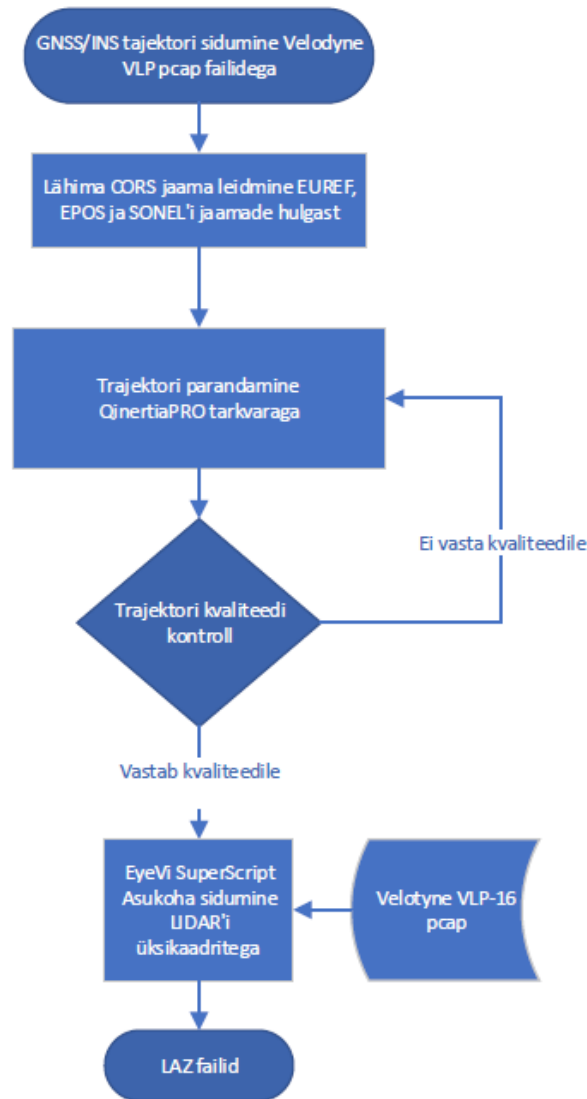
Loodud GIS lahendus sisaldab järgnevaid geoinfo kihte ning kihigruppe:

- „Märgi asukoht“ – Masinõppega leitud ja leidmata märgid punktandmetena;
- „Kontroll“ – Liiklusmärkide mõõdistamise ja GIS tööde käigus määratud asukohad punktandmetena;
- „ms:n_kandur_local“ – n_kandur täiendatud väljadega koopia;
- „ms:n_kandur“ – Transporiameti WFS teenusest punktandmetena;
- „ms:teeosa“ – Transpordiameti WFS teenusest joonandmetena;
- „Klassifitseeritud puktipilved“ – LAZ failidest teenusest punktipilvena;
- „Ortofoto“ – Maa-ameti WMS teenusest rastrina;
- „Hallkaart“ – Maa-ameti WMS teenusest rastrina.

Geoinfosüsteemi GPKG koosseisu kuuluvate tabelite kirjeldus on toodud (Lisa 6).

4.3 Mobiilse laserskanneri andmetöötlus

Kogutud MLS andmetest punktipilve moodustamiseks tuli esmalt viia läbi trajektoori täpsustamine ning LIDAR-i andmete sidumine trajektooriga. Kasutaud andmetöötluse protsessi skeem on esitatud (Joonis 12).



Joonis 12. LIDARI andmete sidumine GNSS/INS trajektooriga punktipilveks

Laserskaneerimise andmekorje käigus kogutud anpp fail sisaldab binaarsel kujul GNSS/INS infot. Vastavate skriptidega eraldatakse anpp failist mõlema antenni GNSS info RINEX kujul ja IMU logi, mis sisaldab andmeid aja, kolme-teljeliste kiirenduste, kolme-teljeliste kallete, õhurõhu ja

temperatuuri kohta ning GNSS/INS seadme poolt täpsustatud trajektoori koos aja, kallete ning kiirenduse infoga.

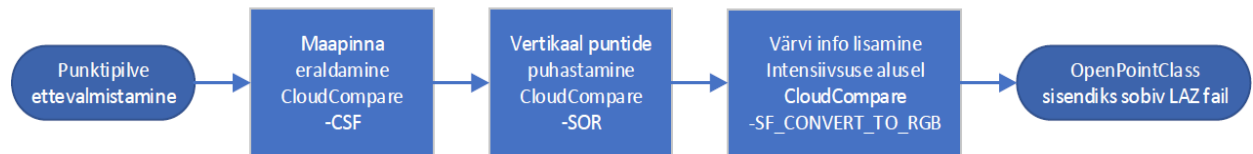
Eraldatud andmefailide põhjal teostakse trajektoori järeltöötlus tarkvaraga QInertia Pro, kasutades protsessimiseks PPK algoritmi. Saadud andmed, mis sisaldavad CORS jaamade poolt täpsustatud trajektoori asukohta, sisestatakse EyeVi SuperScripti. EyeVi SuperScripti-i tarkvaras transformeeritakse LIDAR'i pcap faili salvestatud sfäärilased polaarkoordinaadid ristkoordinaatideks [8]. EyeVi SuperScripti käivitamisel kasutatakse parameetreid, mis filtreerivad välja seadmele lähemal kui 1,7 meetrit olevad punktid ning kaugemal kui 40 meetrit olevad punktid. Kõrguslikuks korrigeerimiseks on tarkvarasse integreeritud geoidi mudel EST-GEOID2017.

EyeVi SuperScript väljastab punktipilve LAZ kujul L-EST97 koordinaatsüsteemis. Lisaks asukoha infole sisaldab väljastav LAZ järgnevaid andmevälju:

- „GPS Time“ – punkti salvestamise aeg GPS aja formaadis;
- „Intensity“ – punkti tagasipeegeldus intensiivsuse väärtused vahemikus 0-255;
- „Return number“ – lasersignaali tagasipöördumise number;
- „ChannelAngle“ – lasersignaali kiire number;
- „AzimuthAngle“ – lasersignaali kiire asimuudi nurk kraadides;
- „Distance“ – mõõdistus punkti kaugus meetrites.

4.4 Punktipilvede ettevalmistamine masinõppeks

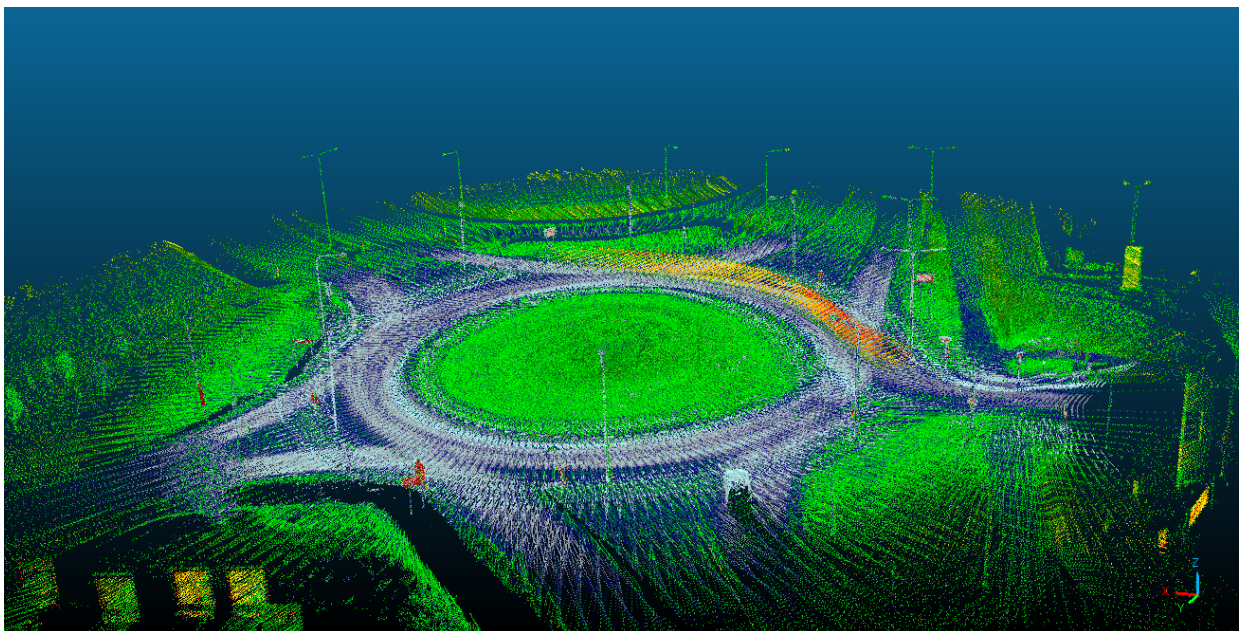
EyeVi SuperScripti väljundina saadud LAZ fail ei sobi otseselt kasutamiseks OpenPointClass tarkvaraga. LAZ failide masinõppeks ettevalmistamine toimus vastavalt allolevale põhimõtte skeemile (Joonis 13).



