

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Maa-ameti aerolaserskaneerimise andmete kasutamine
lennutakistuste andmebaasi täiendamisel**

Andres Lainoja

Juhendajad: PhD Raivo Aunap

PhD Kiira Mõisja

Tartu 2023

Annotatsioon

Maa-ameti aerolaserskaneerimise andmete kasutamine lennutakistuste andmebaasi täiendamisel

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on tuvastada, kas Maa-ameti kogutud aerolaserskaneerimise kõrguspunktid (LiDAR andmed) on kasutatavad Transpordiameti peetava kõrgtakistuste andmebaasi täiendamiseks ja täpsustamiseks. Töös leiti, et LiDAR andmed on enamusel juhtudest piisava täpsusega, kuid valdavalt on otstarbekam kasutada Eesti Topograafilise Andmekogu kõrgtakistuste ja hoonete kõrgus- (ja asukoha-) andmeid, mille täpsust saab vajadusel LiDAR meetodil üle kontrollida.

Märksõnad: LiDAR, lennundus, kõrgtakistused

CERC kood: P510 - Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Use of Estonian Land Board's airborne laser scanning data in updating aviation obstacle database

The aim of this bachelor thesis is to analyse whether the LiDAR data gathered by Estonian Land Board is accurate enough to be used to supplement and adjusted the aviation obstacle database kept by Estonian Transport Administration. The study found that while the accuracy is on most cases sufficient, it would be advisable to use the high obstacle and building data from Estonian Topographic Database, which accuracy can in certain cases be verified by LiDAR method.

Keywords: LiDAR, aviation, high obstacles

CERC code: P510 - Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Nõuded kõrgtakistuste mõõdistamisele ja registreerimisele	6
1.1 Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsiooni (ICAO) nõuded	6
1.2 Kõrgtakistuste andmebaas	7
2. Aerolaserskaneerimine kõrgtakistuste tuvastamise meetodina	10
2.1 Aerolaserskaneerimine	10
2.1.1 Teoreetiline ülevaade	10
2.1.2 Aerolaserskaneerimise (LiDAR-) punktide klassifikatsioon	10
2.1.3 Aerolaserskaneerimisel tekkivad vead	11
2.2 Maa-amet	12
3. LiDAR meetodiga kõrgtakistuste tipukõrguse tuvastamine	13
3.1 Metoodika	13
3.1.1 Võimalikud probleemid LiDAR meetodi rakendamisel	14
3.1.2 ETAK-andmete kasutamise piirangud	15
3.2 Andmete ettevalmistamine	15
3.3 LiDAR meetodil tipukõrguse tuvastamise tulemused	18
3.3.1 Korstnad	18
3.3.2 Kirikud	20
3.3.3 Hooned	20
3.3.4 Mastid.....	22
3.4 Tulemuste võrdlus	23
4. Lennuvälja ümbruse kõrgtakistuste kaardistamine	26
4.1 Andmete ettevalmistamine	26
4.2 Kõrgtakistuste kaardistamise tulemused	27
4.3 Arutelu	31
Kokkuvõte	33
Summary	35
Tänuavaldused	37
Kirjanduse loetelu	38

Sissejuhatus

19. aprillil 1977 toimus Lääne-Virumaal lennuõnnetus – Tapa militaarlennuväljale lähenev transpordilennuk An-24 riivas Moe piiritusetehase korstnat (Erelt 2005). Kõik 21 pardal olnud inimest hukkusid sündmuskohal (Erelt 2005). Kokkupõrke põhjuseks oli piloodi eksimus lennukõrguse valikul, mis oli tingitud tugevast lumesajust ja tihedast udust, samuti oli Tapa lennuvälja lähenemissektoris asunud korsten lennuohutustuledega valgustamata (Erelt 2005, Espenberg 2019).

16. jaanuaril 2013 põrkas helikopter Agusta 109E Londonis vastu kõrghoone ehitamisel kasutatud kraana noolt. Hukkusid kopteri piloot ja õnnetuskohas asunud jalakäija. Õnnetuse põhjuseks oli asjaolu, et piloodil puudus tihedas udus adekvaatne info oma asukoha kohta. Kraanale olid küll paigaldatud lennuohutustuled, kuid õnnetuse hetkel ei olnud need sisse lülitatud (Skybrary 2023).

Eeltoodud juhtumid on näited, milleni võib viia olukord, kui õhusõiduki piloodil puudub täpne ja ajakohane info lennutrajektoori läheduses asuvate kõrgehitiste ja -rajatiste kohta. Kui lennu täiskõrguse saavutades on õhusõiduk reeglina kilomeetrite kõrgusel maapinnast ja maapealsed objektid seda ei ohusta, siis õhusõiduki tõusul ja lähenemisel lennuväljale on teave maapealsete objektide asukoha ja kõrguse kohta kriitilise tähtsusega. Lisaks sellele, sõltumata lennuvälja lähedusest, vajavad maapealsete objektide kõrgusinfot madalal kõrgusel toimuvate erilendude (nt otsingu-, pääste- ja patrull-lennud) piloodid. Veel tuleb kõrgehitistega arvestada lennuvälja või kopteriväljakut rajades ning nendele tõusu- ja lähenemisprotseduure disainides.

Eestis korraldab lennuväljade ja kopteriväljakute lähiümbrusesse ja üle 45 meetri kõrguste ehitiste ehitamise üle kontrolli Transpordiamet. Lennundusseaduse § 35 lõigete 2–4 kohaselt tuleb maapinnast üle 45 meetri kõrguste ehitiste detailplaneeringud, projekteerimistingimused ja ehitusprojektid kooskõlastada Transpordiametiga (Riigi Teataja 2023), kus on välja töötatud protseduur ehitise andmete kandmiseks kõrgtakistuste andmebaasi. Protsess on toimunud viimased paarkümmend aastat ja selles ajavahemikus rajatud kõrgehitiste andmed on valdavas osas andmebaasi kantud. Probleemiks on kõrgehitised, mis on rajatud enne Transpordiametiga (ja selle õigusliku eellase Lennuametiga) kooskõlastamise kohustuslikuks muutumist. Selliste hoonete headeks näideteks on Tallinna vanalinnas asuvad Oleviste ja Niguliste kirik.

Maa-amet on alates 2008. aastast teinud üle-eestilisi aerolaserskaneerimise mõõdistuslende, saadud kõrgusandmestik ja sellest tuletatud kõrgusmudelid on Maa-ameti kodulehel kõigile

soovijatele vabaks kasutamiseks alla laetavad. (Maa-ameti geoportaal 2023-1). Kõnealune andmestik võimaldaks kontrollida kõrgtakistuse andmebaasis esitatud andmete õigsust ning tuvastada seal seni puuduvaid ehitisi.

Käesoleva uurimistöö eesmärk on kontrollida Maa-ameti LiDAR moodsuse andmete alusel Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasi täiendamise ja täpsustamise võimalusi. Töö on jagatud kaheks eraldiseisvaks ülesandeks:

- a) Esiteks kontrollida, kas Maa-ameti kogutud ja avaldatud aerolaserskaneerimise kõrguspunktide alusel on saavutatav Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsiooni poolt nõutav kõrgtakistuste vertikaalne täpsusklass. Selleks kavatakse töö autor võrrelda aerolaserskaneerimise meetodil saadud kõrguspunkte olemasolevates andmekogudes esitatud kõrgustega.
- b) Juhul, kui aerolaserskaneerimise kõrguspunktide täpsusklass on piisav, tuvastada lennuvälja lähiümbruses maapinnast üle 45 meetri kõrgused ehitised.

Esimene ülesanne on koondatud 3. peatükki ja teine 4. peatükki.

1. Nõuded kõrgtakistuste mõõdistamisele ja registreerimisele

1.1 Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsiooni (ICAO) nõuded

Nõuded rahvusvahelise tsiviillennunduse erinevatele valdkondadele töötab välja Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsioon (ICAO – *International Civil Aviation Organisation*). Nimetatud organisatsioon asutati 1947. aastal eesmärgiga luua liikmesriikidele ühtsed rahvusvahelised lennundusstandardid, mille iga liikmesriik kohustub oma siseriiklikku seadusandlusesse sisse viima (ICAO 2023). 2023. aasta seisuga on ICAO-l 193 liikmesriiki, sh Eesti (ICAO 2023).

Üheks standardiseeritud lennundusvaldkonnaks on lennundusteabeteenused, sealhulgas nõuded lennutakistuste mõõtmise käigus kogutavatele andmetele. Nõuded kõrgtakistuste andmete kvaliteedile on avaldatud ICAO juhendmaterjalis Doc 10066 „*Procedures for Air Navigation Services. Aeronautical Information Management*“ (ICAO 2018). Nõuded kogutud andmete kvaliteedile on jagatud kolme rühma sõltuvalt kõrgtakistuse kaugusest lennuvälja suhtes (vt tabel 1).

Tabel 1. Nõuded kõrgtakistuste andmete kvaliteedile (ICAO 2018)

	Ala 1 (kogu riigi territoorium)	Ala 2 (lennuvälja lähenemisala, u 45 km raadiusega ala ümber lennuvälja)	Ala 3 (lennuvälja ala)
Vertikaalne täpsus (<i>vertical accuracy</i>)	30 m	3 m	0,5 m
Vertikaalne lahutusvõime (<i>vertical resolution</i>)	1 m	0,1 m	0,01 m
Horisontaalne täpsus (<i>horizontal accuracy</i>)	50 m	5 m	0,5 m
Andmete terviklikkuse tase (<i>data integrity level</i>)	tavapärane	oluline	oluline
Uuendamise sagedus (<i>maintenance period</i>)	vastavalt vajadusele	vastavalt vajadusele	vastavalt vajadusele

Ala 3 paikneb lennuvälja territooriumil ning sellel paiknevate rajatiste asukoha ja kõrguse mõõtmise eest vastutab lennuvälja käitaja. Ala 2 kõrgtakistuste andmete saamiseks tuleb lennuvälja keskpunktist 45 km raadiuses mõõta kõik kõrgehitised ja -rajatised ning kogutud andmed hoida ajakohasena. Sellise töö teostamine kohapealsete mõõtmistega oleks küll täpne, kuid väga aja- ja ressursimahukas. Otstarbekam oleks tuvastada piirkonna kõrgtakistused

kaugseire vm meetodil ning kohapeale mõõtma või kontrollima minna vaid juhul, kui muud meetodid ei anna rahuldavaid tulemusi.

