



AEROLASERSKANEERIMINE MEHITAMATA ÕHUSÕIDUKILT MARKŠEIDERTÖÖDEL MAHTUDE MÕÕDISTAMISEKS

Magistritöö

Üliõpilane: Tauri Põldema, 204342LARM

Juhendaja: Sander Kanter, lektor, MSc

Õppekava: LARM18/20 - Maapõueressursid

Tallinn 2022

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Tauri Põldema

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Lektor, Sander Kanter

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Lõputöö ülesanne

Töö ID	LG70LT	Õppekava kood	LARM18/20
Üliõpilane	Tauri Põldema	Matrikli nr	204342
Töö liik	Magistritöö	Õppeaine kood	LG70LT
Juhendaja	Sander Kanter	Ülesanne kehtib kuni	juuni
Töö pealkiri	Aerolaserskaneerimine mehitamata õhusõidukilt markseideritöödel mahtude mõõdistamiseks		
Pealkiri ingl k	Volume calculations for mine surveying using LiDAR on UAV		
Töö sisu põhipunktid	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ülesande püstitus 2. Kasutatud materjali ülevaade 3. Metoodika 4. Savikarjääri mõõdistus 5. Lubjakivikarjääri mõõdistus 6. LiDAR-i plussid ja miinused 		
Seotud teadusprojekt ja/või asutus			
Lisamärkused			
Esitamise kuupäev	28. mai 2022	Kaitmise kuupäev	3. juuni 2022

Üliõpilane

Tauri Põldema

Tauri Põldema, Aerolaserskaneerimine mehitamata õhusõidukilt markseideritöödel mahtude mõõdistamiseks

Juhendaja

Sander Kanter

Konsultant

nimi

alkiri

kuupäev

Allkirjastatud digitaalselt 28.05.2022

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	2
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu.....	7
Piltide loetelu	8
Annotatsioon.....	9
Abstract	10
Kasutatud mõistete ja/või lühendite loetelu	11
1. Sissejuhatus.....	12
2. Kasutatud materjali ülevaade	13
2.1 LiDAR tehnoloogia ajalugu	13
2.2 LiDAR töö põhimõtted	14
2.3 Meetodid mahtude määramiseks.....	15
2.4 Mahu määramine.....	18
3. Metoodika	21
3.1 Uuritavad objektid	21
3.2 Seadusandlus	21
3.2.1 Täpsusnõuded.....	22
3.3 Kasutatud tehnika ja tarkvara.....	23
3.3.1 Droonid	23
3.3.2 LiDAR seade.....	25
3.3.3 RTK GPS.....	26
3.3.4 Tarkvarad	26
3.4 Ülevaade mõõtmisseadmete tööprotsessist	27
3.5 Mudelite võrdlus.....	28
4. Tulemuste analüüs	30
4.2 Savikarjääri mõõdistus	30
4.3 Lubjakivikarjääri mõõdistus	33
4.3.1 Lubjakivikarjääri EE	34
4.3.2 Valmistoodangu puistang	37
4.3.3 Kattepinnase puistang	41
4.7 Ajakulu erinevus.....	43
4.8 Seadme tasuvus	45

5. LiDARi plussid ja miinused	47
6. Tulemuste kokkuvõte	48
7. Diskussioon.....	50
Kokkuvõte.....	51
Tänuavaldused	52
Kirjanduse loetelu.....	53
Lisa 1. Mõõdistamise tulemuste kokkuvõtlik tabel.....	56
LISA 2. Savikarjääri RTK mudel	57
LISA 3. Savikarjääri fotogramm-meetriline mudel	58
LISA 4. Savikarjääri LiDAR mudel	59
LISA 5. Lubjakivikarjääri LiDAR mudel	60
LISA 6. Lubjakivikarjääri fotogramm-meetriline mudel.....	61