Joonis 13. Punktipilve ettevalmistamine liiklusmärkide klassifitseerimiseks

LAZ failid jagatakse CSF algoritmi kasutades maapinnaks maapinnast kõrgemateks punktideks. Kõrgemad punktid puhastati mõõtmis vigadest ja tolmut põhjustatud hajuspunktidest kasutades CloudCompare SOR filtrit.

Kasutatav liiklusmärkide klassifitseerimise tarkvara eeldab punktipilvelt värvi info olemasolu. Värvide lisamine teostati CloudCompare käsurealt võtmega `-SF_CONVERT_TO_RGB TRUE`. Punktipilve värvimiseks kasutati (Lisa 5) viidatud xml failis sisalduvat autori loodud värvipaleti. Punktipilv tuli seejärel salvestada LAZ formaati, mis toetab kasutajapoolseid lisaväljasid, aega ning värviinfo väljasid välja (Joonis 14). Minimaalseks valikuks oli LAZ versioon 1.2 punktiformaadiga 3 [14].



Joonis 14. Punktipilv värvitud intensiivsuse järgi

4.5 Masinõppe mudelite koolitamine ja mudeli testimine.

Masinõppe mudelite koolitamiseks ning testimiseks valiti välja kolm (Joonis 15) välja toodud erineva iseloomuga teelõiku:

- Lõik T-1, mis on põhimaantee nr 1, sõidutee 2, teeosa 2, terviktee kilomeetritel 9,410-11,048. Tegu on kahetasandilase 2+2 põhimaanteel asuva ühe suuna suunaga. Lõiku iseloomustavad suur liiklussagedus, muutuvteabega märkide (VMS) kasutamine, järsud nõlvad ning kahetasandiline ristmik. Teeregistri tabelis „n_kandur“ ei ole lõiguga seotud sissekandeid.
- Lõik T-11505, mis on kõrvalmaantee, nimetusega Vaela tee, sõidutee üks, teeosa üks, 0-1,308 km. Tegu on madala liiklussagedusega kõrvalteega, millega paralleelselt kulgeb kergliiklustee. Antud tee lõigu puhul on teeregistri tabelisse „n_kandur“ kantud 7 objekti.
- Lõik T-11340, mis on kõrvalmaantee, nimetusega Tallinn – Saku tee. Lõik hõlmab endas tee 11340, sõidutee üks, teeosa kaks ja kolm ning teeosa neli 225m ulatuses. Laserskaneerimisega kaetuks või lugeda ka tee 11340, sõidutee kaks, teeosa kolm ning rambid 3570 ja 3571. Kokku on vaadeldav lõigupikkus 6905 m. Antud tee lõigu puhul on teeregistri tabelisse „n_kandur“ on kantud 19 objekti ning lõigul asub kaks autobussi peatust.



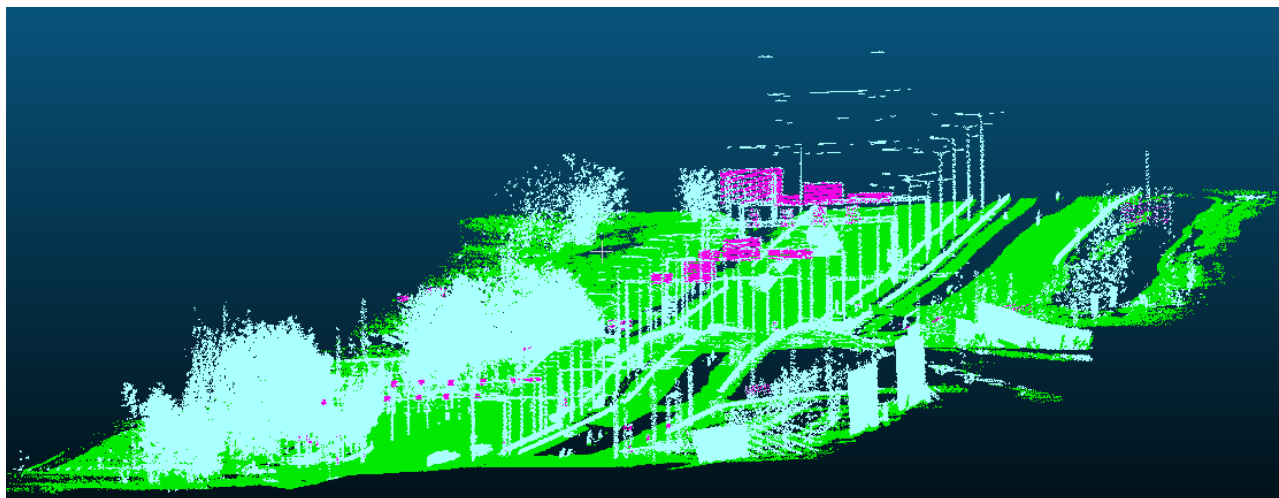
Joonis 15. Laserskaneeritud teelõikude asukohad

Masinõppe koolitamiseks teostati lõigul T-1 ning T-11505 punktipilve käsitsi klassifitseerimine CloudCompare graafilise kasutajaliidesega. Esmalt teostati punktipilvel maapinna eraldamine CSF-i abil, kasutades järgnevaid parameetreid:

- „Slope processing“ – sees;
- „Cloth resolution“ - 0,5;
- „Max iteration“ – 200;
- „Classification threshold“ - 0,2.

CSF tulemusel saadud vertikaalse punktipilve klassifitseerimiseks kasutati tarkvara põhifunktsionaalsuse alla kuuluvat interaktiivset segmenteerimistööriista. Punktipilvest lõigati välja liiklusmärgid ning saadud liiklusmärgid salvestati eraldi punktipilvedena. Peale väljalõikamist

määrati väljalõigatud punktipilvedele klassiks „22“ ning algpilvele klassiks „1“. Seejärel liideti punktipilved uuesti ühtseks klassifitseeritud punktipilveks (Joonis 16).



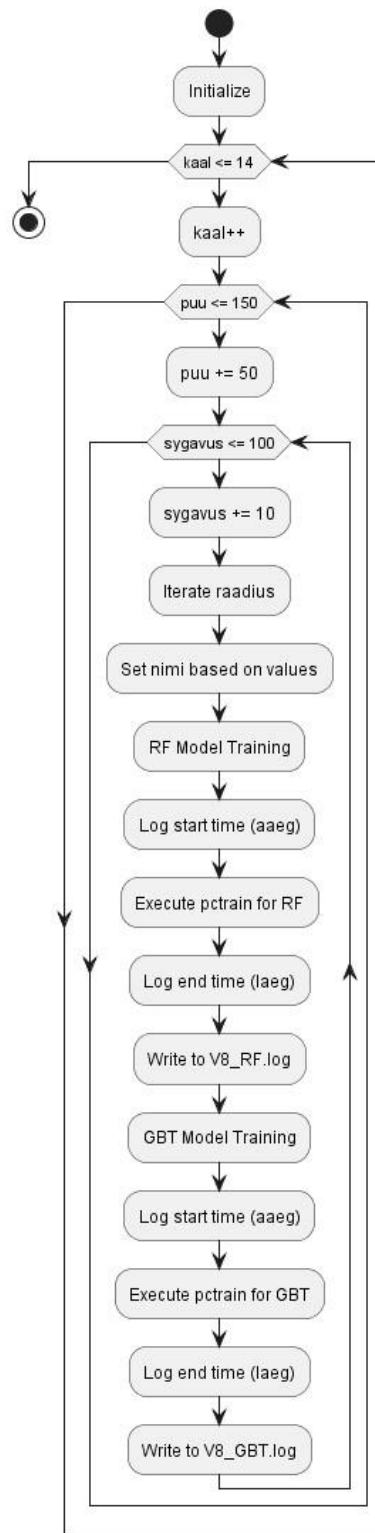
Joonis 16. Lõigul T-1 käsitsi klassifitseeritud liiklusrööpmärgid kollasega. Maapind roheline, teised vertikaalsed objektid sinise

Masinõppe treenimiseks kasutati OpenPointClass tarkvarapaketti kuuluvat pctrain rakendust. OpenPointClass pctrain võimaldab kasutada masinõppe teostamiseks RF ja GBDT algoritme. Kasutatud tarkavara sisaldab õppeprotsessi käigus mudeli kvaliteedi hindamise tööriista, mis võimaldas hinnata mudeli kvaliteeti klassifitseeritud kontrollpilve vastu.