1.2 Kõrgtakistuste andmebaas

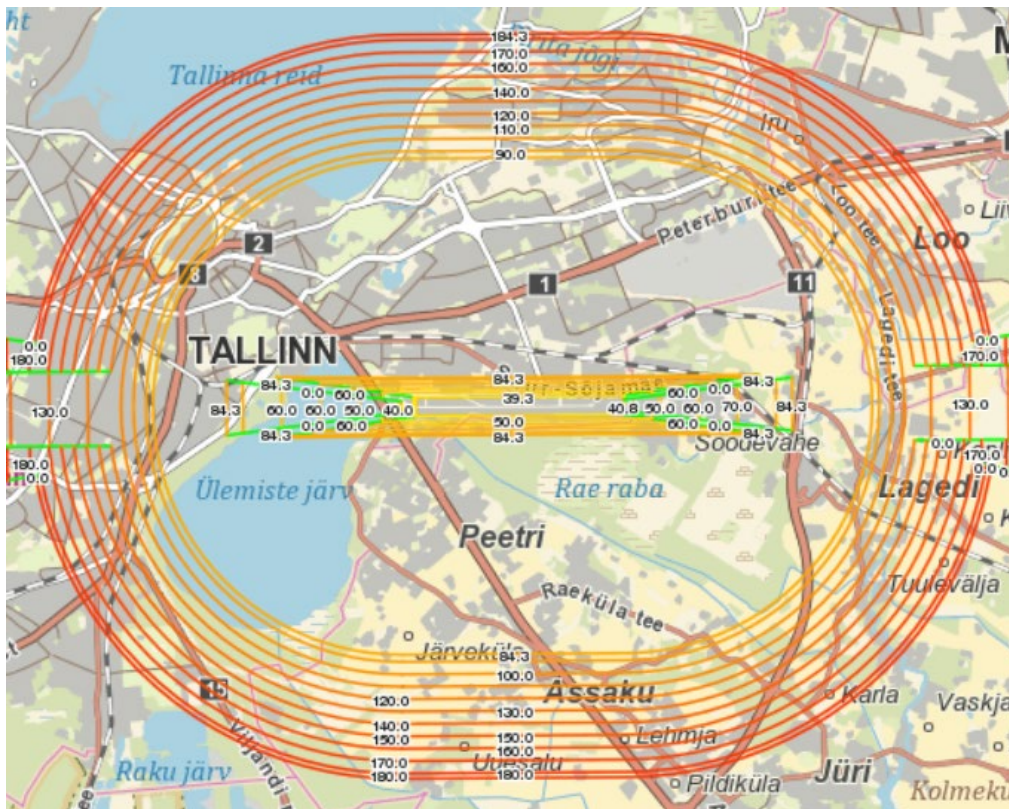
Lennuamet loodi 16. jaanuaril 1990. aastal, selle ülesandeks oli Eesti tsiviillennunduse üle järelevalve korraldamine (Riigi Teataja 1990). Aastatel 1997-2000 koostati Lennuameti tellimusel AS-i Eesti Kaardikeskus ja Lennuliiklusteeninduse AS-i koostöös Eesti lennuliikluse geodeetiline andmekogu (Lennuamet 2000). Andmekogusse koondati lennujaamade ja lennuväljapiirkondade ning lennutakistuste andmeid, lennujuhtimispiirkondade ja lennukeelupiirkondade ning lennuteepunktide koordinaate jt asukohaandmeid (Lennuamet 2000). Nimetatud andmekogu koostamise käigus mõõdeti 1997. aastal 100 meetrist suuremate kõrgustega lennuliikluse kõrgtakistuste geodeetilised koordinaadid ja kõrgused WGS-84 koordinaatsüsteemis (Kaardikeskus 1997).

Eesti lennuliikluse geodeetilise andmekogu kõrgtakistuste osa (edaspidi kõrgtakistuste andmebaasi) vastutav pidaja on Transpordiamet (Lennuameti õigusjärglane alates 01.01.2021), seda tehakse koostöös Lennuliiklusteeninduse AS-iga. Andmebaasi uute kannete tegemise üheks aluseks on lennundusseadusest tulenev kohustus, mille kohaselt tuleb üle 45 meetri kõrguste ehitiste ehitusload Transpordiametiga kooskõlastada. Üheks kooskõlastustingimuseks on ehitise täiskõrguse saavutamiseks Transpordiameti teavitamine ja ehitise asukoha ja kõrguse ülemõõtmine.

Kõrgtakistuste andmebaasi koostamine ja pidamine on tihedalt seotud ja mõjutatud riiklikust seadusandlusest. 1999. aastal vastu võetud lennundusseaduse § 35 lg 4 sätestas, et kõrgehitiste ja -rajatiste projektide kooskõlastamist ja arvestust lennuohutuse osas teostab Lennuamet (Riigi Teataja 1999). Samas jäi seaduse tasandil täpsustamata, kui kõrge peab ehitise või rajatis olema, et see kõrgehitiseks liigituks. Seaduse järgmise redaktsiooniga 01.06.2002 täiendati § 35 lg 4 selliselt, et kõik väljaspool lennuvälja lähiümbrust asuvaid maapinnast üle 45 m kõrguseid ehitisi hõlmavad detailplaneeringud ja ehitusprojektid tuleb kooskõlastada Lennuametiga (Riigi Teataja 2002). Töö kirjutamise hetkel kehtiva redaktsiooni (jõustumise kuupäev 01.01.2023) kohaselt tuleb Transpordiametiga kooskõlastada üle 45 meetri kõrguste ehitiste detailplaneeringud, projekteerimistingimused ja ehitusprojektid (Riigi Teataja 2023).

Kõrgehitise andmete jõudmine kõrgtakistuste andmebaasi toimub järgmiselt - peale ehitise valmimist mõõdab ehitaja selle asukoha ja kõrguse, mõõdistusakt esitatakse Transpordiametile. Aktilt saadud kõrgehitise andmed sisestatakse Transpordiameti peetavasse kõrgtakistuste andmebaasi.

ICAO kehtestatud nõuete täitmiseks tuleks kõrgtakistuste andmebaasi kanda kõik takistused, mis läbivad lennuvälja lähiümbruse piirangupindu või mille kõrgus maapinnast on üle 100 meetri (ICAO 2018). Eestis on välja kujunenud praktika, mille kohaselt kantakse kõrgtakistuste andmebaasi kõik maapinnast üle 45 meetri kõrgused ehitised ja rajatised (Tarre 2023). Taolise praktika põhjuseks on asjaolud, et Eesti on võrdlemisi väikese pindalaga ja lauge pinnamoega riik, üle 45 meetri kõrguseid tehismoodustisi on riigi territooriumil sellisel hulgal, et nende andmebaasi sisestamine ja hilisem kontrollimine vajadusel on teostatav (Tarre 2023). Samuti on Eestis mitmeid lennuvälju, mille lähiümbruse piirangupinnad ja instrumentaallennuprotseduuride puhverpinnad ulatuvad tiheasustusaladele (vt joonis 1), mistõttu on üle 45-meetrise kõrgusega ehitiste lausaline kontroll lennuohutuse seisukohast vajalik (Tarre 2023).



Joonis 1. Väljavõte Lennart Meri Tallinna lennuvälja lähiümbruse piirangupindade kaardist (Aluskaart: Maa-amet)

Kuna aastate vältel on kõrgtakistuste andmebaasi pidamise reeglid muutunud ja sageli on reeglite muutmine jäänud ametlikult dokumenteerimata, on tänaseks päevaks kujunenud olukord, kus lennuväljade lähiümbruses asub objekte, mis oma asukoha ja kõrgusega võivad mõjutada lennuohutust ja lendude regulaarsust, kuid mis ei ole andmebaasis ja seetõttu ei osata nende mõjuga lennuprotseduuride kavandamisel arvestada. Samuti puudub praegu kord, mille kohaselt maastikult kõrgehitise eemaldamisel või selle kõrguse vähendamisel Transpordiametit teavitataks. Seega võib teisalt tekkida olukord, kus lennuprotseduuride kavandamisel lähtutakse reaalselt mitte eksisteerivast kõrgehitisest tulenevatest piirangutest.

2. Aerolaserskaneerimine kõrgtakistuste tuvastamise meetodina

2.1 Aerolaserskaneerimine

Aerolaserskaneerimise käigus mõõdistatakse õhusõidukil asuva LiDAR (*Light Detection And Ranging*) seadme laserkiire väljumis- ja peegeldumisaega mõõtes maapinna ja maakatte kõrgus (Giglierno 2006). Kuna õhusõiduk on varustatud ka GPS-seadme ja inertsiaalunduriga (IMU – *inertial measurement unit*), saab lasermõõdistuse siduda konkreetsete geograafiliste koordinaatidega (Giglierno 2006). Kui skaneeritav pind ei ole pidev, peegeldub laserkiir tagasi mitmes osas – kõrgematelt pindadelt varem ja maapinnani jõudnud kiirgus hiljem. Taolist nähtust kasutatakse metsa ja üksikute puude kõrguse hindamisel. Aerolaserskaneerimisel saadavate andmete kvaliteet väheneb lennukõrguse ja -kiiruse suurenedes, sest kuna laserimpulsside tihedus jm parameetrid ei muutu, väheneb mõõdistuspunktide arv pindalaühiku kohta ning kasvab laserkiire läbimõõt. (Kashani *et al* 2015)

2.1.1 Teoreetiline ülevaade

LiDAR meetodi kasutamise algus ulatub aega enne laseri leiutamist. Juba 1930ndatel hinnati valgusimpulsside peegelduste registreerimise teel atmosfääri tihedust ja pilvede kõrgust (Wandinger 2005). Peale laseri leiutamist 1960ndatel hakati sellele otsima erinevaid rakendusi ning 1971. aastal loodi esimene laser-meetodil töötav kaugusmõõtmise süsteem AN/GVS-3 (Wang *et al* 2020). Kuna esialgu olid seadmed ja sensorid tavakasutusse jõudmiseks liiga kallid ja ohtlikud (pimestamise oht), kasutati lasermeetodil kauguste mõõtmist peamiselt sõjalistel eesmärkidel ja teadustöös. Tänapäeval on LiDAR mõõtmine, sh aerolaserskaneerimine laialt levinud meetod mitmesuguste ülesannete lahendamisel. Kasutusalaadeks on muuhulgas suurte maa-alade pinnamudelite koostamine (Roth *et al* 2008), teede kõrgtäpsusega kaardistamine isejuhtivate sõidukite tarbeks, metsa- ja põllumassiivide kaardistamine, üleujutuste ja muude loodusõnnetuste modelleerimine jne (Wang *et al* 2020). Samuti kasutatakse LiDAR andmeid hoonete ja tiheasustusalade 3D-modelleerimiseks (Zhou *et al* 2008) ja ka näiteks elu- ja tööstushoonete kategoriseerimiseks (Jaafar *et al* 2010). Autoril ei õnnestunud leida varasemat uurimistööd, mis oleks samuti uurinud lennuohutuse aspektist aerolaserskaneerimise meetodi kasutamist kõrgehitiste suurima kõrguse määramisel.

2.1.2 Aerolaserskaneerimise (LiDAR-) punktide klassifikatsioon

Tulenevalt asjaolust, et eri tüüpi objektid on LiDAR-kaardistusel peegeldusomadustelt erinevad, saab LiDAR-punkte klassifitseerida objektide peegeldusomaduste alusel. Nii on

Ameerika Fotogramm-meetria ja Kaugseire Ühing (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS)) loonud LiDAR punktipilve LAS-failivormingule klassifitseerimiskoodid, mis jagab objektid 18-ks erinevaks tüübiks – maapind, ehitis, kõrgtaimestik, vesi jne) (ASPRS 2011). Eestis LiDAR-möödistuslende tegev Maa-amet hakkas eelkirjeldatud klassifikatsioonist lähtuma 2017. aastast ning kasutab neist klassifikaatoritest kaheksat (vt tabel 2).

Tabel 2: Maa-ameti kasutatavad ASPRS LiDAR punktide klassifitseerimiskoodid (Maa-ameti geoportaal 2023-2)

Nr	Klassifikaator
1	Klassifitseerimata punktid (<i>Unassigned</i>)
2	Maapind (<i>Ground</i>)
5	Kõrgtaimestik (multipeegeldusel tekkinud esimesed ja vahepeegeldused) (<i>High Vegetation</i>)
6	Ehitised (<i>Building</i>)
7	Anomaalsed maapinnast madalamad punktid (<i>Low Noise</i>)
9	Veekogud (<i>Water</i>)
17	Mitmetasandiliste ristmike teise tasandi maapinna punktid (<i>Bridge Deck</i>)
18	Anomaalselt kõrged punktid (<i>High Noise</i>)

2.1.3 Aerolaserskaneerimisel tekkivad vead

Nagu kõigil mõõtmistel, tekivad ka aerolaserskaneerimisel ja saadud andmete töötlemisel vead. Aerolaserskaneerimisel tekkivad vead saab jagada kahte rühma – diskreetsusest põhjustatud vead ja klassifitseerimise vead (Maa-ameti geoportaal 2023-1).

Punktipilvest erinevate nähtuste (maapind, hooned, taimestik) tuvastamiseks kasutatakse matemaatilisi algoritme. Kui aga kaardistatakse tiheda alustaimestikuga piirkonda, ei saada tagasipeegeldust alati mitte maapinnalt, vaid alustaimestikult. Seetõttu võivadki tekkida diskreetsusest põhjustatud vead – alustaimestiku punktid klassifitseeritakse maapinnaks. Taoliste vigade vältimiseks planeeritakse kaardistuslennud varakevadele, mil taimestik pole veel tärganud (Maa-ameti geoportaal 2023-1).