Jooniste loetelu

Joonis 1 LiDARi tööprotsess (Neoge ja Mehendale, 2020).....	15
Joonis 2 Eesti GNSS püsijaamade võrk (Maa-amet 2022)	18
Joonis 3 DSM vs DTM (Llames, H., G., 2022)	19
Joonis 4 Objektide asukohad märgitud punase ringiga	21
Joonis 5 Pädevust tõendav dokument	22
Joonis 6 Mõõtmiseseadmete tööprotsess tahetud tulemini	28
Joonis 7 Mõõdistatud savikarjääri üldvaade	30
Joonis 8 Ülemine pilv on LiDAR punktipilv, alumine fotogramm-meetriline punktipilv	31
Joonis 9 Savikarjääri läbilõige I-I'	32
Joonis 10 Lubjakivikarjääri mõõdetud objektide situatsioon.....	33
Joonis 11 Lubjakivikarjääri ee lõige I-I'	35
Joonis 12 Lubjakivikarjääri astangu lõige II-II'	36
Joonis 13 Puuduv puistang ja punktipilv Pix4Dmapper töötlusprogrammis.....	38
Joonis 14 Puistangute võrdlus. Vasakult LiDAR- Fotogramm-meetria- RTK GPS	38
Joonis 15 Valmistoodangu puistangu lõige I-I'	39
Joonis 16 Valmistoodangu lõige II-II'	40
Joonis 17 Lubjakivikarjääri kattepinna puistangu lõige I-I'	42
Joonis 18 Savikarjääri ajakulu kokkuvõte	43
Joonis 19 Lubjakivikarjääri ajakulu kokku	44
Joonis 20 Kahe objekti mõõdistamise ajakulu kokkuvõte.....	44

Tabelite loetelu

Tabel 1 Kordusmõõtmise mõõtesuuruse väärtuse erinevuse lubatud protsendid.....	23
Tabel 2 Kasutatud droonide parameetrite võrdlus (DJI, 2020) (DJI, 2022).....	23
Tabel 3 Zenmuse L1 parameetrid (DJI,2021).....	25
Tabel 4 Trimble R10 parameetrid (Trimble, 2022).....	26
Tabel 5 Savikarjääri pinnamudelite punktide arvud.....	31
Tabel 6 Savikarjääri mõõdistusmeetodite parameetrite võrdlus.....	33
Tabel 7 Lubjakivikarjääri pinnamudelite punktide arvud.....	34
Tabel 8 Lubjakivikarjääri astangu mahtude võrdlus.....	37
Tabel 9 Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu tulemuste võrdlus.....	41
Tabel 10 Lubjakivikarjääri kattepinnase puistangu tulemuste võrdlus.....	42
Tabel 11 Seadme tasuvuse analüüs	45

Piltide loetelu

Pilt 1 AN/gvs-5 laserkaugusmõõtur (Pike, J., 2000)	13
Pilt 2 Elektrontahhümeeter Leica Flexline TS06plus VOC (SCCS, 2022)	16
Pilt 3 Trimble R10 GNSS vastuvõtja (Geosoft, 2022).....	17
Pilt 4 DSM mudel (Geodetics, 2022)	19
Pilt 5 DJI Matrice 300 RTK droon välitööl, millel on küljes LiDAR seade	24
Pilt 6 DJI Phantom 4 RTK droon (Geosoft, 2022).....	24
Pilt 7 Zenmuse L1 LiDAR (DJI, 2022)	25

Annotatsioon

Laserskaneerimine, mis kasutab LiDAR (*Light Detection and Ranging*) tehnoloogiat, on kasutusel olnud juba 1960. aastatest. Seade kasutab laser valguskiiri, mis peegeldades annavad andmeid lainepikkuse variatsiooni ja tagasi peegeldumise aja kohta. Olles kasutusel olnud juba aastakümneid, on arenduse käigus muutunud LiDAR seade kättesaadavamaks ja kompaktsemaks, mis annab võimaluse katsetada seda tehnoloogiat markšeidermõõdistuse edendamiseks.