OpenPointClass pctrain võimaldab kasutada mudeli treenimiseks järgnevaid parameetreid:

- mudeli kaalude arv,
- otsustuspuude arv,
- sügavus,
- lähinaabrite otsimise raadius.

Tulenevalt parameetrite arvust koostati mudeli koolitamiseks nelja astmeline tsükliga skript, et selgitada välja võimalikud parimad parameetrid mõlema toetatud masinõppe algoritmi korral (Joonis 17). Loodud skriptis muudeti astmeliselt sisendparameetreid võimaliku parima tulemuse saamiseks. Kokku käivitati 1152 eri parameetritega koolitusprotsessi.



Joonis 17. Nelja tsüklilise parameetrite muutmise skripti põhimõtte skeem

Masinõppe testimiseks eraldati T-11505 punktipilvest tee esimene osa kontrollpilveks (Joonis 18). Kontrollpilve loomiseks kasutati QGIS rakenduses WiteboxToolsi pistikprogrammi käsku

ClipLidarToPolygon. Saadud kontrollpilve vastu testiti tarkvaras OpenPointClass treenimise käigus loodud mudelit.



Joonis 18. Sinise viirutusega punktipilve osa testimiseks

Kõikide koolitusandmete kohta teostati koolitusprotsessi käigus kvaliteedi hindamine kontrollpilve vastu. Saadud tulemused salvestati logifailidena edasiseks statistiliseks analüüsiks, et selgitada välja sobivaimad parameetrid edasiseks mudeli teenimiseks ja rakendamiseks.

4.6 Tuvastatud liiklusmärkide asukohtade kontrollimine

Masinõppe algoritmide poolt tuvastatud liiklusmärkide asukohtade kontrollimiseks kasutati kahte erinevat meetodit - GNSS mõõdistamine ning GIS lahenduses Maa-ameti tiheasustusalade (piksli suurus 10 cm) ortofotodelt liiklusmärkide asukohtade tuvastamist.

Lõigu T-11505 teostati osaline märkide asukohtade mõõdistamine GNSS seadmega. Mõõdistamise raames tehti iga märgigrupi keskel 30 sekundiline kinemaatiline mõõdistamine [9].

Mõõdistamise tulemusel saadud andmed kanti lõputöö käigus loodud geinfosüsteemi kihile „Kontroll“.

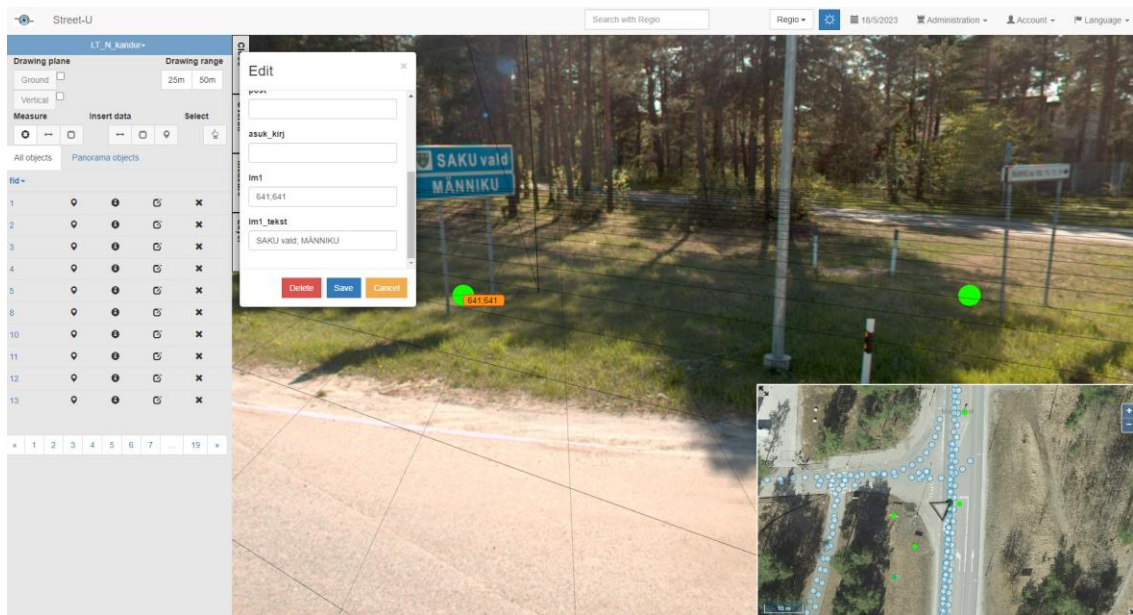
Teise meetodina kasutati liiklusmärkide asukohtade tuvastamisel Maa-ameti ortofotosid. Lõputöö käigus loodud GIS lahenduse ortofoto kihil määrati liiklusmärkide postide asukohad ning kanti need punktidenä kihile „Kontroll“ (Joonis 19).



Joonis 19. GIS lahenduses määratud liiklusmärkide asukohad punasega

Lõigu T-11340 GIS lahenduses määratud asukohapunktile tehti täiendav asukoha kontroll AS Teede Tehnokeskuse poolt hallatavas mobiilse kaardistamise keskkonnas Street-U (Joonis 20).

Sarnase ortofotodelt digitaliseeritud märkide asukoha kontrolli ning ka märgitähiste määramise saab läbi viia näiteks ka Google Earth rakendusega kasutades Google Street View vaadet.



Joonis 20. Asukoha kontroll lõigul T-11340

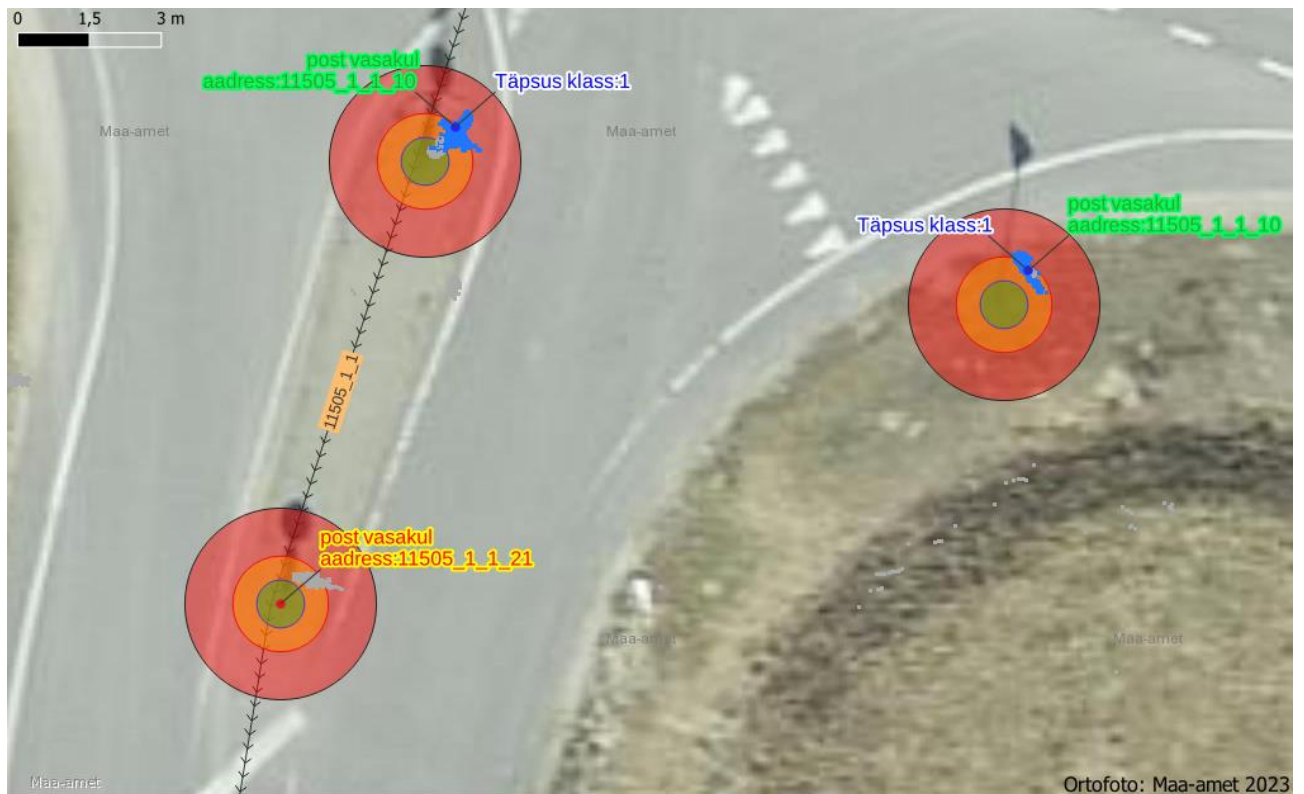
Parima leitud esmase koolitusmodeliga teostati OpenPoitClass tarkavara kasutades testlõikude punktipilvede klassifitseerimine.