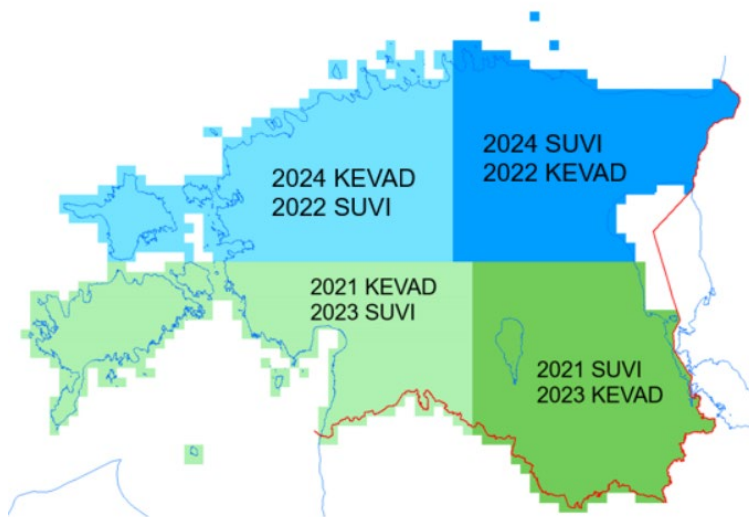
Klassifitseerimisvead tekivad klassifitseerimise algoritmide sisendparameetritest, kuna paratamatult tekib olukordi, mil määratud sisendparameetreid ületavate väärtuste korral annab algoritm ebaõigeid tulemusi (Maa-amet 2023). Nii ei pruugi laugele maapinnale kohandatud algoritm maapinnana tuvastada kohalikke järsakuid. Samas võib liiendatud maapinnale

kohandatud algoritm maapinnaks klassifitseerida ka ebaühtlase taimestiku (Maa-ameti geoportaal 2023-1).

2.2 Maa-amet

Nagu Lennuametki, loodi Maa-amet 16. jaanuaril 1990. aastal (Maa-amet 2023-1). Üks peamisi Maa-ameti tegevusvaldkondi on Eesti ruumiandmete kogumine, haldamine ja avalikkusele kättesaadavaks tegemine (Maa-amet 2023-2). Üheks ruumiandmete kogumise meetodiks on aerolaserskaneerimise mõõdistuslennud.

Maa-amet teeb Eestis aerolaserskaneerimise mõõdistuslende alates 2008. aastast (Maa-ameti geoportaal 2023-1). Kogu Eesti territoorium kaetakse kevadiste LiDAR mõõdistusega nelja aasta jooksul, s.t. iga nelja aasta järel toimuvad kaardistuslennud sama piirkonna kohal (vt joonis 2).



Joonis 2. Aerolaserskaneerimise lendude ajakava 2021-2024 (Maa-ameti geoportaal 2023-3)

Nagu jooniselt 2 ilmneb, toimuvad lisaks kevadistele kaardistustele ka suvised metsanduslikud kaardistused. Veel toimuvad igal aastal lisakaardistuslennud suuremate asulate kohal. Kõigi kirjeldatud lendude vältel kogutakse ka aerolaserskaneerimise kõrgusandmeid. Mõõtmispunktide tihedus on suurem tiheasustusaladel – alates 2017. aastast 18 p/m² (Maa-ameti geoportaal 2023-2). Üle-eestiliselt on mõõdistuspunktide tihedus kevadisel mõõtmisel 2,1 p/m², suvisel mõõtmisel 0,8 p/m² (Maa-ameti geoportaal 2023-2).

3. LiDAR meetodiga kõrgtakistuste tipukõrguse tuvastamine

3.1 Metoodika

Käesoleva töö esmane eesmärk on kontrollida, kas Maa-ameti kogutud aerolaserskaneerimise (LiDAR) kõrguspunktide vertikaalne täpsusklass vastab Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsiooni ICAO seatud nõuetele, kus lennuvälja keskpunktist 45 km raadiuses peab kõrgtakistuste vertikaalne täpsus olema 3 meetrit. Selleks valiti Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasist välja 53 lennutakistust peamiste kõrgrajatiste tüüpide – korsten, kirikutorn, hoone, mast – hulgast. Kontrollitavad kõrgtakistused asuvad üle Eesti nii tihe- kui ka hajaasustusega aladel. Kuna Transpordiameti andmebaasi kannetest moodustavad ligi 90% mastid, siis on nende valim ka käesolevas valimis suurim. Kõrgtakistuste andmebaasis olevaid kõrgusi võrreldi aastatel 2019-2022 tehtud aerolaserskaneerimise andmetega, mis Maa-ameti geoportaalist laz-vormingus failidena alla laeti.

Kõrgtakistuste valimist jäid välja elektrituulikud, kuna nende täpset tipukõrgust (tuuliku laba ülemist vertikaalset asendit) ei saa aerolaserskaneerimise meetodil labade liikumise tõttu hinnata. Ka mittetöötava tuuliku puhul pole tagatud, et selle laba just kõrgeimas asendis peatus. See meetodi puudus ei ole lennuohutuslikust vaatepunktist kuigi oluline, sest tuulikute ja tuuleparkide rajamine toimub lennundusseaduse nõuetest (Riigi Teataja 2023) tulenevalt alates planeerimisest kuni kasutusloa väljastamiseni koostöös Transpordiametiga ja seega on tuulikute asukoht ja kõrgus Transpordiametile piisava täpsuse ja ajakohasusega teada.

Lisaks Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasi kantud kõrgustele kasutati võrdleva andmeallikana Eesti topograafilise andmekogu ETAK ehitiste nähtusklassi ja selle alt hoone (401) ja kõrgtakistuse (402) nähtuseid (Maa-ameti geoportaal 2023-8). ETAK-is on nii hoonete kui ka kõrgrajatiste kõrgused mõõdetud fotogramm-meetrilise mõõdistuse teel maapinnast ja ümardatud täismeeetriteks (Maa-ameti geoportaal 2023-8). Fotogramm-meetria on andmehõivetehnoloogia, mis võimaldab fotode abil määrata objektide kuju, asendit ja mõõtmeid, luues kolmemõõtmelise nähtuse kahemõõtmelistest kujutistest esialgse kolmemõõtmelise nähtuse mudeli (Mõisja *et al*, 2019). Maa-amet kasutab fotogramm-meetriliseks mõõdistuseks aeropildistamist ning spetsiaalseid digitaalseid stereotööjaamu (Maa-ameti geoportaal 2023-4).

Täiendava abivahendina kõrgtakistuse kontrollimiseks kasutati Maa-ameti kaldaerofotode andmebaasi, mis sisaldab miljoneid aerofotosid kogu Eesti territooriumist (Maa-ameti

geoportaal 2023-5). Nende fotode abil on võimalik kontrollida kõrgtakistuste selliseid osi, mida LiDAR meetod ei pruugi suuta tuvastada (nt antennid katustel või mastide tipus).

Samuti kasutati võrdleva andmeallikana Ehitisregistri andmebaasi, mis võimaldab katastriüksuse tunnuse või lähiaadressi alusel tuvastada katastriüksusel asuva hoonet või rajatist ning selle ehitisregistri koodi alusel kontrollida ehitise mõõtmeid, sh kõrgust maa- ja merepinnast. Vaikimisi kantakse ehitisregistrisse kooskõlastatud ehitusloal olevad andmed, sh kõrgus. Kui kasutusloa väljastamise tingimuseks on hoonele teostusmöödistuse tegemine, kantakse ehitisregistrisse teostusmöödistusel saadud andmed. Juba olemasolevate hoonete kõrgusi vaikimisi ei kontrollita, andmeid uuendatakse juhul, kui omanik seda taotleb. (Ehitisregister 2023).

3.1.1 Võimalikud probleemid LiDAR meetodi rakendamisel

Laserskanerimise möödistuspunktide tihedus (üle-eestilisel kaardistusel $2,1 \text{ p/m}^2$) ei ole kogu Eesti territooriumil ühtlane. Maa-amet kinnitab ka oma kodulehel, et aerolaserskanerimise kõrgusandmete kogumine on prioriteet vaid tiheasustusalasid kaardistades, üle-eestiliste lendude puhul on see teisejärguline (Maa-ameti geoportaal 2023-2). Seega võivad väljaspool tiheasustusalasid asuvate sõrestikkonstruksioonide (mobiilsidemastid, telemastid jms) tipud tõenäoliselt sel meetodil fikseerimata jääda. Kuna valdav enamik mobiilimastidest on rajatud viimase 25 aasta jooksul ja on seetõttu juba kõrgtakistuste andmebaasis olemas, nagu ka telemastid, ei mõjuta see puudus oluliselt andmete kasutatavust. Kirikutornide, korstnate, viljaelevaatorite tornide jms kõrgused peaksid aerolaserskanerimise meetodil olema kas piisava täpsusega tuvastatavad või siis vähemalt andma piisava info, et lennutakistus vajadusel täpsemalt üle mõõta.

Konsulterimisel Maa-ameti eksperdiga toodi välja asjaolu, et Maa-ameti avalikust andmebaasist eemaldatakse riigikaitseliste objektide kirjed (Grünthal 2020). See probleem vajab töö käigus täpsemat kontrolli. Mitmed eelnimetatud objektide projektid on Transpordiametiga kooskõlastatud ja nende andmed seega andmebaasis olemas. Lisaks saab Transpordiamet vajadusel taotleda ligipääsu riigikaitseliste objektide kõrgusandmetele ning leppida kokku nende objektide andmete kasutamise tingimused.

Võimalikuks vigade allikaks on veel asjaolu, et aerolaserskanneri ja möödetava objekti vahele satub kaardistamise hetkel mõni lendav objekt (lind, droon vms) või eraldub möödetavast korstnast sellise tihedusega suitsu või auru, mis tekitab peegelduse kõrgemalt tasapinnalt kui on möödetava objekti tipp. Taolise anomaalia kontrollimiseks saab kasutada samast alast tehtud

varasemaid LiDAR kaardistuse andmeid, kuna on ebatõenäoline, et lendav objekt kahel eraldi mõõdistusaastal kaardistuse hetkel samasse kohta satub. Teine võimalus on kasutada ArcGIS Pro funktsiooni View – Convert – To Local Scene. Nimetatud töövahend genereerib LiDAR-punktidest vaadeldava objekti kolmemõõtmelise pildi, mida saab igal teljel pöörata. Saadud 3D-vaates on võimalik kontrollida, kas objekti kohal asuvad punktid moodustavad objektiga visuaalse terviku või mitte. Lisaks on võimalik ehitist visuaalselt kontrollida kaldaerofotode abil.

3.1.2 ETAK-andmete kasutamise piirangud

Ehkki Maa-amet teeb Eesti suuremate asulate kohal pildistuselendade pea igal aastal, siis hoonete ja kõrgtakistuste lisamine ja nende andmete muutmine toimub kord nelja aasta tagant või juhul, kui Ehitisregistri andmebaasi sisestatakse kasutusloa saanud hoone ruumikuju (Pauts 2023). Seega tuleb võrdlemisel arvestada, et viimase paari aasta jooksul rajatud ehitisi ei pruugi ETAK-andmebaasis olla.