Markšeidermõõdistamine on lahutamatu osa mäendusest, mille teostamiseks on vaja erilist täpsust, efektiivsust ja innovatsiooni, kuna enamasti mõõdistatakse suuri maa-alasid, millel lasub keerukas reljeef. Mõõdistuseks on läbi aegade kasutatud erinevaid tehnoloogiaid alustades teodoliidi ja nivelliiriga mõõdistamisest ning lõpetades hiljuti kasutusele võetud fotogramm-meetrilise mõõdistusega droonilt. Kuna tänapäeva tehnoloogia ajastul areneb kasutatav tehnika märkimisväärse kiirusega, siis aina rohkem on võimalik kasutusele võtta seadmeid, mille ajakulu, materiaalne kulu ja täpsus ületavad kasutusel oleva tehnoloogia parameetreid. Kombineerides hetkel suuresti kasutusel olevat drooni LiDAR seadmega oleks võimalik astuda samm kiiremini teostatava ja täpsema markšeidermõõdistamise poole, kuid hetkel on antud teema Eesti mäendusvaldkonnas uurimata.

Käesoleva lõputöö esimene pool lahkab LiDAR tehnoloogia kasutamise teoreetilist osa. Lisaks annan ülevaate ja analüüsi töös kasutatava LiDAR seadme parameetritele ning selle võrdlusele hetkel kasutusel oleva fotogramm-meetrilise ja RTK GPS mõõdistamisega, et anda alus sellele, milline ja kui suur võib olla LiDAR seadme kasutamise kasutegur markšeideritööde teostamisel. Ülevaate teen ka hetkel kasutuses olevast seadusandlusest, mis reguleerib markšeidermõõdistamise korda.

Töö põhieesmärk on leida täpsus ja kasutamise võimalikkus LiDAR seadmele droonilt mõõdistamisega mäenduskeskkonnas võrreldes ja analüüsides seda hetkel kasutuses oleva fotogramm-meetriaga ja RTK GPS-iga. Selleks olen teostanud mõõdistusi droonilt fotogramm-meetria põhimõttel kui ka droonilt LiDAR seadmega. Mõlema puhul on kasutatud erinevaid droone. Annan töös ka ülevaate LiDAR seadme kasutamise eelistest ja puudustest võrreldes neid hetkel kasutusel oleva meetodiga.

Töö tulemusena leiti, et LiDAR seadme kasutamine kiirendab oluliselt markšeideritööde käiku samal ajal andes vajaliku täpsuse, mis jääb seadusest tulenevates täpsusnõuete piiridesse. Aerolaserskaneerimine võimaldab ka mõõdistada pimedas, taimestikuga kaetud ala ning ereda ja peegelduvaid alasid.

Töös on kasutatud J.Viru Makršeideribüroo DJI Phantom 4 RTK drooni, töötlustarkvara Terrascan ja CAD tarkvara Microstation for Baltics v8.1 mudeldamiseks. LiDAR seadmena kasutasin ettevõtte Geosoft poolt pakutavat DJI Zenmuse L1 seadet ja drooni DJI Matrice 300 RTK.

Volume calculations for mine surveying using LiDAR on UAV

Abstract

Laser scanning using LiDAR (Light Detection and Ranging) technology has been in use since the 1960s. The device uses a laser beam that provides information about wavelength variation and reflection time when reflected. Having been in use for decades, the LiDAR device has become more accessible and compact during development, providing an opportunity to test this technology in mine surveying.

Mine surveying is an integral part of mining, which requires precision, efficiency and innovation, as it usually has to cover large areas with complex terrain. Various technologies have been used for measurement, ranging from tacheometry to the recently introduced photogrammetric drone surveying. As the technology used in today's world is evolving at an insane rate, it is increasingly possible to adopt devices whose time, material consumption and accuracy exceed the parameters of the technology in use. Combining the currently widely used drone with a LiDAR device would make it possible to take a step towards faster and more accurate mine surveying, but this issue is currently unexplored in the field of mining.

The first part of this dissertation dissects the theoretical part of using LiDAR technology. In addition, I will provide an overview and analysis of the parameters for the LiDAR device used in the work and its comparison with the photogrammetry currently in use, in order to provide a basis for the efficiency and extent of the use for LiDAR device in surveying. I will also review the Estonian legislation currently in force governing mine surveying procedures.

The main goal of this thesis is to find the accuracy and applicability of the LiDAR device on UAV and to analyse it with the photogrammetry that is currently in use. For this purpose, I have performed measurements from a drone on the principle of photogrammetry as well as from a drone with a LiDAR device. Different drones have been used for both. I also give an overview of the advantages and disadvantages of using a LiDAR device compared to the currently used method.