Klassifitseeritud lõikudele rakendati CloudCompare Label Connected Componets (LCC) algoritmi, mille tulemusel saadi iga tuvastatud liiklusmärk omaette pilvena. Liiklusmärkide pilvedele rakendati töö raames loodud scripti mis kasutades libLAS paketti kuuluvat programmi lasinfo , et kirjutada tuvastatud punktipilvede keskkoha koordinaadid andmefaili.

Saadud liiklusmärkide asukohad kontrolliti lõputöö raames loodud GIS lahenduses mõõdistatud ja ortofotodelt määratud punktide vastu. Leiti iga leitud liiklusmärgi kaugused kontrollpunktist, kasutades QGIS-i ruumiandmete võrdlemise funktsionaalsust. Ning klassifitseeriti kauguste järgi asukoha täpsus järgnevalt:

- $\pm 0,5$ m – täpsus klass „0,5“,
- ± 1 m – täpsus klass „1“,
- ± 2 m – täpsus klass „2“.

Täpsusklassid visualiseeriti loodud geoinfosüsteemis (Joonis 21).



Joonis 21. Leitud märkide visualiseerimine: Rohelise kirjaga määratud leitud märkide aadressid, punasega leidmata märgid, sinisega täpsusklassid

Töö käigus GIS rakenduses teostati leitud märkide sidumine teenumbri kaudu teeosaga. Teenumbri ning teeosa järgi arvutati välja teeregistri andmetabeli „n_kandur“ jaoks vajalik teeosa meetri aadress kasutades QGIS funktsiooni line_locate_point(). Koos märkidele teenumbri ja teeosa määramisega kontrolliti ka olemasolevaid teeregistri kirjeid ning teeregistri andmetabeli tabeli „n_kandur“ (Tabel 1) kohalikus laiendatud infoväljadega koopias tähistati ära märgid, mis on teeregistris valesti märgitud. Juhul, kui märk oli õige, kuid asukohaliselt nihkes, tehti vastavasisuline kanne väljale märkused. Registri nihe määrati vastavalt kas + või – täismetritena pikki teetelge.

Loodud andmete põhjal tehti analüüs ning leiti suhted ortofotodelt ning GNSS mõõdistustega määratud märgiasukohtade ja punkt pilvest saadud märgiasukohtade vahel.

Täiendavalt kontrolliti punkt pilvest valesti klassifitseeritud liiklusmärgid ning tehti analüüs võimalike muudetavate parameetrite kohta.

Leitud märkide asukohad on visualiseeritud lisades (Lisa 2, Lisa 3, Lisa 4).

5 TULEMUSED, JÄRELDUSED JA ETTEPANED

5.1 Masinõppe treeningu protsessi analüüs

Treening protsessi käigus loodud esialgsete mudelite logifailides on kirjas esmane hinnang kvaliteedi mõõdikutena kontrollpilve suhtes.

Masinõppe kvaliteedi mõõdikud on arvulised näitajad, mis iseloomustavad masinõppe mudeli toimivust mingil ülesandel. Täpsus, saagis, kordustäpsus ja F1 on neli levinud mõõdikut, mida kasutatakse klassifitseerimisülesannete puhul, kus mudel peab ennustama objektide kuuluvust eelnevalt määratletud klassidesse.

Täpsus näitab, kui sageli masinõppe mudel ennustab õigesti kõigi klasside kohta. See on õigete ennustuste arvu ja kõigi ennustuste arvu suhe.

Saagis näitab, kui sageli masinõppe mudel leiab kõik objektid, mis kuuluvad mingisse sihtklassi. See on sihtklassi kuuluvate objektide õigesti ennustatud arvu ja kõigi sihtklassi kuuluvate objektide arvu suhe.

Kordustäpsus näitab, kui sageli masinõppe mudel ennustab õigesti sihtklassi kohta. See on sihtklassi kuuluvate objektide õigesti ennustatud arvu ja kõigi sihtklassiks ennustatud objektide arvu suhe.

F1 on kahe eelmise mõõdiku harmooniline keskmine, mis võtab arvesse nii saagise kui ka kordustäpsuse väärtused. F1 on oluline mõõdik, kui klasside tasakaal on oluline ja kui valepositiivsete ja valenegatiivsete ennustuste kulud on sarnased. F1 arvutatakse valemi (1) järgi

$$F1 = \frac{2 \times \text{Kordustäpsus} \times \text{Saagis}}{\text{Kordustäpsus} + \text{Saagis}}, \quad (1)$$

Treeningu käigus loodud logidest moodustati tabel, millesse kanti kõikide treeningu käigus loodud mudelite kontrollpilve suhtes mõõdetud kvaliteedi andmed.

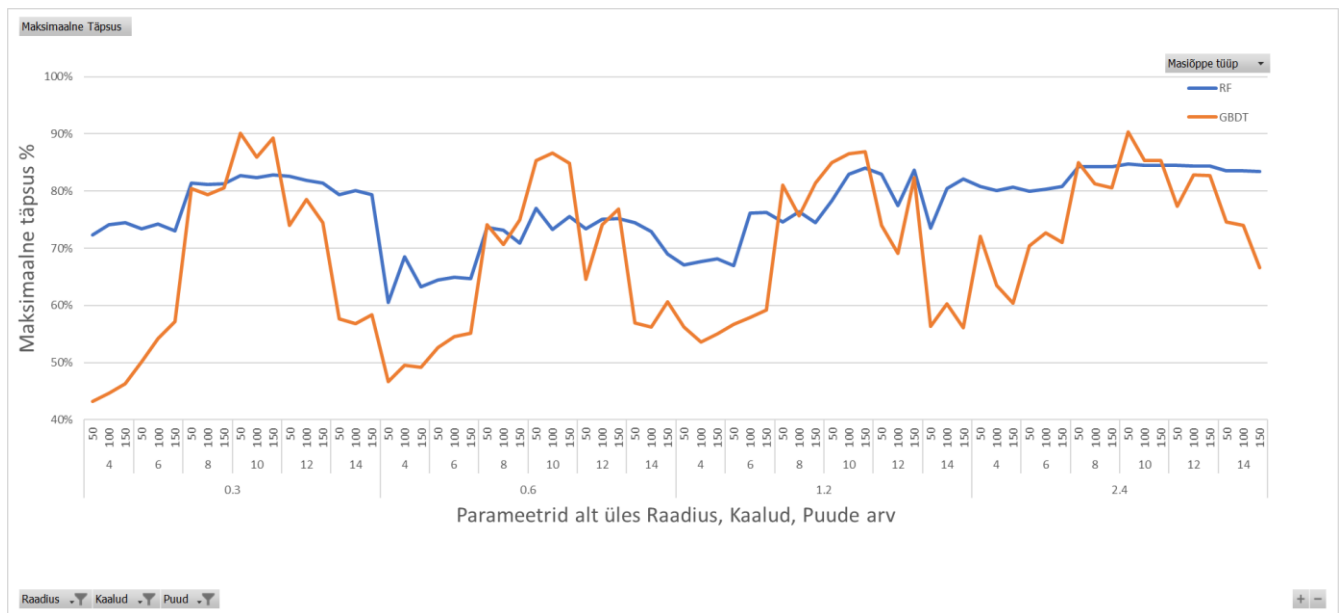
Parimate parameetritega mudeli valimiseks teostati andmete statistiline analüüs, mille käigus võrreldi erinevaid parameetreid ning koolitustulemusel saadud kvaliteedi näitajaid.