3.2 Andmete ettevalmistamine

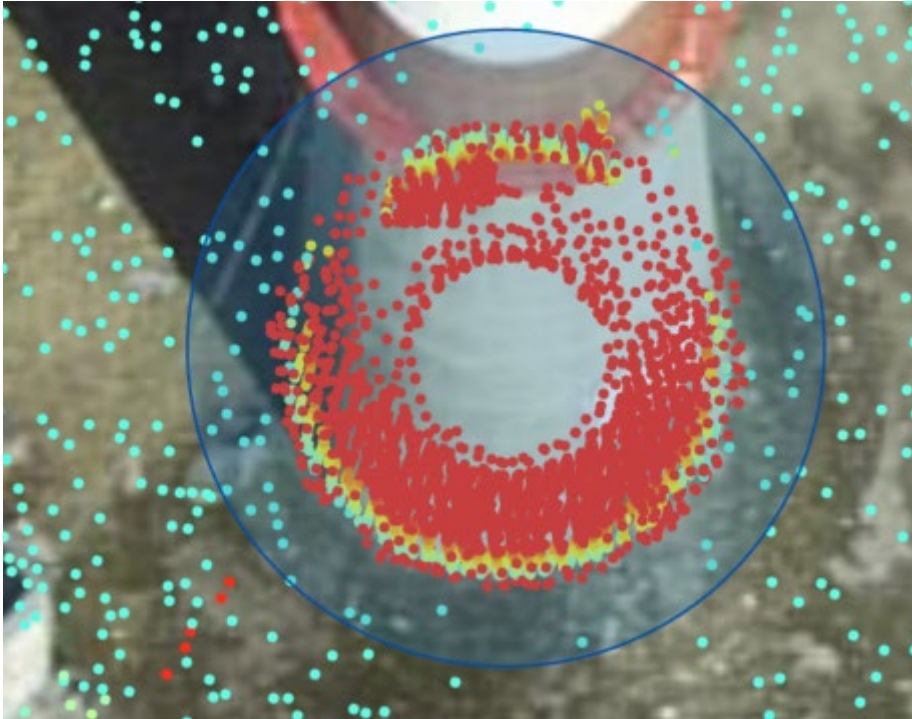
Alusandmetena laadis autor Maa-ameti geoportaalist alla valimisse sattunud lennutakistuste viimase aerolaserskaneerimise kõrguspunktide laz-failid vastavalt 1:2000 kaardilehtede jaotusele (Maa-ameti geoportaal 2023-6). Andmete töötlemiseks kasutati ESRI tarkvara ArcGIS Pro 2.9.2. Kuna ArcGIS Pro ei suuda laz-faile kuvada, tuli failid esmalt las-vormingusse teisendada. Selleks kasutati ArcPro Geoprocessing tööriista Convert LAS. Las-faili avades saab kuvatavaid punkte filtreerida käsuga LAS Filter. Kuna üheks võrdlusandmebaasiks olevas ETAK-is on hoonete ja kõrgrajatiste kõrgusandmed esitatud arvestatuna maapinnast ja LiDAR andmete kõrgus on antud arvestatuna merepinnast, tuleb leida kõrgtakistuse vahetu ümbruse LiDAR punktide maapinnakõrgus. Selleks kasutatakse käsku LAS Filter – Ground, mille järel kuvatakse üksnes maapinna kõrguspunktid. Huvipakkuva kõrgtakistuse maapinnakõrguse saamiseks kasutati Geoprocessing tööriista LAS Point Statistics by Area. Sisendandmekoguks on las-vormingusse teisendatud 1:2000 kaardileht, sisendhulknurgana kasutas autor hoonete puhul ETAK-andmebaasis olevate hoonete ruumikujude ümber loodud puhvrit. Korstnad, mastid ja kirikutornid on ETAK-andmekogus esitatud punktidenä, nende ümber joonistas autor ise puhvri, vastavalt objekti kujule kas ringi või hulknurga (vt joonis 3). Väljundväärtustena võimaldas Geoprocessing tööriist LAS Point Statistics by Area kuvada valitud piirkonnas asuvate kõrguspunktide arvu,

nende miinimumkõrguse, maksimumkõrguse, keskmise kõrguse ja standardhälbe. Maapinna kõrguse leidmiseks kasutati keskmist kõrgust, mis ümardati täpsusega kaks kohta peale koma.



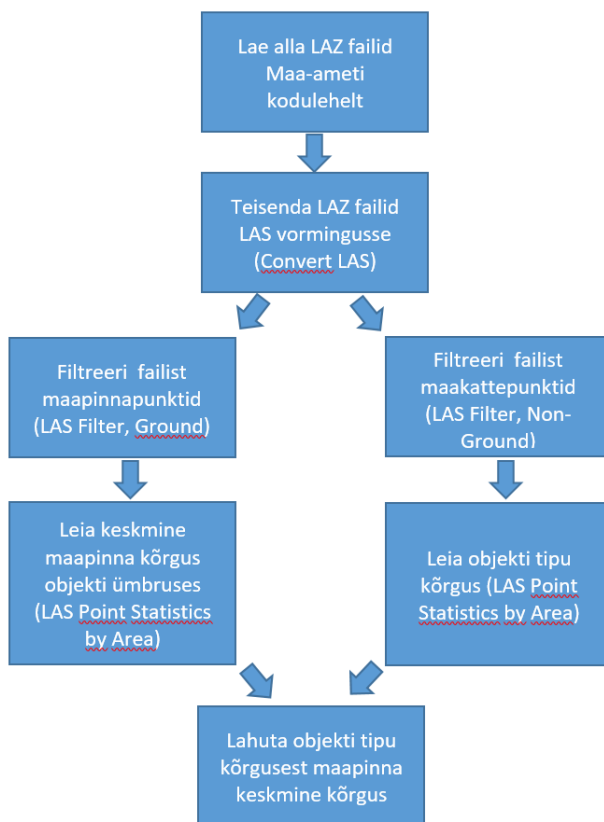
Joonis 3. Tartu Turu tn 18 korstna maapinna keskmise kõrguse leidmine (Aluskaart: Maa-amet)

Kõrgtakistuse suurima kõrguse leidmiseks kasutati esmalt käsku LAS Filter – Non-Ground, mis kuvab maakatte kõrguspunktid. Kõrguspunkte on küll võimalik küll ka täpsemalt filtreerida (nt Layer Properties – LAS Filter – 6 Building), kuid kuna korstnate ja mastide kõrguspunktid olid peamiselt klassifitseeritud kõrgetaimestiku (High Vegetation) alla, loobus autor peale esmaseid katsetusi sellest võimalusest ja kasutas üldist Non-Ground filtrit (Joonis 4). Piirkonna suurima väärtusega kõrguspunktide leidmiseks kasutati taas Geoprocessing tööriista LAS Point Statistics by Area ja selle väljundväärtusena maksimumkõrgust.



Joonis 4. Tartu Turu tn 18 korstna tipu kõrguse leidmine (Aluskaart: Maa-ameti)

Lihtsustatult näeb kogu töövoog välja selliselt, nagu on kujutatud joonisel 5.



Joonis 5. LiDAR-andmestikust objekti tipu kõrguse tuvastamine

3.3 LiDAR meetodil tipukõrguse tuvastamise tulemused

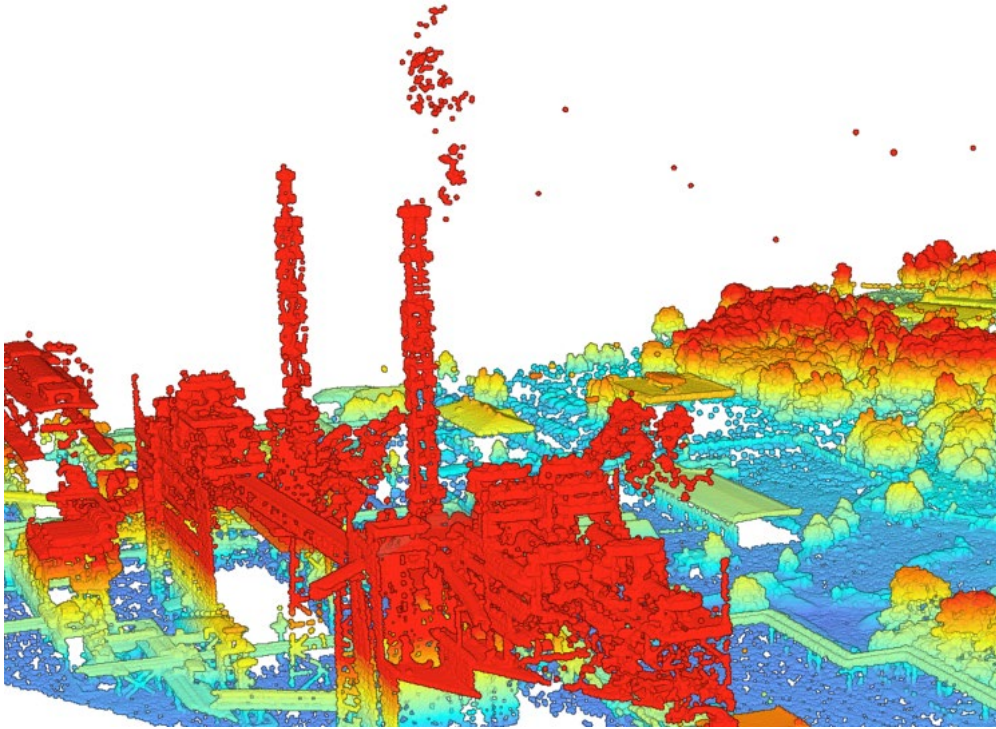
3.3.1 Korstnad

Esimesena võrreldi valimisse sattunud korstnate kõrgusi (vt tabel 3). Tabelis on esitatud kõrgtakistuse nimi Transpordiameti andmebaasis (veerg nimi), Transpordiameti identifikaator (TA_id), ETAK identifikaator (ETAK_id), maapinnast arvestatud tipukõrgused Transpordiameti (TA_h) ja ETAK (ETAK_h) andmekogus, käesoleva töö käigus LiDAR-meetodil mõõdetud tipukõrgus (lidar_h) samuti maapinnast arvestatuna ja viimases veerus LiDAR kaardistuse aasta. Ehisregistri andmebaasis puudusid valimisse sattunud korstnate kõrgusandmed.

Tabel 3. Korstnate kõrgusandmed

nr	nimi	TA_id	ETAK_id	TA_h	ETAK_h	lidar_h	aasta
1	Sillamäe	5003	1946103	149.2	150	150.52	2021
2	Tartu	5091	1945982	94.3	94	90.5	2022
3	Ülemiste	5232	1947510	91.8	90	91.24	2022
4	Balti_SEJ	5034	5147655	70.5	70	69.22	2021
5	Balti_SEJ	6038	5147657	180.1	180	180.29	2021
6	Balti_SEJ	5033	5147656	182.4	180	180.44	2021
7	Mustamäe	5228	1947157	120.5	120	119.91	2022
8	Kadaka	5068	1947422	129.8	130	130.95	2022
9	Kiviteri	5044	4307431	99	100	139.66	2021
10	Tartu_Annesoojus	5095	1945980	77.8	75	76.81	2022
11	Ebavere	5790	6645075	60	60	72.05	2021

Kõrgusandmeid võrreldes torkab silma, et korstnate 9 (Kiviteri) ja 11 (Ebavere) LiDAR-meetodil saadud kõrgus ületab oluliselt teisi sama korstna kõrgusandmeid. Kuna Maa-ameti geoportaali ortofotol oli näha, et nii Kiviteri kui ka Ebavere korstnad pildistamise hetkel suitsesid, kontrollis autor, kas korstnast tõusev suits võis ka LiDAR-kõrguspunkte mõjutada, kasutades ArcGIS Pro funktsiooni View – Convert – To Local Scene. Nimetatud töövahend genereerib LiDAR-punktidest vaadeldava objekti kolmemõõtmelise pildi, mida saab igal teljel pöörata (vt joonis 6).