As a result of the work, it was found that the use of the LiDAR device significantly speeds up the workflow of mine surveying while providing the required accuracy, which is within the limits of the legal requirements. Aerial laser scanning also allows you to measure in the dark, in vegetated areas and bright and reflective areas.

J.Viru Makršeideribüroo DJI Phantom 4 RTK drone, Terrascan processing software and CAD software Microstation for Baltics v8.1 have been used in the work. As a LiDAR device, I used the DJI Zenmus L1 device and drone DJI Matrice 300 RTK offered by Geosoft.

Kasutatud mõistete ja/või lühendite loetelu

LiDAR- *Light detection and ranging*

DTM- *digital terrain model* - digitaalne maastikumudel

DSM- *digital surface model* - digitaalne pinnamudel

DEM- *digital elevation model* - digitaalne kõrgusmudel

UAV- *unmanned aerial vehicle* - mehitamata õhusõiduk

GNSS- *global navigation satellite system*- globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem

RTK- *real time kinematic*- reaalajas kinemaatiline

GPS- *global positioning system*- globaalne positsioneerimissüsteem

1. Sissejuhatus

Vajadus täpsema, kiiremini tööd teostava ja märksa lihtsama tehnoloogia järele geodeetiliste tööde puhul on alati päevakorras ja seda ka markšeidermõõdistamise puhul. Iga uudne seade on tihti oma tuleku ajal kriitilise pilgu all, kuna on puudu põhjalik uuritus ja välitööde tulemuste analüüs selle kohta. Droonilt mõõdistamisega fotogramm-meetria abil, tuli teemaks 2010. aastate alguses ning tekitas palju segadust ja kriitikat, kuid sai tõuke tänu 2015 aastal koostatud magistritööle "Droonilt mõõdistamise kasutamise võimalikkus markšeidermõõdistamisel" (H. Männamets, 2015). Et kiiremini kasutusele võtta võimsam LiDAR tehnoloogia on mõistlik varakult läbida katsed ja analüüs selle tehnoloogia kasutamise võimalikkusest mäendusvaldkonnas.

Hetkel on palju puudujääke droonilt mõõdistamisel fotogramm-meetria puhul, mis piiravad selle tehnoloogia täielikku kasutamist igas olukorras. Majandus- ja taristuministri 03.05.2019. a määrusest nr 32 "Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord" lisast 1 tulenevalt peab õhusõiduki abil teostatava fotogramm-meetrilise mõõdistusmeetodi asendama kontaktmõõdistamisega järgnevatel juhtudel:

- 1) taimestunud ala;
- 2) veega või lumega kaetud ala;
- 3) mõõdistusobjektist väljaspool asuva objekti varjuga kaetud ala;
- 4) ilma tekstuurita, läikiv või läbipaistev objekt;
- 5) kaamera vaateväljast suurem lame objekt.

Peale selle, et fotogramm-meetrilise mõõdistamise puhul on vaja kasutada ka kontaktmõõdistamist tähistega sidumiseks, on ka kameraaltöö väga ajakulukas ning viib kogu teostusaja väga pikaks, mis omakorda vähendab vastuvõetavate objektide kogust ajalise piiratuse tõttu. Arvestades, et viimaste aastatega on suurenenud keskkonnalubade taotluste arv märkimisväärselt Rail Baltic trassi rajamise tõttu, suureneb ka markšeidermõõdistuste vajadus neid taotletavaid karjääre teenindada. Kuna hetkel pole uuritud mäendusvaldkonnas LiDAR seadme kasutamist markšeidermõõdistamiseks, siis antud töös üritan pakkuda lahendust tööde efektiivsemaks muutmisele.

Käesolev töö keskendub eespool toodud probleemide lahendamisele, et teha selgeks ja põhjendada kas LiDAR seadme kasutuselevõtt lihtsustaks ning kiirendaks markšeidertööde käiku. Tähtsa osana tööst on analüüsida ja hinnata seadusest tulenevate kitsenduste vajalikkust LiDAR tehnoloogia puhul. Põhilise eesmärgina on töös vaja välja tuua käsitletava tehnoloogia täpsus ja sobilikkus etteantud mõõtemääramatuste osas.