5.2 Masinõppe treeningprotsessi analüüsi tulemused

Kasutatud masinõppe meetoditest parima täpsuse ning kordustäpsuse antud koolitus- ja kontrollandmete puhul andis GBDT mudel parameetritega:

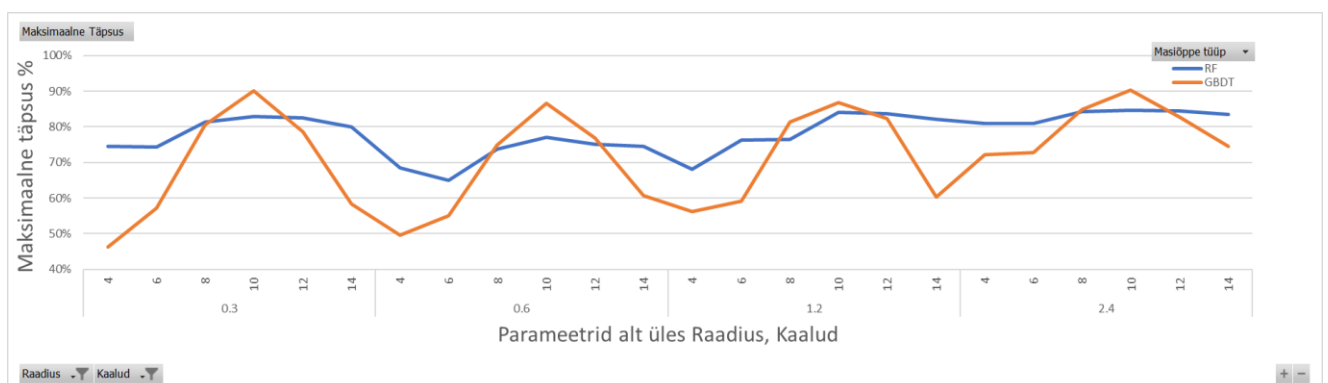
- kaalude arv – 10,
- otsustuspuude arv – 50,
- sügavus – 30,
- raadius – 0,3.

Erinevate parameetritega teostatud GBDT ja RF mudelitega treenimised andsid erineva täpsustulemuse ning selgelt tuli esile, et GBDT mudeli täpsustulemused kõiguvad tunduvalt suuremas skaalas kui RF mudeli puhul (Joonis 22).



Joonis 22. Parameetritest sõltuv mudelite täpsus andmete kõikumine

GBDT mudeli puhul põhjustas kaalude arvu suurendamine üle 10 mudeli ennustustulemuste olulist halvenemist (Joonis 23).

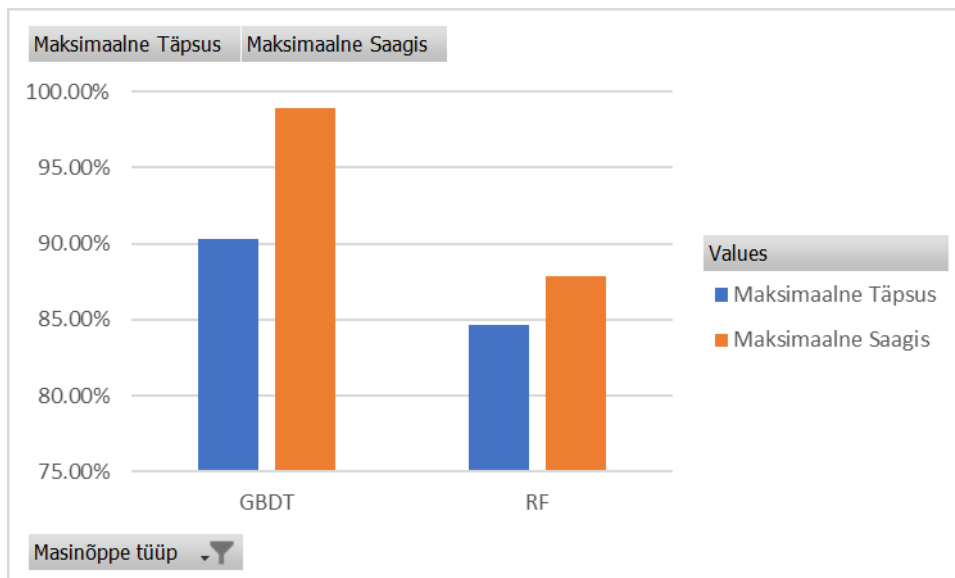


Joonis 23. Parameetrite raadiuse ning kaalude arv seos

Mudeli kasutuselevõtu puhul tuleb kindlasti jätkata treeningprotsessi, lisades täiendavaid kontrollitud andmeid treeningandmete hulka ning teostades täiendavat treenimist juba leitud parimate

parameetritega. Nii väheneks ülesobitumine kui paraneks ka mudeli üldine täpsus. Samuti aitab suurem andmehulk teha paremaid järeldusi tulemuste osas.

Kasutatud masinõppe mudelite maksimaalsed täpsused ja saagised (Joonis 24).



Joonis 24. Mudelite maksimaalsete tulemuste võrdlus

Masinõppe mudelite vaadeldud tulemused kehtivad konkreetse testandmestiku punktide kohta ning ei ole üksühele laiendatavad. Üldiselt võib lugeda parameetrite otsimise edukaks ning kasutada leitud parimat mudelit esmaseks klassifitseerimiseks ning mudeli edasi koolitamiseks.

5.3 Tuvastatud ja tuvastamata liiklusmärkide analüüs ja järeldused

Samaaegselt liiklusmärkide asukohtade täpsuse määramisega lõputöö raames loodud GIS lahenduses märgiti ära valesti klassifitseeritud ning klassifitseerimata liiklusmärgid. Esmase treeningu läbinud mudeli pealt saadi nii uute kui mudelile teada olevate andmete klassifitseerimisel 68% täpsus liiklusmärkide määramisel.

Märkidele mis asusid ristuvatel teedel, mahasõitudel ning külgevatel aladel määrati teeks „Külgnevad alad“.

Määramata jäi tiheda punkt pilvega kaetud alas 48 liiklusmärki ning esines ka üksikuid valesti klassifitseerimisi. Laserskaneerimise käigus kogutud liiklusmärkide asukohtade kontrollimise käigus vaadeldi ka teeregistri tabelisse „n_kandur“ kantud liiklusmärkide vastavust tegelikkusele ning tehti vastavad kirjed GIS andmebaasi. Täpsem jaotus klassifitseerimise tulemustest on esitatud (Tabel 6).

Tabel 6. Liiklusmärkide tuvastamise tulemus objektide lõikes

Tee	Mitte liiklusmärk	Määramata liiklusmärk	Määramata VMS	Vale objekt	Õige tulemus	Kokku objekte	Õigete märkide osakaal %	Teeregistris kandideid n_kandur	Teeregistris õiged kandeid n_kandur
Külgnevad alad		9		3	49	61	80%	0	0
1		10	5		22	37	59%	0	0
3570		1				1	0%	0	0
3571		1			1	2	50%	0	0
11340	1	22			39	62	63%	19	9
11505		5			9	14	64%	7	5
Kokku:	1	48	5	3	120	177	68%	26	14

Valesti klassifitseeritud objektideks olid väliselt liiklusmärgiga sarnanevad muud tähised ning üks autonumber.

Tuvastamata jäid ka kõik muutuvteabega märgid ning tuvastamise probleeme oli märkidel, mille LIDAR-i tagasipeegeldavas intensiivsuses oli väiksem, kui liiklusmärgil keskmiselt.

Kuna andmekorje oli teostatud ühekordse läbisõiduga ning laserskaneerimis seade töötab 30° kaldenurgaga all vaatega auto taha, siis ei saadud mõlemale teepoolele paigutatud liiklusmärkide intensiivsust ühtlaselt. Lahenduseks oleks ajamahukas teekonna kahekordne läbimine mõlemas suunas või siis kahe LIDAR anduri paigutamine MLS seadmele. Teine võimalus paremate tulemuste saavutamiseks on mudelit edasi koolitada suurema andmehulga pealt ja vaadata üle koolitus- ja sisendpilvede intensiivsuse parameetrid.

5.4 Tuvastatud liiklusmärkide asukohaline täpsus

Tuvastatud liiklusmärkide asukohalist täpsust hinnati Maa-ameti ortofotodelt ning lõigul T-11505 kilomeetritel 0,000-0,466 osas teostatud GNSS-RTK mõõdistuste järgi. Maa-ameti ortofotodelt kaardistamise võtteid kasutades võib eeldada maapinnal paiknevate märgipostide punkti täpsuseks $\pm 0,5$ m. Portaalistel olevate märkide asukohalise täpsuse määramine Maa-ameti ortofotodelt võib olla suuremas eksimuse vahemikus, kuna kõrgel asuvate objektide asukoha hindamine ja määramine ei ole täpne.