Joonis 6. Kiviteri kompleksi LIDAR punktide 3D-vaade (Maa-amet 2023)

Nagu jooniselt 6 nähtub, annabki korstna suits korstna tipust kuni 40 meetrit kõrgemale ulatuvad LIDAR punktid. Silma järgi korstna tipus asuvaid LIDAR-punkte käsitsi kontrollides sai autor korstna kõrguseks 100 meetrit, mis vastab teistest andmekogudest saadud andmetele. Autor püüdis korstnate kõrguseid täpsustada ka viimasest (2021. aasta) mõõdistusest varasemaid LIDAR-andmeid kasutades. Ebavere korsten varasemal mõõtmisel ei suitsunud ja nii õnnestus korstna kõrguseks mõõta 60,09 meetrit, mis langeb hästi kokku teistes andmebaasides olevate andmetega (60 meetrit). Kiviteri korsten aga suitses ka 2019. aasta kaardistushetkel, nii et selle tipu kõrguseks jäi 2021. aasta 3D pildilt silma järgi hinnatud 100 meetrit.

Teine objektide grupis tuvastatud anomaalia on kõrgtakistuse nr 2 (Tartu Turu tn 18 korsten) LIDAR-andmete alusel saadud üle 3 meetri madalam kõrgus kui teistes andmekogudes esitatud kõrgused. Viga ei tuvastatud maapinna keskmise kõrguse arvutamises, kuna Maa-ameti geoportaali maainfo teemakihis oli kõrgus sisuliselt sama. Ka ei leitud LIDAR-punktidest 3D-vaadet luues korstna kujus anomaaliaid. Võimalik, et korstna tipus paikneb nii väikese läbimõõduga antenn vms, mis LIDAR-mõõdistusel ei kajastu. Selle võimaluse vastu räägib Maa-ameti kaldaerofotode kontroll, mis taolist antenni korstna tipus ei tuvastanud. Teine

võimalus on, et korstna tipus on aastaid tagasi mõni mast või antenn olnud, kuid see on hiljem maha monteeritud ja andmebaasides on andmed uuendamata jäänud.

3.3.2 Kirikud

Järgmisena mõõdeti kirikute – täpsemalt kirikutornide – tipukõrgusi, vt tabel 4. Kuna üle 45 meetri kõrguseid kirikutorne on Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasis vähe, on ka valim väiksem. Erandina lisati valimisse Halliste kirik, mida Transpordiameti andmebaasis pole, kuid mille kohta oli teada, et see asub hajaasustusalal ja selle torni kõrgus ulatub maapinnast üle 45 meetri.

Tabel 4. Kirikute kõrgusandmed

nr	nimi	TA_id	ETAK_id	TA_h	ETAK_h	EHR_h	lidar_h	aasta
1	Tartu_Peetri	5084	6830292	52	52	x	56.3	2022
2	Oleviste	5006	1947470	124.3	124	x	119.79	2022
3	Kambja	5103	1946895	50	50	53	51.11	2022
4	Kose	5221	1944781	56	54	x	55.76	2021
5	Pärnu_Eliisabethi	5227	6831246	53.4	53	x	53.46	2022
6	Halliste	x	1944454	x	58	x	59.27	2021

Kirikute valimis torkab silma asjaolu, et Tartu Peetri kiriku LiDAR-iga määratud kõrgus on üle nelja meetri kõrgem teistes andmebaasides esitatud kõrgusest. 3D vaatest ilmneb, et kõrgeimad punktid on kiriku torni tipuga kohakuti, näha ei ole mingit selget vahet torniga, mis vihjaks linnuparvele vms. Kontrolliti ka aasta varem (2021) tehtud LiDAR-kaarti, sellel on tipu kõrgus veel kõrgemal (57,08 m) kui 2022. aasta kaardil. Üks võimalik kõrguste erinevuse põhjus võib olla selles, et 2011. aastal tehti kirikule katuse remont (Jõgi 2011). Kahjuks ei ole teada, millal Transpordiameti ja ETAK andmebaasis kiriku andmeid uuendati, seega ei saa seda hüpoteesi kontrollida. Tegelikult täpse kõrguse kontrollimiseks oleks vajalik teha välimõõtmine.

Teisena jäi silma asjaolu, et Oleviste kiriku kõrgus on LiDAR meetodil mõõdetuna u 4 meetrit madalam teiste andmebaaside kõrgusandmetest. See võib tuleneda asjaolust, et laserimpulss ei sattunud kirikutorni kõrgeimasse punkti. Aasta varem, 2021. aastal tehtud kaardistuse kõrgeim punkt asub 122,4 meetri kõrgusel, mis on teiste andmetega võrreldes küll madalam, kuid mahub juba nõutava mõõtmistäpsuse piiridesse (+/- 3 meetrit).

3.3.3 Hooned

Hoonete valikut mõjutas oluliselt asjaolu, et Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasis on kõigest 15 kõrghooneks klassifitseeritud ehitist. Nagu sissejuhatuses öeldud, puuduvad

andmebaasist enne Transpordiameti eelkäija Lennuameti asutamist rajatud ehitised. See selgitab, miks puuduvad andmebaasist nt Tallinna Õismäe 16-korruselised paneelilamud, kuid jätab selgusetuks, miks ei ole andmebaasis selliseid Tartu maamärke, nagu Emajõe Ärikeskus (ETAK andmetel kõrgus 49 meetrit) või Tigutorn (ETAK andmetel kõrgus 71 meetrit). Ainsa Tartu kõrghoonena on andmebaasis Maaülikooli tornühiselamu (F. R. Kreutzwaldi tn 52), kuid selle asukoht on märgitud hoopis aadressile Laulupeo 15. Valimisse sattunud hooned on esitatud tabelis 5.

Tabel 5. Hoonete kõrgusandmed

nr	nimi	TA_id	ETAK_id	TA_h	ETAK_h	EHR_h	lidar_h	aasta
1	Jänesselja_elevaator	5241	98140	47.3	46	x	47.11	2022
2	Ülenurme_elevaator	5101	698545	46	0	x	47.06	2019
3	Järvevana	6126	6841581	51.75	51	50.5	51.81	2022
4	Järvevana	6127	6841580	56.19	56	55.5	56.92	2022
5	Lõõtsa 5	6189	6937456	44.94	45	44.9	46.62	2022
6	Virbi 10	6186	7229439	51.9	51	49.9	51.95	2022
7	Valukoja 8 / Öpiku A	6187	7030111	48.7	46	45	48	2022
8	Sepise 9 / Öpiku B	6198	7291722	48.28	47	45	47.85	2022
9	Tartu_EPÜ_ühiselamu	5085	712182	65.9	49	50.2	52.67	2022

Tabelist 5 nähtub, et eri andmebaaside hoonete kõrgusandmed langevad nii haja- kui ka tiheasustusaladel küllalt hästi kokku. Suurima anomaaliana saab välja tuua kõrgtakistuse nr 9 (Maaülikooli tornühiselamu), mille kõrgus Transpordiameti andmebaasis on üle 10 meetri suurem teiste andmebaaside kõrgusest.

Asjaolu, et Transpordiameti andmebaasis esitatud koordinaadid paigutasid kõrgtakistuse aadressile Laulupeo 15, tekitas hüpoteesi, et eksitud pole mitte objekti koordinaatidega, vaid nimega. Nimelt asub Laulupeo 15 aadressil A. Le Coq õllevabriku hoone, mille torn ümbritsevast hoonestusest selgelt üle ulatub. 2022. aasta LiDAR andmete kontroll paraku hüpoteesi ei toetanud. Torni tipp oli LiDAR punktidega nii hästi kaetud, et eristatav oli ka torni tipus asuv lipp, kuid punktide maksimaalne kõrgus oli 40 meetrit arvestatuna maapinnast, mis jääb Transpordiameti andmebaasis esitatud 65,9 meetrist kaugemale allapoole.

Olukorda aitaks selgust tuua välimõõdistus, kuid arvestades asjaolu, et Transpordiameti andmebaasi kanded on kohati aastaid kontrollimata ja uuendamata, on tõenäoline, et ühiselamu katusel paiknes kunagi mast või antenn, mille püstitamine Lennuametiga kooskõlastati, kuid mille eemaldamise info mingil põhjusel esitamata jäi.

Selgusetuks jääb, miks on ETAK-is jäänud mõõtmata kõrgtakistuse nr 2 (Ülenurme elevaator) kõrgusandmed.

3.3.4 Mastid

Mastide arv on Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasis protsentuaalselt kõige suurem, seega on ka seda tüüpi rajatiste valim suurim. Samas on valdav osa mastidest sõrestiktüüpi, mistõttu on eriti hajaasustusega piirkondades suur tõenäosus, et laserimpulss masti tippu ei taba ja LiDAR meetodil täpse kõrguse mõõtmine on seetõttu raskendatud.

Tabel 6. Mastide kõrgusandmed

nr	nimi	TA_id	ETAK_id	TA_h	ETAK_h	EHR_h	lidar_h	aasta
1	Valgjärve	5009	1946872	349.7	347	347.7	349.87	2019
2	Koeru	5002	1945133	350.2	349	348	56.67	2022
3	Tallinna_TV	5007	1945852	314	314	314	307.38	2022
4	Sõrve-Lõopõllu	5023	1947284	92.3	92	92	89.21	2021
5	Kuressaare	5022	6831262	47.9	48	x	45.88	2022
6	Tartu_viljasalv	5087	6831232	54	54	x	56.74	2022
7	Tartu_Raudtee	5088	1945973	60.6	60	x	60.83	2022
8	Kristiine	5071	1947486	107.2	93	103	100.87	2022
9	Kihnu	5175	5393246	101.9	100	100	101.64	2022
10	Ruhnu	5192	1947266	102.5	103	x	99.12	2021
11	Jõhvi	5334	4307482	106.4	106	x	0	2021
12	Kärdla	5336	1945048	67.7	64	60	60.68	2021
13	Pärnu	5366	5393284	75.8	71	x	0	2022
14	Paldiski	5306	1945487	80	85	80	82.7	2021
15	Selja	5310	1946968	100	100	100	100.64	2021
16	Elva	5316	1946886	104	104	x	100.81	2020
17	Narva_TV	5125	5147747	79.5	80	x	75.14	2022
18	Narva	5818	5147691	72	72	72	75.2	2021
19	Kohila	5662	1944753	80	80	x	80.31	2021
20	Kõmsi	5460	5393324	80	78	x	80.16	2021
21	Kaansoo	5729	5393324	99.2	99	99.2	99.49	2021
22	Võru	5369	1946353	99.5	100	x	0	2022
23	Võru_TV	5080	6831249	52	52	x	53.74	2022
24	Mehikoorma	5736	6263417	99.2	100	99.2	55.35	2022
25	Õuna	5378	1945080	80	80	80	82.15	2021
26	Türi	5344	1946258	60	62	x	60.89	2021
27	Aseri	5248	5639840	100	90	100	94.43	2021

Nagu tabelist 6 näha võib, on Transpordiameti ja ETAK-i andmete vahel kohati üsna suur erinevus, nii on masti nr 8 (Kristiine) kõrguste erinevus 14 meetrit ja masti nr 27 (Aseri)

kõrguste vahe 10 meetrit. Huvitaval kombel jääb LiDAR meetodil mõõdetud kõrgus üsna täpselt Transpordiameti andmebaasis ja ETAKis esitatud kõrguste vahemiku keskele.

Mastide andmeid uurides sai ka kinnitust punktis 3.1.1 välja toodud probleem, mille kohaselt on riigikaitseliste objektide LiDAR-andmed avalikust andmekogust välja filtreeritud. Nii sattusid valimisse mastid nr 11 (Jõhvi), nr 13 (Pärnu) ja nr 22 (Võru), mille ümbruses maakattepunktid puudusid. Samas on nende mastide asukoha- ja kõrgusandmed ETAK-andmebaasis olemas.

LiDAR-meetodi puudused andsid enim tunda masti nr 2 (Koeru) mõõtmisel, mil u 350 meetri kõrguse masti kõrguseks saadi kõigest 56,67 meetrit. Õnneks on ka hajaasustusega piirkondades tehtud LiDAR-kaardistustlende korduvalt ja vanemalt (2017. aasta) LiDAR kaardilehelt saadi masti kõrguseks 349,79 meetrit. Sarnane suur anomaalia tekkis ka masti nr 24 (Mehikoorma) kõrgusandmetes – 100 meetri asemel 55,35 meetrit. Ka siin aitas andmeid täpsustada ja kontrollida vanema, 2019. aasta LiDAR mõõdistus, mis andis masti kõrguseks 99,66 meetrit.