Kuna üha enam on ettevõtted huvitatud oma materiaalsete kulude ja ajakulu vähendamisest ning tööde täpsuse suurenemisest on vajalik luua arusaam uute tehnoloogiate eelistest hetkel kasutusel olevatega, hinnates nende kasutamise võimalikkust erinevate suuremat tähtsust omavate parameetrite näol. Sellest lähtudes on selle töö siht anda põhjalik analüüs LiDAR seadme integreerimiseks markšeidermõõdistamise edendamiseks.

2. Kasutatud materjali ülevaade

Kuigi LiDAR seadme kasutamise üks elementidest on droon nagu ka fotogramm-meetrilise mõõdistamise puhul, siis tegemist on siiski uue tehnoloogiaga, millest lähtuvalt on minu lõputöö esimene osa enda kurssi viimine LiDAR tehnoloogiat puudutava teooriaga, et luua alus ja teadmised käsitletava tehnoloogia võimekusest. Antud peatükis käsitlen ka mahu määramise meetodeid ja lõpptulemusi, mis protsessi käigus tekivad.

2.1 LiDAR tehnoloogia ajalugu

LiDAR on väga sarnane 1904. aastal välja töötatud RADAR-ile. RADAR kasutab raadiolainete pulseerimist, ehk saadab välja raadiolaine, mis tagasi peegeldades mõõdab kaugust objektis tagasi RADAR-ini. LiDAR kasutab valgust samamoodi. Idee kasutada valgust ja mõõta, kui kaua kulus valguse naasmiseks aega, et leida kaugust, tekkis mehel nimega E. H. Synge, kes 1930. aastal kasutas atmosfääri uurimiseks prožektoreid. 1938. aastal kasutati pilvede kõrguse mõõtmiseks valgusimpulsse. Laservalguse kasutamise eeliseks on see, et sellel on lühike lainepikkus, mis võimaldab tuvastada või mõõta palju väiksemaid objekte (Acroname, 2020).

LiDARi võimalusi hakati rohkem märkama 1960. aastal kui leiutati rubiinlaser ehk tahkislaser, mille keskseks komponendiks on kristall või klaas (Laser, 2022) (Wang, X. Jt. 2020). Nagu uute tehnoloogiatega on, siis esmalt tundis huvi selle vastu USA sõjavägi, kes 70-nendatel panid suurt rõhku selle arendamisele. 1977. aastal arendati edukalt välja esimene käsitsi hoitav laserkaugusmõõtur AN/gvs-5, mis oma aja kohta kaalus kõigest 2 kg (Pilt 1) (Wang, X. Jt., 2020).



Pilt 1 AN/gvs-5 laserkaugusmõõtur (Pike, J., 2000)

Algusaastatel kuulus lasermõõtmine pigem militaar ja teaduslike uuringute huvi- ja kasutusorbiiti ja mitte väga tsiviilkasutusse just selle tehnoloogia maksumuse tõttu. Aja möödudes aga tehti märkimisväärseid tehnoloogilisi edusamme, mis aitasid kaasa hinna alandamisele, mis omakorda tõi

tehnoloogia tavainimesele lähemale ja kättesaadavamaks. Kuna kasutus suurenes, siis selle käigus tuvastati ja parandati paljud puudujäägid. Võeti kasutusele laser, mis on silmadele ohutu ja kasutati uusimat elektroonikat. Selle tulemusena vähenes energiatarve ning suurenes täpsus. Aja pikku kujunesid välja erinevat tüüpi laserkauguse määramise süsteemid: ühekiireline, kahemõõtmeline ja kolmemõõtmeline laserkauguse süsteem. Ühekiireline süsteem mõõdab kaugust, kahemõõtmeline süsteem skaneerib tasapinda ja kolmemõõtmeline aitab luua profiili ja koordinaate (Acroname, 2020) (Wang, X. Jt., 2020).