Valdaval osal leitud märkidest jäävad soovitud asukoha täpsusklassi. Probleemne on lõik T-1 mille märkide asukoha määramine või siis kontroll punktide määramises esineb probleeme. Väiksem hajuvus asukohalise täpsuse osas on saavutatud kõrvalteedel. Hea asukohalise täpsusega on tuvastatud ka teega külgnevatel aladel asunud märgid.

5.5 Teeregistrile sobilike asukoha kirjete loomine

Töö tulemusel loodud geoinfosüsteemis käivitatud päringuga saab luua Transporiameti teeregistri haldurile või andmeandjale edastamiseks võimaliku minimaalsete teeregistri aadress-süsteemi vajalike väljadega tabeli (Tabel 7). Andmeandjad või haldur saavad juba lisada vajalikud andmed (näiteks liiklusmärkide numbrid, suurusgrupid jne.) Lõputöö käigus leitud liiklusmärkide asukohad on esitatud (Lisa 5).

Tabel 7. Näide andmeandjale või registrihaldurile edastatavast tabelist

tee_num ber	soidu- tee_nr	teeosa	teeosa_ meeter	lmpool_ lmpool_ xv	lmpool_lmpool _val	asuk_kirj
1	1	2	1167	1	post paremal	{X:551962.46,Y:6589989.5}
1	1	2	387	1	post paremal	{X:551237.31,Y:6589700.75}
1	2	2	1441	3	portaal	{X:552204.18,Y:6590122.25}
1	1	2	347	1	post paremal	{X:551203.06,Y:6589680.25}
1	1	2	273	2	post vasakul	{X:551126.78,Y:6589671}
1	2	2	1040	2	post vasakul	{X:551831,Y:6589975.25}
1	2	2	32	2	post vasakul	{X:550895.28,Y:6589599.75}
1	2	2	1107	2	post vasakul	{X:551889.87,Y:6590008.25}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550997.03,Y:6589617.5}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550995.09,Y:6589622}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550896.59,Y:6589578.25}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550895.21,Y:6589581.75}

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli luua prototüüplahendus, mis leiaks mobiilse laserskaneerimise punktipilvest liiklusmärkide asukohad ning seostaks leitud liiklusmärgid Eesti teeregistri andmetega. Eesmärgi täitmiseks võeti kasutusele masinõppet kasutav punktipilvede klassifitseerimise rakendus OpenPointClass, valideeriti masinõppe mudeli tööd neile tundmatutel andmetel. Klassifitseeriti mudelile tuntud ning tundmatud punktipilve andmed ja leiti klassifitseeritud punktipilvede segmenteerimise teel liiklusmärkide asukohad.

Lõputöö tulemusel valminud esmane masinõppe mudel suutis testlõikudel tuvastada 68% laserskaneerimise alasse jäänud liiklusmärkidest ning määrata nende asukoha valdavalt rahuldava täpsusega. Leitud märkide asukoht jäi valdavalt ± 1 m piirese.

Lõputöö tulemusel valminud liiklusmärkide tuvastamise mudel vajab testimist suuremate andmehulkade peal ning mudelit tuleb täiendavalt treenida, kasutades juhendatud õppe põhimõtet.

Leitud liiklusmärkide asukohtade viimiseks teeregistrisse kandmiseks sobilikule kujule loodi töö raames geinfosüsteem. Loodud geinfosüsteemi abil teostati leitud liiklusmärkide asukohtade projitseerimine teeosa teljele ning sammuti seoti leitud liiklusmärkide asukohad tervikteega. Asukohtade põhjal loodi näitlik tabel, mille saab edastada teeregistri haldurile või siis andmeandjale edasiseks registri täiendamiseks.

SUMMARY

The following thesis *Using Mobile Laser Scanning to Improve the Location of Road Signs in the Estonian Road Registry* investigates the potential of mobile laser scanning (MLS) technology and machine learning to improve the accuracy of traffic sign location data in the Estonian Road Registry.

The study begins with an analysis of the Estonian Road Registry, emphasizing the existing limitations in accuracy and completeness of traffic sign data. The insufficiency of registry data is identified as a significant obstacle in mobility and traffic management tasks, highlighting the need for more precise and reliable data.

The principles of MLS and LIDAR technology are explained. MLS is presented as a fast and flexible method for creating detailed 3D point clouds of roadside objects, including traffic signs.

The thesis emphasizes the role of software and machine learning in processing the large amounts of data generated by MLS. Two machine learning algorithms are used to classify and process point cloud data: Random Forest (RF) and Gradient Boosted Decision Trees (GBDT). The study also involves critical point cloud processing algorithms, such as the Cloth Simulation Filter (CSF) and the Connected Components Labeling Algorithm (LCC), which are essential for isolating and detecting traffic signs in the data.

The methodology section describes the MLS devices used, the data collection process, and the approach to trajectory processing. This part provides an overview of the integration of LIDAR data with trajectory information, a necessary step in creating accurate point clouds.

The results of the study show that the developed machine learning model is able to successfully identify a significant portion of traffic signs from MLS data. However, problems are noted in the precision of classification, especially for signs not optimally represented in the point cloud. The work concludes with a critical analysis of the machine learning process, emphasizing the need for additional training and refinement of the model to improve accuracy. Potential improvements and further research directions for better integration of traffic sign location data into the Estonian Road Registry are also presented.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] Reach-U, AS Datel, „Teeregistri spetsifikatsioon,“ 26.5.2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riha.ee/api/v1/systems/teeregister/files/511dcd4a-2771-4c32-a1c5-ce3fdd699188>. [Kasutatud 31.6.2023].
- [2] Riigi Teataja I, „Teeregistri põhimäärus,“ 15.1.2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/112012016001>. [Kasutatud 01.09.2023].
- [3] Transpordiamet, „Teeregistri_andmemudel_29.06.2021.doc,“ 29.06.2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riha.ee/api/v1/systems/teeregister/files/bd9b49fe-b90d-4116-a398-971fe291d61c>. [Kasutatud 01.09.2023].
- [4] Transpordiamet, „Teeregistri WFS teenus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://teeregister.mnt.ee/290424/wfs?&service=WFS&version=1.3.0&request=Getcapabilities>. [Kasutatud 30.07.2023].
- [5] F. T. I. Agency, „Digiroad - Description of data objects 4/2022,“ 4.2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Tie/Digiroad/Aineistojulkaisut/latest/Julkaisudokumentit/EN_Description%20of%20data%20objects%20_4_2022.pdf. [Kasutatud 30.07.2023].
- [6] Transportiamet, „Juhend - Teeregistri aadress-süsteem,“ 25.7.2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://transpordiamet.ee/media/19009/download>. [Kasutatud 30.7.2023].
- [7] K. Julge, „Laser Scanning of Built Environment and Landforms with Spatial Modelling Applications,“ TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Tallinn, 2018.
- [8] K. a. E. A. a. V. T. a. K. R. Julge, „INITIAL TESTS AND ACCURACY ASSESMENT OF A COMPACT MOBILE LASER,“ The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Kd-d. %1/%2XLI-B1, pp. 633--638, 2016.

- [9] T. K. K. K. A. L. Artu Ellmann, „GNSS – GLOBAALNE SATELLIITNAVIGATSIOONISÜSTEEM GEODEETILISE TÄPSUSEGA ASUKOHAMÄÄRANGUKS,“ Tartu, Eesti Maaülikool, 2022.
- [10] W. a. Q. J. a. W. P. a. W. H. a. X. D. a. W. X. a. Y. G. Zhang, „An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering,“ Remote Sensing, kd. 8, 2016.
- [11] S. P. A. W. E. W. Robert Fisher, „Connected Components Labeling,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/label.htm>. [Kasutatud 30 07 2023].
- [12] Velodyne LiDAR, Inc. , „VLP-16 User Manual,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://velodynelidar.com/wp-content/uploads/2019/12/63-9243-Rev-E-VLP-16-User-Manual.pdf>. [Kasutatud 02 09 2023].
- [13] Advanced Navigation. , „Spatial Dual Reference Manual,“ 03 02 2023. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.advancednavigation.com/wp-content/uploads/2023/02/spatial_dual_reference_manual.pdf. [Kasutatud 30 07 2023].
- [14] The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, „LAS Specification 1.4 - R15,“ 9 7 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf. [Kasutatud 30 07 2023].

LISAD

Lisa 1. Töö käigus loodud säilitatavate failide loetelu

Lisa 2. Lõigu T-1 geoinfosüsteemid väljavõte

Lisa 3. Lõigu T-11340 geoinfosüsteemid väljavõte

Lisa 4. Lõigu T-11505 geoinfosüsteemid väljavõte

Lisa 5. Teeregistri aadress-süsteemiga ühilduv andmetabel liiklusmärkide asukoha andmetega.