3.4 Tulemuste võrdlus

Kokkuvõtteks võib kontrolltakistuste analüüsi tulemusena tõdeda, et LiDAR andmete alusel on võimalik kõrgrajatiste kõrgusi ICAO Ala 2 täpsusnõuetele vastavalt mõõta. Samuti on võimalik eri aastate LiDAR andmeid kasutada kontrolliks, kui olemasolevate andmebaaside kõrgusandmed oluliselt lahknevad. Parandatud andmetega kontrolltakistused on esitatud tabelis 7:

Tabel 7. Parandatud andmetega kõrgtakistused.

nr	tyyp	nimi	TA_h	ETAK_h	EHR_h	lidar_h	aasta	märkus / parandusmeetod
1	korsten	Sillamäe	149,2	150	x	150,52	2021	
2	korsten	Tartu	94,3	94	x	90,5	2022	
3	korsten	Ülemiste	91,8	90	x	91,24	2022	
4	korsten	Balti_SEJ	70,5	70	x	69,22	2021	
5	korsten	Balti_SEJ	180,1	180	x	180,29	2021	
6	korsten	Balti_SEJ	182,4	180	x	180,44	2021	
7	korsten	Mustamäe	120,5	120	x	119,91	2022	
8	korsten	Kadaka	129,8	130	x	130,95	2022	
9	korsten	Kiviteri	99	100	x	139,66	2021	3D kontroll
10	korsten	Tartu_Annesoojus	77,8	75	x	76,81	2022	
11	korsten	Ebavere	60	60	x	60,09	2019	2019 andmed
12	kirik	Tartu_Peetri	52	52	x	56,3	2022	

13	kirik	Oleviste	124,3	124	x	122,4	2021	2021 andmed
14	kirik	Kambja	50	50	53	51,11	2022	
15	kirik	Kose	56	54	x	55,76	2021	
16	kirik	Pärnu_Eliisabethi	53,4	53	x	53,46	2022	
17	kirik	Halliste		58	x	59,27	2021	
18	hoone	Jänesselja_elevaator	47,3	46	x	47,11	2022	
19	hoone	Ülenurme_elevaator	46	0	x	47,06	2019	
20	hoone	Järvevana	51,75	51	50,5	51,81	2022	
21	hoone	Järvevana	56,19	56	55,5	56,92	2022	
22	hoone	Lõdtsa 5	44,94	45	44,9	46,62	2022	
23	hoone	Virbi 10	51,9	51	49,9	51,95	2022	
24	hoone	Valukoja 8 / Öpiku A	48,7	46	45	48	2022	
25	hoone	Sepise 9 / Öpiku B	48,28	47	45	47,85	2022	
26	hoone	Tartu_EPÜ_ühiselamu	65,9	49	50,2	52,67	2022	Kaldaerofotod
27	mast	Valgjärve	349,7	347	347,7	349,87	2019	
28	mast	Koeru	350,2	349	348	349,79	2017	2017 andmed
29	mast	Tallinna_TV	314	314	314	307,38	2022	
30	mast	Sõrve-Lõopõllu	92,3	92	92	89,21	2021	
31	mast	Kuressaare	47,9	48	x	45,88	2022	
32	mast	Tartu_viljasalv	54	54	x	56,74	2022	
33	mast	Tartu_Raudtee	60,6	60	x	60,83	2022	
34	mast	Kristiine	107,2	93	103	100,87	2022	
35	mast	Kihnu	101,9	100	100	101,64	2022	
36	mast	Ruhnu	102,5	103	x	102,59	2017	2017 andmed
37	mast	Jõhvi	106,4	106	x	0	2021	Salastatud objekt, kõrguspunkte pole
38	mast	Kärdla	67,7	64	60	60,68	2021	
39	mast	Pärnu	75,8	71	x	0	2022	Salastatud objekt, kõrguspunkte pole
40	mast	Paldiski	80	85	80	82,7	2021	
41	mast	Selja	100	100	100	100,64	2021	
42	mast	Elva	104	104	x	100,81	2020	
43	mast	Narva_TV	79,5	80	x	75,14	2022	
44	mast	Narva	72	72	72	75,2	2021	
45	mast	Kohila	80	80	x	80,31	2021	
46	mast	Kõmsi	80	78	x	80,16	2021	
47	mast	Kaansoo	99,2	99	99,2	99,49	2021	
48	mast	Võru	99,5	100	x	0	2022	Salastatud objekt, kõrguspunkte pole
49	mast	Võru_TV	52	52	x	53,74	2022	
50	mast	Mehikoorma	99,2	100	99,2	99,66	2019	2019 andmed
51	mast	Õuna	80	80	80	82,15	2021	
52	mast	Türi	60	62	x	60,89	2021	
53	mast	Aseri	100	90	100	94,43	2021	

Vajalikust täpsusklassist +/- 3 meetrit jäi 53-st ehitisest esialgsel mõõtmisel välja üheksa. Neist kolm olid riigikaitse objektid, mille punktid olid kaardilehtedelt välja filtreeritud. Kahe korstna ebatäpse kõrguse põhjuseks oli korstnast tõusev suits. Ühel juhul sai korstna kõrgust kontrollida vanema punktiple abil, teisel juhul 3D-vaates visuaalselt korstna kõrgeimat punkti tuvastades. Kahel mastil (Koeru ja Mehikoorma) aitas samuti kõrgust täpsustada vanema aastakäigu punktiple. Kristiine masti mõõtetulemuse täpsust ei saa hinnata, kuna erinevatest andmebaasidest pärinevad kõrgusandmed erinevad 14 meetri ulatuses. Nii on Tallinna teletorn ainus kõrgtakistus valimis, mille LiDAR meetodil saadud kõrgus (307,4 m) jääb väljapoole nõutavat mõõtmistäpsust (teiste andmebaaside kohaselt on kõrgus 314 m).

4. Lennuvälja ümbruse kõrgtakistuste kaardistamine

Töö esimene ülesanne oli kontrollida, kas LiDAR meetod võimaldab saada rajatiste kõrguse kohta adekvaatset infot. Kuna tulemus oli positiivne, asuti lahendama teist ülesannet, kus 1:2000 kaardilehelt tuvastati kõik maapinnast üle 45 meetri kõrgused rajatised. Ideaaleesmärk oli tuvastada kõik lennutakistused Tallinna lennuvälja Ala 2-s. Selle ala suurus on 45 km raadiusega ring keskpunktiga lennuvälja kohal, seega oleks uuritavaid kaardilehti kokku üle 6000. Tuvastamise proovipiirkonnaks valis töö autor välja 4 x 10 km suuruse ristkülikukujulise ala Lennart Meri Tallinna lennuväljast läänes (vt joonis 7)



Joonis 7. Kõrgtakistuste tuvastamise piirkond (Maa-ameti geoportaal 2023-7)

Piirkond sai Tallinna lennuvälja lähisteleva valitud seetõttu, et tegu on Eesti suurima lennuväljaga, mille instrumentaallennuprotseduuride disainimisel on väga oluline teada võimalikult täpselt kõrgtakistuste asukohta ja kõrgust.

4.1 Andmete ettevalmistamine

Töö teostamiseks tuli esmalt taaskord Maa-ameti kodulehelt vajalike kaardilehtede laz-failid alla laadida ning need siis Convert LAS käsuga las-vormingusse teisendada. Lennutakistuste tuvastamiseks oli vajalik lahutada maakatte kõrgusest maapinna kõrgus selleks teisendati las-andmestik rastriks (LAS Dataset to Raster). Esmalt teisendati rastriks las-faili maapinna (ground) punktid, seejärel maakatte (non-ground) punktid (töövahendi parameetrid: sisend on uuritava kaardilehe las-fail, Value Field, Elevation, Sampling Type Cell Size, Sampling Value maapinna teisendamise puhul 1, maakatte puhul 0,1). Kui rastri lahutus jätta maakatte puhul 1, tasandab algoritm väikese pindalaga kõrgtakistuste mõju ära ning mastid ja antennid jääksid kaardilt tuvastamata.

Maapinna ja maakatte rasterfailide kõrgusväärtuste lahutamiseks kasutati Raster Functions tööriista Arithmetics. Tulemusena saadud rasterpildilt üle 45 meetri kõrguste objektide eristamiseks klassifitseeriti kõrgusväärtused kaheks – vähem kui 45 meetrit ning 45 ja rohkem meetrit ning kuvati need kaardil. Tulemusena saadi 45+ meetrise objektide kujutised, sh lisaks hoonetele nt kraana (vt joonis 8), mis kujutati Maa-ameti ortofotode taustal.



Joonis 8. Väljavõte Maa-ameti hübriidkaardile kantud rasterpildist (Aluskaart: Maa-amet)

LiDAR meetodil objektide kõrguse saamiseks kasutati taas tööriista LAS Points Statistics by Area. Esmalt tuvastati objekti ümbruse maapinna keskmine kõrgus, seejärel maakatte suurim kõrgus.

4.2 Kõrgtakistuste kaardistamise tulemused

Valitud alalt tuvastati kirjeldatud meetodiga 67 kõrgtakistust kõrgusega 45 ja enam meetrit (vt joonis 9).



Joonis 9. Tuvastatud kõrgtakistuste ruumiline paigutus (Aluskaart: Maa-amet)

Lisaks tuvastati sel meetodil mitmel kaardilehel üksikuid punkte, mis olid üle 45 meetri kõrged, kuid mis ei olnud seotud ühegi hoonega. Kõige tõenäolisemalt on tegu lindudelt vm lendavalt objektilt pärit peegeldusega. Ühelt kaardilehelt saadi punktimaasiv Ülemiste järve kohal, mis võis olla tingitud järvepinna anomaalsest peegeldusest.

Nimetatud 67-st objektist on Transpordiameti hallatavas kõrgtakistuste andmebaasis 14 kõrgrajatist, ETAK andmebaasis 59 kõrgrajatist ja EHR (ehitisregistri) andmebaasis 43 objekti kõrgused (vt tabel 8). Torkab silma, et ETAK andmebaasist puuduvad peamiselt viimase paari aasta jooksul ehitatud hooned. Ehisregistrist puuduvad korstnad ja mastid (erand aadressil Kristiina 15 asuv mast), samuti kõrghooned, mis on püstitatud enne Ehisregistri loomist ja mille andmete muutmist pole omanikud taotlenud. Mõlemast andmebaasist on puudu Peterburi tee 2 vaateratas, põhjuseks võib olla asjaolu, et sellele objektile pole loodud klassifikaatorit.