2.2 LiDAR töö põhimõtted

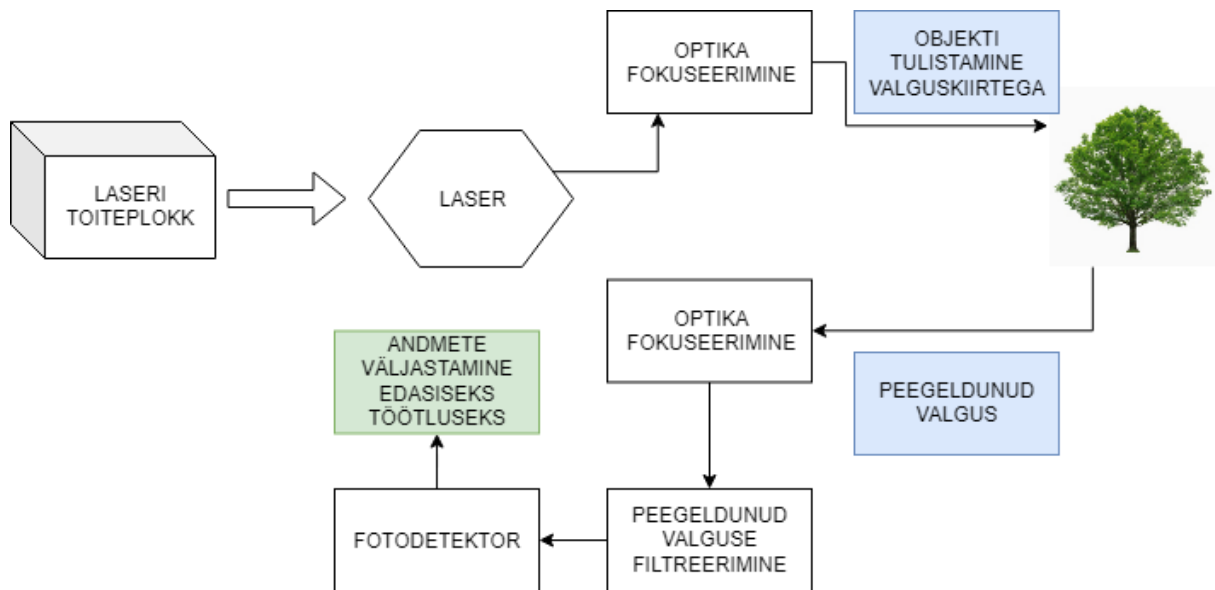
LiDAR seade kasutab laserit, kuna laser pakub oma omaduste poolest kõrget heledust, monokromaatsust, koherentsust ja suunalikkust, mis teeb sellest hea tehnoloogia, mida kasutada kauguse mõõtmisel (Jelínková ja Šulc 2013). Lahti seletatuna on omadused järgmised:

- **Kõrge heledus**
Laseri kõrge heledus tuleb selle laine intensiivsust, kuna laseri valgus on koondatud ühte kindlasse suunda ja ta ei valgu laiali nagu näiteks tavalise laualambi poolt tekitatud valgus.
- **Koherentsus**
Laseri puhul toimub elektronide üleminek kunstlikult. Teisisõnu, laseris toimub elektronide üleminek teatud aja jooksul. Kõigil laseri kiirgavatel footonitel on sama energia, sagedus või lainepikkus. Seega on laservalguse valguslainetel üks lainepikkus või värv. Seetõttu on laservalguse lainepikkused ruumis ja ajas faasis.
- **Suunavus**
Laseri liiguvad kõik footonid samas suunas. Seetõttu kiirgab laser valgust ainult ühes suunas.
- **Monokromaatsus**
Laseri on kõigil kiirgavatel footonitel sama energia, sagedus või lainepikkus. Seega on laseri valguslainetel üks lainepikkus või värv, mille tõttu katab laservalgus väga kitsa sageduste või lainepikkuste vahemikku.

Eelnevalt loetletud omaduste pärast on laseril võrreldes teiste mõõtmismeetoditega suur eelis just nimelt täpsuse, kõrge eraldusvõime ja lihtsa kasutuse osas.