Lisa 6. Geoinfosüsteemi kohalike tabelite kirjeldus

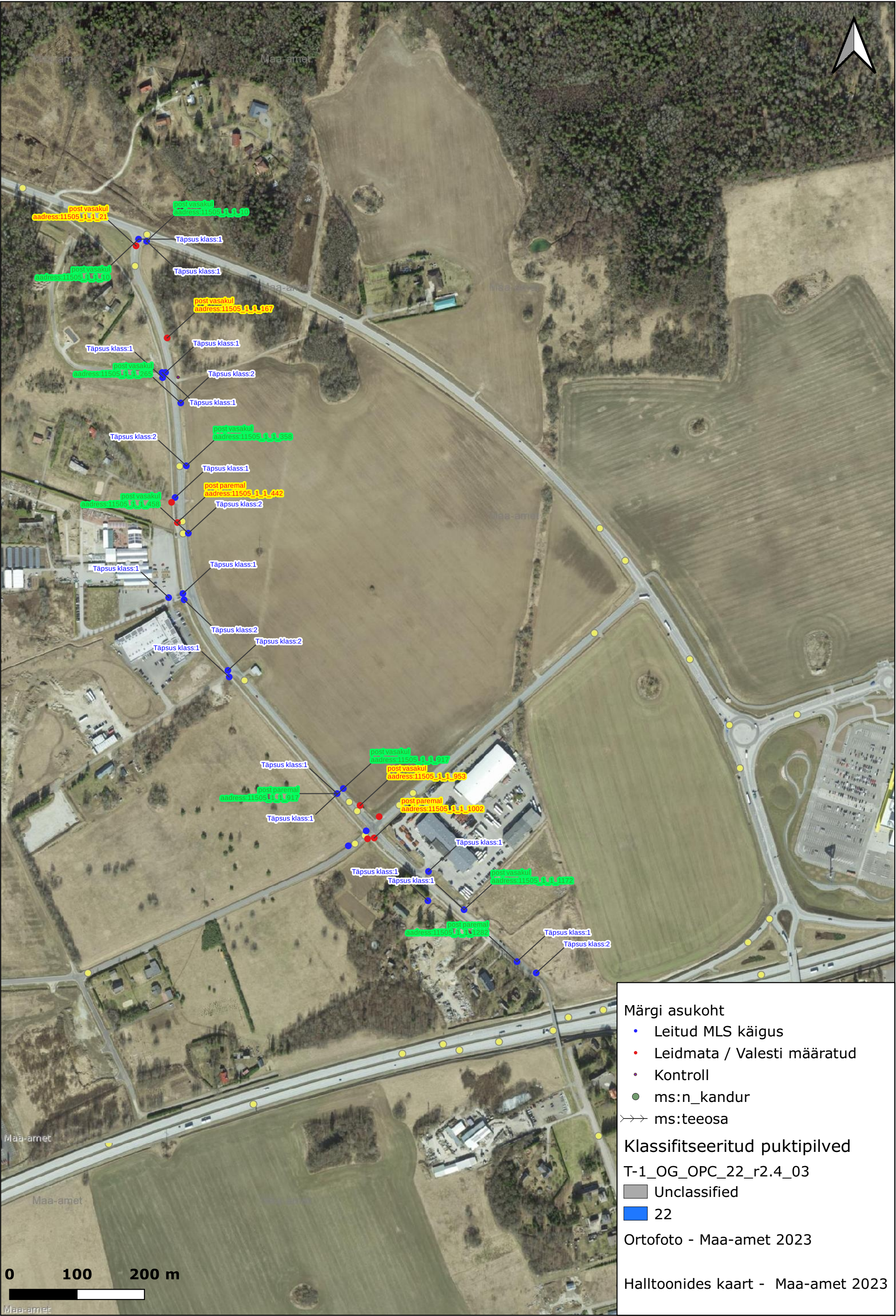
Lisa 1. Töö käigus loodud säilitatavate failide loetelu

- T-1.laz
- T-11340.laz
- T-11505.laz
- C_1_22_color_v6_2.las – treening andmed
- C_1_22_color_v6_1.las – kontroll andmed
- train_v8.sh – 4 tsükliline treening skript
- gbt_s10_t50_d30_r0.3_c1_22_m_v8.bin – parim masinõppe mudel.
- log_tabel.sh – logidest tsv looja
- Stat.tsv.xlsx – masinõppe liiklusmärkide klassifitseerimise esmase hinnangu logi.
- asukoht.sh – märkide punktipilvest asukoha eraldaja
- commans.txt – käsurea käskude loend
- Kandur_2024.gpkg – geoinfosüsteem
- HAK.xml – värvipalett

Lisa 3. Lõigu T-11340 geoinfosüsteemid väljavõte



Lisa 4. Lõigu T-11505 geoinfosüsteemid väljavõte



tee_number	soidutee_nr	teeosa	teeosa_meeter	Impool_Impool_xv	Impool_Impool_val	asuk_kirj
1	1	2	1167	1	post paremal	{X:551962.46,Y:6589989.5}
1	1	2	387	1	post paremal	{X:551237.31,Y:6589700.75}
1	2	2	1441	3	portaal	{X:552204.18,Y:6590122.25}
1	1	2	347	1	post paremal	{X:551203.06,Y:6589680.25}
1	1	2	273	2	post vasakul	{X:551126.78,Y:6589671}
1	2	2	1040	2	post vasakul	{X:551831,Y:6589975.25}
1	2	2	32	2	post vasakul	{X:550895.28,Y:6589599.75}
1	2	2	1107	2	post vasakul	{X:551889.87,Y:6590008.25}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550997.03,Y:6589617.5}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550995.09,Y:6589622}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550896.59,Y:6589578.25}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550895.21,Y:6589581.75}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550894,Y:6589584.75}
1	2	2	25	3	portaal	{X:550892.53,Y:6589588.25}
1	2	2	27	2	post vasakul	{X:550891.28,Y:6589596}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550993.71,Y:6589625.75}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550992.31,Y:6589629}
1	2	2	133	3	portaal	{X:550991.12,Y:6589631.75}
1	1	2	1479	1	post paremal	{X:552252.5,Y:6590103.75}
1	2	2	1589	2	post vasakul	{X:552335.65,Y:6590192.75}
1	2	2	1105	3	portaal	{X:551890.81,Y:6590000.75}
1	2	2	1230	3	portaal	{X:552007.81,Y:6590044.25}
11340	1	2	19	4	post keskel	{X:540805.84,Y:6580869}
11340	1	3	1063	1	post paremal	{X:539739.21,Y:6577712.75}
11340	1	3	834	1	post paremal	{X:539805.78,Y:6577932}
11340	1	3	810	1	post paremal	{X:539822.9,Y:6577952}
11340	1	3	792	1	post paremal	{X:539826.06,Y:6577970}
11340	2	3	758	2	post vasakul	{X:539860.09,Y:6577993.75}
11340	1	2	12	4	post keskel	{X:540806.03,Y:6580876.5}
11340	1	3	645	1	post paremal	{X:539885.62,Y:6578104.5}
11340	1	3	562	1	post paremal	{X:539910.68,Y:6578183.75}
11340	2	3	498	2	post vasakul	{X:539952.62,Y:6578237}
11340	1	3	380	1	post paremal	{X:539972.9,Y:6578354.25}
11340	2	3	239	2	post vasakul	{X:540040.03,Y:6578480.25}
11340	1	2	358	1	post paremal	{X:540722.65,Y:6580543.25}
11340	1	2	306	2	post vasakul	{X:540753.25,Y:6580587.75}