Tabel 8. Piirkonnas tuvastatud kõrgtakistuste andmed eri andmebaasides

	Lähiaadress	Tüüp	TA_korgus	ETAK_korgus	EHR_korgus	LIDAR_korgus
1	Päevalille 9	Hoone	x	49	48.5	48.97
2	Päevalille 6	Hoone	x	x	60.4	71.27
3	Päevalille 8	Hoone	x	x	60.4	79.26
4	Päevalille 4	Hoone	x	0	50	49.57
5	Päevalille 3	Hoone	x	49	45	48.83
6	Õismäe tee 173	Hoone	x	49	46	49.1
7	Päevalille 15	Hoone	x	49	51	50.06
8	Päevalille 19	Hoone	x	x	52.3	53
9	Mõisa tn 4	Hoone	x	63	65	64.55
10	Marja 5	Korstn	129.8	130	x	130.95
11	Kristiina 15	Mast	107.2	93	103	100.87
12	Suur-Ameerika tn 1	Hoone	x	53	51.7	52.55
13	Võistluse tn 6/1	Hoone	x	33	43.5	46.64

14	Võistluse tn 6/2	Hoone	x	29	43.5	45.83
15	Võistluse tn 6/3	Hoone	x	25	43.5	46.23
16	Masina tn 18	Korsten	91.8	90	x	91.24
17	Tartu mnt 80k	Korsten	70.7	70	73	70.99
18	Tartu mnt 84a	Hoone	x	51	51.3	55.86
19	Peterburi tee 2	Vaateratas	75.22	x	x	75.14
20	Lõõtsa 1a	Hoone	x	26	44.9	47.85
21	Lõõtsa 5	Hoone	44.94	45	44.9	46.64
22	Valukoja 8/1	Hoone	48.7	46	45	47.97
23	Valukoja 8/2	Hoone	48.28	47	45	47.9
24	Lõõtsa 12	Hoone	44.94	44	44.9	46.73
25	Õismäe tee 134	Hoone	x	49	x	49.68
26	Õismäe tee 112	Hoone	x	49	x	49.36
27	Õismäe tee 90	Hoone	x	49	43.2	52.92
28	Õismäe tee 68	Mast hoonel	x	58	x	56.77
29	Õismäe tee 48	Hoone	x	49	x	49.36
30	Õismäe tee 10	Hoone	x	49	x	50.03
31	Õismäe tee 105	Hoone	x	46	47	48.51
32	Õismäe tee 109	Hoone	x	46	x	48.3
33	Ehitajate tee 111	Hoone	x	50	x	51.78
34	Ehitajate tee 113	Hoone	x	49	x	50.2
35	Ehitajate tee 115	Hoone	x	49	x	54.27
36	Rabaküla tn 5a	Korsten	x	60	x	59.08
37	Pärnu mnt 110	Hoone	x	51	x	53.64
38	Pärnu mnt 105	Hoone	x	49	x	56.96
39	Pärnu mnt 113	Hoone	x	0	44.9	46.78
40	Veskiposti 2/1	Hoone	x	0	44	48.89
41	Pöörise 22	Hoone	x	45	44.2	45.63
42	Pöörise 20	Hoone	x	45	44.8	45.66
43	Pöörise 18	Hoone	x	46	45	46.24
44	Pöörise 16	Hoone	x	45	44.8	45.71
45	Pöörise 14	Hoone	x	45	44.9	45.71
46	Pöörise 12	Hoone	x	46	44.9	45.75
47	Pöörise 10	Hoone	x	47	44.3	45.8
48	E. Vilde tee 114	Hoone	x	47	x	47.91
49	E. Vilde tee 112	Hoone	x	46	x	48.09
50	A. H. Tammsaare tee 143	Hoone	x	48	x	49.3
51	A. H. Tammsaare tee 139	Hoone	x	49	48.8	50.59
52	Mustamäe tee 159	Hoone	x	49	x	50.98
53	A. H. Tammsaare tee 85	Hoone	x	47	47.4	47.97
54	A. H. Tammsaare tee 87	Hoone	x	47	x	52.83
55	Seebi tn 1	Hoone	x	0	67	69.41
56	Lelle tn 24	Hoone	56.19	56	55.5	56.81
57	Lelle tn 22	Hoone	51.75	51	50.5	52.65
58	Pärnu mnt 141	Hoone	54.37	51	50.5	55.92
59	Järve tn 2	Hoone	x	1	63	62.98
60	Karamelli tn 3	Korsten	63.4	63	x	52.22
61	Kadaka tee 181	Korsten	120.5	120	x	119.89
62	Ehitajate tee 13	Hoone	x	45	x	45.79
63	Ehitajate tee 11	Hoone	x	45	35	47.13
64	Akadeemia tee 2	Hoone	x	44	43.6	45.9
65	Sõpruse pst 222	Hoone	x	51	51.2	52.61
66	J. Sütiste tee 19	Hoone	x	55	48.6	51.55
67	Järve 35	Mast	x	61	x	54.9

ETAK andmeid LiDAR meetodil saadutega võrreldes jääb silma, et mõnel objektil on küll ETAK-kood olemas, kuid kõrgus kas puudub või on anomaalselt madal. Ehitisregistri andmetel on tegu hoonetega, mis on kasutusloa saanud viimase paari aasta jooksul. Seega on andmete puudumise taga tõenäoliselt kas asjaolu, et andmete sisestamise ajal oli ehitus pooleli või ei ole peale viimast aeropildistamist 2020. aastal piirkonnas ehitiste andmeid uuendatud. Järgmine korraline aeropildistamine toimub piirkonnas 2024. aasta kevadel (Maa-amet 2023-3).

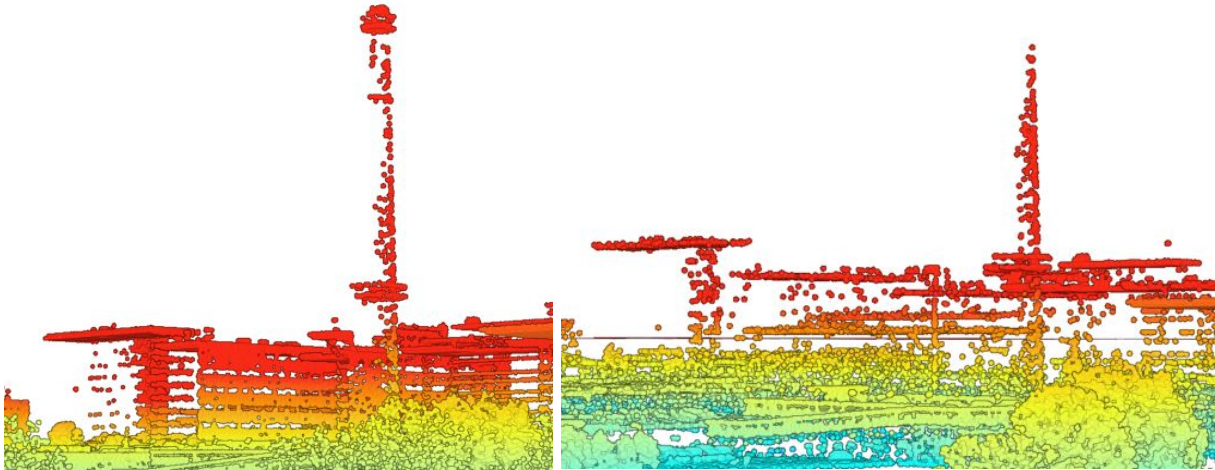
Teine probleem ETAK-kõrgusandmete kasutamisel on asjaolu, et mitmed hoonete katusel olevad seadmed ja rajatised jäävad kajastamata. Nii ei ole ETAK-is Peterburi tee 2 kaubanduskeskuse katusel asuvat vaateratast (nr 19). Samuti on Pärnu mnt 105 hoone katusel asuv u 7 meetri kõrgune rajatis ETAK andmetes kajastamata, millest tuleneb ka erinevus ETAK- ja LiDAR-andmete vahel (nr 38).

Mitmel juhul on LiDAR-meetodil saadud kõrgus mõne meetri võrra suurem ETAK-is esitatud kõrgusest (objektid nr 13, 18, 27, 35, 54, 58). See võib olla osaliselt seotud eelnevalt välja toodud asjaoluga, et ETAK-kaardistusel ei kajastata katusest kõrgemale ulatuvaid seadmeid ja rajatisi, vaid kõrgeimaks punktiks määratakse hoone parapett. Hüpoteesi kontrollimiseks tuleks teha kontroll-mõõtmised.

Objektid 2 ja 3 (vastavalt Päevalille 6 ja 8) olid kaardistamise hetkel ehitusjärgus ning kõrgeimad punktid pärinesid hooneid ehitavatelt kraanadelt. Hoonete endi täpsema kõrguse kontrollimiseks tuleb ära oodata uuemad kaardistusandmed.

Täiendavat kontrolli vajavad objektid 11, 60, 66 ja 67. Esimene neist on aadressil Kristiina 15 asuv sõrestikmast, mille kõrgus on kõigis neljas kasutatud andmebaasis erinev. 2020. aasta LiDAR-andmed olid masti tipukõrguse osas sisuliselt identsed 2022. aasta omadega.

Karamelli 3 aadressil paiknev korsten (objekt nr 60) on nii Transpordiameti kui ETAKi andmetel u 10 meetrit kõrgem kui LiDAR-mõõtmisel. Aasta varasema LiDAR-mõõdistus on korstna tippu paremini tabanud, andes korstna kõrguseks 60,5 meetrit, mis jääb küll ligi 3 meetrit allapoole teistes andmebaasides esitatud kõrgust, kuid on mõõtmistäpsuse piires (vt joonis 8). Kaldaerofotodel on näha korstna tipus paiknevat kaht peenikest antenni, mida LiDAR-i laserkiir pole tabanud ning mis võib selgitada kõrguste vahet.



Joonis 10. Karamelli 3 korstna LiDAR punktide 3D vaade 2021. ja 2022. aastal

Järve 35 aadressil asuva sõrestikmasti (nr 67) kõrguse kontrolliks kasutati taaskord 2021. aasta LiDAR-mõõtmist, mis annab masti kõrguseks 60,9 meetrit. See langeb ETAK-andmetega (61 meetrit) väga hästi kokku.

Aadressil J. Sütiste tee 19 asuva Põhja-Eesti Regionaalhaigla hoone kõrgus erineb ETAK- ja Ehitisregistri andmebaasides üle kuue meetri. LiDAR-meetodil saadud kõrgus paikneb taas üsna täpselt nende kahe kõrguse vahele. Varasema (2021.) aasta LiDAR-mõõdistus andis 2022. aasta omaga sisuliselt sama tulemuse.

4.3 Arutelu

Üldjoontes võib katsetuse lugeda kordaläinuks. Mõistetavatel põhjustel on andmekogudes palju segadust hoonete jm ehitistega, mis on kaardistuse hetkel ehitamisjärgus. Samas saab selliselt täiendavat infot ehitustegevuse ja ehitustehnika kohta. Lisaks püsivatele lennutakistustele (hooned, rajatised jms) kehtivad lennuohutusnõuded ja teavitamise kohustus ka ajutise iseloomuga takistustele, nagu kraanad. Pahatihti aga kraanade püstitamisest ja eemaldamist Transpordiametit ei teavitata või siis ei vasta teates esitatud kraana kõrgus reaalsele olukorrale. Maa-ameti LiDAR andmed ei võimalda reeglina küll operatiivset sekkumist, kuid võimaldab vajadusel tagantjärele võrrelda ehitaja esitatud kõrgusandmeid reaalse olukorraga ning anda selle põhjal suuniseid edaspidiseks.

Nagu juba varasema kontrolli käigus selgus, ei saa LiDAR meetodil tuvastada riigikaitseliste objektide kõrgusi. Uuritud piirkonnas paikneb üle 45 meetri kõrgune mast, mis on nii Transpordiameti andmebaasis kui ka ETAK andmekogus, kuid LiDAR andmete kontrolli käigus see välja ei tulnud.

Kirjeldatud tuvastusmeetodi suurima puudusena võib välja tuua võrdlemisi suurt ajakulu. Juba esmalt laz-failide allalaadimine ja seejärel nende las-vormingusse teisendamine võttis aega mitmeid tunde. Seejärel punkt pilvede suure detailsusega rastroks teisendamine ja tuvastatud objektide kõrguste ühekaupa arvutamine kulutas samuti palju aega. Edasiseks tööks võiks olla ajasäästlikuma meetodika leidmine. Siiski tundub kõrgtakistuste andmebaasi täiendamiseks olevat otstarbekam kasutada olemasolevat ETAK andmekogu, mille kõrgusandmed LiDAR mõõdistusega valdavalt hästi kokku sobisid. Käesolevas töös kasutatud LiDAR meetod sobib kasutamiseks, kui mõnd üksikut ETAK-andmekogus esitatud kõrgust mingil põhjusel kontrollida tuleb. Siinkohal on oluline silmas pidada, et kõrgusinfot tuleb kontrollida erinevatest allikatest ning et andmebaasi võib kanda vaid need andmed, mille täpsus ja õigsus vastab kvaliteedinõuetele.

Kokkuvõte

Kõrgehitiste asukoha- ja kõrgusinfo täpsus ja ajakohasus on ohutu lennuliikluse tagamiseks vältimatult vajalikud. Nõuded täpsuse kohta on kehtestanud Rahvusvaheline Tsiviillennunduse Organisatsioon ning nende nõuete täitmise tagamist kontrollib Eestis Transpordiamet. Kahjuks ei ole Eestis tänaseks leitud rahuldavat viisi, kuidas lennuväljast kuni 45 km kaugusele ulatuvas piirkonnas kaardistada nõutava täpsusega kõik kõrgtakistused.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli kontrollida, kas Maa-ameti kogutud ja avaldatud aerolaserskaneerimise kõrguspunktid sobivad Transpordiameti hallatava kõrgtakistuste andmebaasi täiendamiseks ja täpsustamiseks. Selleks võrreldi esmalt LiDAR-meetodil saadud eri tüüpi kõrgtakistuste kõrgusandmeid erinevates andmekogudes (Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaas, Eesti Topograafiline Andmekogu ETAK, Ehitisregistri andmebaas EHR) esitatud kõrgustega. Tuvastati, et LiDAR-andmed on valdavalt piisava täpsusega kõrgtakistuste andmebaasi täiendamiseks. Kontrolli käigus tuvastatud puudusi ja küsitavusi sai lahendada erinevaid meetmeid rakendades, kasutades nt varasema kaardistuse andmeid, kaldaerofotosid ja/või LiDAR punktide 3D-vaadet.

Töö teise ülesandena kaardistati Tallinna lennuväljast läänes asuvale 4 x 9 km² suurusele alale jäävad üle 45 meetri kõrgused ehitised. Kokku tuvastati sel territooriumil LiDAR meetodil 67 kõrgehitist. Neist kõigest 14 olid olemas ka Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasis. Ka ETAK ja EHR andmekogud ei sisaldanud kõiki tuvastatud ehitisi. Peamiseks põhjuseks oli siin asjaolu, et hooned on alles hiljuti ehitatud ning nende ruumikujusid ja andmeid pole jõutud andmebaasidesse sisestada.

Kui välja jätta ehitusjärgus olevad ja viimase paari aasta jooksul valminud hooned, langesid LiDAR meetodil mõõdetud objektide kõrgused küllalt hästi kokku ETAK-is olevate kõrgusandmetega. Peamisteks vigade põhjustajaks aerolaserskaneerimises on asjaolu, et alati ei õnnestu kaardistamisel mõõdetava objekti tippu tabada. ETAK-i ühe veallikana võib nimetada kaardistamise ebatäielikkust – mitme hoone katusel olevad objektid, milleks ühel juhul oli mitmekümnemeetrise läbimõõduga vaateratas, on ETAK-i andmetest puudu ja esitatud on üksnes hoone parapeti kõrgus.

Peamiseks puuduseks töös kirjeldatud viisil kõrgtakistuste tuvastamisel on võrdlemisi suur ajakulu. Kuna käesoleva töö käigus ilmnis, et ETAK-is esitatud andmed langevad LiDAR meetodil tuvastatud kõrgusandmetega üldiselt hästi kokku, oleks otstarbekam täiendada

Transpordiameti kõrgtakistuste andmebaasi ETAK-ist pärit andmetega ja LiDAR meetodit kasutada juhul, kui mõnel üksikul juhul osutub vajalikuks ETAK-i kõrgusandmeid kontrollida.

Use of Estonian Land Board's airborne laser scanning data in updating aviation obstacle database

Andres Lainoja

Summary

The purpose of this thesis was to examine whether the airborne laser scanning data collected by Estonian Land Board could be used for adding new entries to Estonian aviation obstacle database.

Aviation obstacle database is kept by Estonian Transport Administration (till 2021 Estonian Civil Aviation Administration) and contains buildings at least 45 meters from ground level. While it is relatively well maintained and up to date on mobile masts and wind turbines, it lacks buildings over 25 years old and also the buildings that have been built without the authorization of Estonian Transport Administration. Since the database has to be comprehensive and up to date to ensure safe flight procedures around aerodromes, it is necessary to find accurate and verifiable data about the obstacles.

Estonian Land Board has been gathering airborne laser scanning data in Estonian territory since 2008. Since then the LiDAR point density has increased considerably and as the aerial scanning is repeated after every four years, the data should be both timely and accurate.

The first objective of this thesis was to verify the LiDAR elevation data against the data contained in aviation obstacle database and Estonian Topographic Database. The latter contains elevation data for buildings and high obstacles which are collected using photogrammetry method. The sample contained different type of high obstacles (chimneys, church towers, buildings and masts). It was confirmed that with some tweaking LiDAR data can be used to determine the obstacle elevation data with satisfactory vertical accuracy.

The second objective was to identify all the buildings above 45 meters from ground level in the 4 x 9 km area west from Tallinn aerodrome. For that purpose the corresponding map sheets containing LiDAR data were downloaded from Estonian Land Board web page. The LiDAR data was then converted to two separate raster files, one containing the terrain model and the other the surface model of the area. After that the terrain was subtracted from the surface model and classified to present the objects over 45 meters in height. With this method 67 objects were identified, of which only 14 were present in the current obstacle database. The heights were then measured and compared with available datasets (Estonian Topographic Database and

Estonian Building Register) and were mostly found to correlate within the limits of the vertical accuracy standards given by International Civil Aviation Organisation.

The conclusion is that while the described method works, it is quite time consuming and resource intensive to go through all the obstacles with this method. The quickest and easiest method to supplement the aviation obstacle database would be to add the obstacles and building data from Estonian Topographic Database and only if there is need to verify the height data, use the LiDAR method.

Tänuavaldused

Täna juhendajaid Raivo Aunapit ja Kiira Mõisjat igakülgse abi eest töö metoodilisel ja vormistuslikul ülesehitusel. Vajaliku erialase info ja materjalide jagamise ning selgituste eest täna Lennuliiklusteeninduse AS-i kaardigrupi juhti Aigar Tarret. Otsatult mõistva suhtumise ja kannatlikkuse eest täna oma abikaasat ning endist ja praegust tööandjat.

Kirjanduse loetelu

- AS Eesti Kaardikeskus. 1997. Geodeetiliste tööde aruanne. Aeronavigatsiooniga seonduvate punktide ja objektide koordineerimine.
- Gigliano, J. D. 2006. Lidar Basics for Mapping Applications. *Digital Mapping Techniques '06, Workshop Proceedings*, 65-75. U.S. Geological Survey
- International Civil Aviation Organisation. 2018. Procedures for Air Navigation Services. Aeronautical Information Management (Doc 10066). First edition – amendment 1.
- Jaafar, Jad & Priestnall, Gary & Mather, Paul. 2010. The Effects of Lidar DSM Grid Resolution on Categorising Residential and Industrial Buildings.
- Kashani, A.G.; Olsen, M.J.; Parrish, C.E.; Wilson, N. A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors* 2015, 15, 28099-28128. <https://doi.org/10.3390/s151128099>
- Lennuamet. 2000. Eesti lennuliikluse geodeetiline andmekogu. Riiklik sihtprogramm.
- Mõisja, K., Aunap, R., Oja, T., Roosaare, J., Sepp, E. 2019. Ruumiandmete hõive. *Geoinformaatika. Õpik kõrgkoolidele*, 286-297. Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Roth, R & Thompson, J. 2008. Practical Application of Multiple Pulse in Air (MPIA) Lidar in Large-Area Surveys. 37.
- Wandinger, U. 2005. Introduction to Lidar. In: Weitkamp, C. (eds) Lidar. *Springer Series in Optical Sciences, vol 102*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-25101-4_1
- Xin Wang, HuaZhi Pan, Kai Guo, Xinli Yang and Sheng Luo. 2020. The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 502, Proceedings of the First China Digital Earth Conference 18-20 November 2019, Beijing, China. DOI 10.1088/1755-1315/502/1/012008

Zhou, Q-Y, Neumann, U. 2008. Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data. In Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems (GIS '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 7, 1–8.
<https://doi.org/10.1145/1463434.1463444>

Kirjavahetus ja intervjuud

Erkko Grünthali e-kiri töö autorile, 27.03.2020.

Intervjuu Lennuliiklusteeninduse AS-i kaardigrupi juhi Aigar Tarrega, 02.05.2023

Intervjuu Maa-ameti ruumiandmete osakonna juhataja Lea Pautsiga, 10.05.2023

Internetiallikad

Erelt, P., 25.08.2005. Lennuk tabas piiritusevabriku korstent. Eesti Ekspress
<https://ekspress.delfi.ee/artikkel/69062969/lennuk-tabas-piiritusevabriku-korstent>

Espenberg, A., 19.04.2019. 1977: Võõrriigi ohvitseride hukkumine Eesti territooriumil.
<https://www.kuulutaja.ee/1977-voorriigi-ohvitseride-hukkumine-est-territooriumil/>
(viimati vaadatud 21.05.2023)

ICAO. The History of ICAO and the Chicago Convention
<https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/default.aspx>
(viimati vaadatud 20.05.2023)

Jõgi, A. Tartu Peetri kiriku remonti rahastab ärimees. *Tartu Postimees* 08.06.2011.
<https://tartu.postimees.ee/463658/tartu-peatri-kiriku-remonti-rahastab-arimees>
(viimati vaadatud 24.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid.
<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html>
(viimati vaadatud 21.05.2023).

Maa-ameti geoportaal. Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. ALS III ring 2017 – 2020.

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid/ALS-III-ring-2016-20172020-p625.html>

(viimati vaadatud 21.05.2023).

Maa-ameti geoportaal. Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. ALS IV ring. 2021-2024

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid/ALS-IV-ring-2021-2024-p855.html>

(viimati vaadatud 25.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Fotogramm-meetria

<https://maaamet.ee/ruumiandmed-ja-kaardid/ruumiandmete-tootmine/fotogramm-meetria>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Kaldaerofotod

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Kaldaerofotod-p633.html>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Laadi kõrgusandmed alla.

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Laadi-korgusandmed-alla-p614.html>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Maainfo kaardirakendus.

<https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>

(viimati vaadatud 25.05.2023)

Maa-ameti geoportaal. Topograafiliste andmete kaardistusjuhend.

https://geoportaal.maaamet.ee/docs/ETAK/ETAK_juhend2013.pdf?t=20131205160124

(viimati vaadatud 02.05.2023)

Maa-amet. Ajalugu

<https://maaamet.ee/asutus-uudised-ja-kontakt/maa-amet/ajalugu>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Maa-amet. Arengukava

<https://maaamet.ee/asutus-uudised-ja-kontakt/maa-amet/arengukava>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Riigi Teataja. 16.01.1990. Eesti NSV Valitsuse määrus 16. jaanuarist 1990. a. nr. 10. Eesti NSV riiklike ametite moodustamise kohta.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/28881>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Riigi Teataja. 17.02.1999. Lennundusseadus. Välja kuulutatud Vabariigi Presidendi 9. märtsi 1999. a otsusega nr 539

<https://www.riigiteataja.ee/akt/77264>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Riigi Teataja. 01.06.2002. Lennundusseadus.

<https://www.riigiteataja.ee/akt/22438>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Riigi Teataja. 01.01.2023. Lennundusseadus

<https://www.riigiteataja.ee/akt/22438?leiaKehtiv>

(viimati vaadatud 21.05.2023)

Skybrary. Accidents and incidents portal. A109, vicinity London Heliport London UK, 2013

<https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/a109-vicinity-london-heliport-london-uk-2013>

(viimati vaadatud 20.05.2023)

The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. November 2011. LAS Specification, Version 1.4 – R13.

https://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf

(viimati vaadatud 25.05.2023)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Andres Lainoja,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Maa-ameti aerolaserskaneerimise andmete kasutamine lennutakistuste andmebaasi täiendamisel**, mille juhendajateks on Raivo Aunap ja Kiira Mõisja, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Andres Lainoja
25.05.2023