tee_number	soidutee_nr	teeosa	teeosa_meeter	Impool_impool_xv	Impool_impool_val	asuk_kirj
11340	1	2	300	1	post paremal	{X:540743.28,Y:6580598.25}
11340	1	2	111			{X:540786.18,Y:6580779}
11340	1	2	105	1	post paremal	{X:540793.28,Y:6580784.5}
11340	1	2	55	1	post paremal	{X:540793.44,Y:6580834.25}
11340	1	2	47	1	post paremal	{X:540788.25,Y:6580842.25}
11340	1	4	116	2	post vasakul	{X:539531.06,Y:6577101.75}
11340	2	3	1546	1	post paremal	{X:539579.44,Y:6577257.5}
11340	1	3	1219	1	post paremal	{X:539683.12,Y:6577567.25}
11340	1	4	165	2	post vasakul	{X:539517.81,Y:6577053.75}
11340	1	3	1161	1	post paremal	{X:539703.18,Y:6577621.25}
11340	2	3	1153	2	post vasakul	{X:539729.62,Y:6577621.25}
11340	1	3	1121	1	post paremal	{X:539717.94,Y:6577659.25}
11340	1	3	1082	1	post paremal	{X:539731.06,Y:6577696}
11340	1	3	1011	1	post paremal	{X:539754.71,Y:6577763}
11340	2	3	927	2	post vasakul	{X:539804.06,Y:6577834}
11340	1	3	897	1	post paremal	{X:539793.96,Y:6577869.5}
3571	1	1	56	1	post paremal	{X:539597.46,Y:6577258}
11340	1	3	97	1	post paremal	{X:540065.96,Y:6578621.25}
11340	1	2	2149	1	post paremal	{X:540139.87,Y:6578850.25}
11340	1	2	1197	1	post paremal	{X:540442.78,Y:6579753}
11340	1	2	1117	2	post vasakul	{X:540481.15,Y:6579823.5}
11340	1	2	682	1	post paremal	{X:540614.43,Y:6580237.75}
11340	1	2	579	1	post paremal	{X:540648,Y:6580335.25}
11340	1	2	154	1	post paremal	{X:540785.96,Y:6580736.25}
11340	1	3	1463	2	post vasakul	{X:539608.19,Y:6577334.75}
11340	1	2	126	2	post vasakul	{X:540805.12,Y:6580761.5}
11340	2	3	1111	2	post vasakul	{X:539736.46,Y:6577662.75}
11505	1	1	10	2	post vasakul	{X:545914.81,Y:6578959.25}
11505	1	1	358	2	post vasakul	{X:545985.71,Y:6578623}
11505	1	1	917	1	post paremal	{X:546209.37,Y:6578136.75}
11505	1	1	1172	2	post vasakul	{X:546397.71,Y:6577964.5}
11505	1	1	917	2	post vasakul	{X:546218.59,Y:6578144.25}
11505	1	1	10	2	post vasakul	{X:545926.78,Y:6578956.25}
11505	1	1	1282	1	post paremal	{X:546476.28,Y:6577887.5}
11505	1	1	265	2	post vasakul	{X:545977.43,Y:6578716.25}
11505	1	1	458	2	post vasakul	{X:545988.68,Y:6578523}

tee_number	soidutee_nr	teeosa	teeosa_meeter	Impool_Impool_xv	Impool_Impool_val	asuk_kirj
11340	1	2	844	1	post paremal	{X:540556.447,Y:6580087.052}
11340	1	2	2200	1	post paremal	{X:540126.788,Y:6578800.63}
11340	1	2	2265	1	post paremal	{X:540106.352,Y:6578738.526}
11340	1	3	64	2	post vasakul	{X:540083.998,Y:6578650.104}
11340	1	3	131	1	post paremal	{X:540054.591,Y:6578589.57}
11340	1	3	139	2	post vasakul	{X:540058.927,Y:6578580.05}
11340	1	3	516	1	post paremal	{X:539926.943,Y:6578226.514}
11340	2	3	580	2	post vasakul	{X:539927.042,Y:6578159.176}
11340	1	3	632	1	post paremal	{X:539884.377,Y:6578118.953}
11340	1	3	777	1	post paremal	{X:539830.945,Y:6577984.227}
11340	1	3	851	1	post paremal	{X:539808.316,Y:6577913.4}
11340	1	3	908	2	post vasakul	{X:539799.843,Y:6577855.95}
11340	2	3	1129	2	post vasakul	{X:539741.385,Y:6577641.973}
11340	1	3	1151	1	post paremal	{X:539707.335,Y:6577631.065}
11340	2	3	1203	2	post vasakul	{X:539712.668,Y:6577573.745}
11340	2	3	1237	1	post paremal	{X:539685.154,Y:6577548.076}
11340	1	3	1251	2	post vasakul	{X:539694.824,Y:6577528.787}
11340	1	3	1370	1	post paremal	{X:539628.134,Y:6577426.709}
11340	1	3	1481	2	post vasakul	{X:539599.179,Y:6577319.309}
3570	1	1	29	1	post paremal	{X:539607.363,Y:6577311.393}
3571	1	1	109	1	post paremal	{X:539622.153,Y:6577305.241}
11340	2	3	1539	2	post vasakul	{X:539588.559,Y:6577261.479}
11340	1	4	65	1	post paremal	{X:539535.775,Y:6577153.719}
11340	1	4	115	1	post paremal	{X:539519.726,Y:6577106.841}
11505	1	1	21	2	post vasakul	{X:545911.165,Y:6578949.303}
11505	1	1	167	2	post vasakul	{X:545957.286,Y:6578812.741}
11505	1	1	442	1	post paremal	{X:545972.379,Y:6578538.848}
11505	1	1	953	2	post vasakul	{X:546243.466,Y:6578119.173}
11505	1	1	1002	1	post paremal	{X:546264.457,Y:6578070.969}
1	2	2	149	2	post vasakul	{X:551004.743,Y:6589642.878}
1	2	2	272	2	post vasakul	{X:551119.64,Y:6589685.943}
1	2	2	346	1	post paremal	{X:551194.131,Y:6589700.238}
1	2	2	534	2	post vasakul	{X:551362.903,Y:6589784.063}
1	2	2	679	2	post vasakul	{X:551497.475,Y:6589838.114}
1	2	2	680	1	post paremal	{X:551502.316,Y:6589826.921}
1	2	2	1048	1	post paremal	{X:551842.4,Y:6589967.692}

tee_number	soidutee_nr	teeosa	teeosa_meeter	Impool_Impool_xv	Impool_Impool_val	asuk_kirj
1	2	2	1046	2	post vasakul	{X:551836.197,Y:6589978.502}
1	2	2	1289	2	post vasakul	{X:552058.49,Y:6590076.091}
1	2	2	1338	3	portaal	{X:552110.651,Y:6590077.804}
1	2	2	1337	3	portaal	{X:552108.938,Y:6590081.113}
1	2	2	1337	3	portaal	{X:552107.579,Y:6590084.834}
1	2	2	1337	3	portaal	{X:552106.103,Y:6590088.379}
1	2	2	1440	2	post vasakul	{X:552198.729,Y:6590132.034}
1	2	2	1337	2	post vasakul	{X:552103.621,Y:6590093.459}

Lisa 6. Geinfosüsteemi kohalike tabelite kirjeldus

 kontroll	 ms:n_kandur_local	 margi_asukoht
123 123 geom 123 fid 123 tee_number ABC tee_nimi 123 soidutee_nr 123 km 123 teeosa 123 teeosa_meeter ABC Impool_Impool_xv ABC Impool_Impool_val 123 post ABC asuk_kirj ABC lm1 ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm1_tekst ABC lm2 ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm2_tekst ABC lm3 ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm3_tekst ABC lm4 ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm4_tekst ABC lm5 ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm5_tekst ABC lm6 ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm6_tekst ABC lm7 ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm7_tekst ABC lm8 ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm8_tekst ABC markus 123 oid 123 tee_oid 123 teeosa_oid ABC muudetud_kpv	123 123 geom 123 fid 123 tee_number ABC tee_nimi 123 soidutee_nr 123 km 123 teeosa 123 teeosa_meeter ABC Impool_Impool_xv ABC Impool_Impool_val 123 post ABC asuk_kirj ABC lm1 ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm1_tekst ABC lm2 ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm2_tekst ABC lm3 ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm3_tekst ABC lm4 ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm4_tekst ABC lm5 ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm5_tekst ABC lm6 ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm6_tekst ABC lm7 ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm7_tekst ABC lm8 ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm8_tekst ABC markus 123 oid 123 tee_oid 123 teeosa_oid ABC muudetud_kpv 123 kontroll	123 123 geom 123 fid 123 tee_number ABC tee_nimi 123 soidutee_nr 123 km 123 teeosa 123 teeosa_meeter ABC Impool_Impool_xv ABC Impool_Impool_val 123 post ABC asuk_kirj ABC lm1 ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm1_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm1_tekst ABC lm2 ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm2_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm2_tekst ABC lm3 ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm3_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm3_tekst ABC lm4 ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm4_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm4_tekst ABC lm5 ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm5_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm5_tekst ABC lm6 ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm6_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm6_tekst ABC lm7 ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm7_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm7_tekst ABC lm8 ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_xv ABC lm8_lmsuhe_lmsuhe_val ABC lm8_tekst ABC markus 123 oid 123 tee_oid 123 teeosa_oid ABC muudetud_kpv 123 kontroll 123 X 123 Y 123 Z ABC fail ABC path ABC layer 123 ON_mark ABC Lidar_markus 123 Lidar_tapsus 123 teeosa_kood