LiDARi töö põhimõtte langeb pealtnäha lihtsale printsiibile, milleks on valguse peegeldumine. Seade kasutab mõõtmisandmete saamiseks seadmest välja saadetud laservalgust, mis peegeldades tuvastab lainepikkuse erinevusi ja ajakulu peegeldunud valguskiire tagasi jõudmiseks. Kuna valguskiirus on konstante, siis nende parameetrite abil saab süsteem arvutada välja kaugused objektidest ja kujutada mõõdistatud maastikut või kindlat objekti digitaalselt, et teostada hilisemaid analüüse (Neoge ja Mehendale, 2020).

LiDARi tööprotsess on järgmine- toiteplokk annab laserile toite → laseri kiir liigub läbi optika fokuseerimise ning langeb objektile või alale, mida mõõdetakse → tagasi peegeldunud valgus liigub uuesti läbi optika fokuseerimise → kindel lainepikkus filtreeritakse välja filtri poolt → filtri väljund liigub läbi fotodetektorit → tulemusena andmed, mida saab edasi töödelda (Joonis 1).



Joonis 1 LiDARi tööprotsess (Neoge ja Mehendale, 2020)

2.3 Meetodid mahtude määramiseks

Mahtude määramiseks on mitmeid meetodeid. Läbi aegade on kõige tavaprasem olnud mõõdistada puistanguid ja kaeve-eesid manuaalselt. Manuaalse mõõdistamisel on aga risk ennast vigastada kõige suurem, kuna ronitakse kõrgetel puistangutel ja töö toimub masinate töötsoonis. Mõõdistusvõimalusi on mitmeid, mis tänu kolmemõõtmelistele koordinaatidele aitavad luua pinna edasiseks mudeldamiseks. Kõige levinumad meetodid on tahhümeetria, RTK GPS mõõdistamine ja fotogrammeetria (Siriba jt, 2015). Esimesed kaks mainitud võib liigitada kontaktmõõdistamise alla.

Tahhümeetriline mõõdistamine on kõige tavaprasem meetod, mille abil saadakse horisontaalsed kaugused ja kõrguste erinevused. Mõõteinstrumendiks on tahhümeeter. Tulemused saadakse kasutades instrumendi optilisi omadusi (Siriba jt, 2015). Kui veel kaks kümnendit tagasi oli tahhümeeter põhiline töövahend, siis tänapäeval on see leidnud pigem vähe kasutust. Kui kasutatakse, siis eletrontahhümeetrit, mis võimaldab üheaegselt mõõta nii kaugusi kui ka nurki kasutades selleks peegelprismalt või reflektorilt tagasipeegelduvat laserkiirt (Pilt 2)(Chekole, S. D. 2014). Kuna eletrontahhümeetriline mõõdistamine vajab mõõtmiseks kahte inimest ning on peale selle veel väga ajakulukas, siis seda väga ei kasutata. On küll olemas veel robottahhümeetrid, millega mõõdistamiseks on vaja ühte inimest, kuna robottahhümeeter liigutab end mootori abil selles suunas, kus asub inimene prismaga (Bimplus, 2020).



Pilt 2 Elektrontahhümeeter Leica Flexline TS06plus VOC (SCCS, 2022)

Globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem (GNSS) on satelliitide kogum, mis tiirlevad ümber maakera ning edastavad signaali. Signaal annab edasi lokatsiooni ja aja andmeid, mille abil GNSS vastuvõtja saab kätte oma positsiooni (EUSPA, 2021). GNSS vastuvõtjaga liigutakse mõõdistamise ajal ühelt punktilt teisele ja mõõdetakse igas punktis kolmemõõtmelised koordinaadid (Männamets, H. 2015).

Globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem (GNSS) pakub erinevaid positsioneerimislahendusi, milles hulgas on ka RTK (*Real time kinematic*), mis aitab suurendada positsioneerimissüsteemide täpsust, näiteks RTK GPS mõõdistamine. RTK positsioneerimissüsteem töötab põhimõttel, kus baasjaama vastuvõtja asub kindlal kohal ja liikujaama vastuvõtjaga saab liikuda punktilt punktile (Kirs, E. 2017). Eestil on oma GNSS baasjaamade vastuvõtjate võrk olemas nimega ESTPOS, milles on 2019. aasta seisuga 29 GNSS-püsijaama. (Joonis 2).

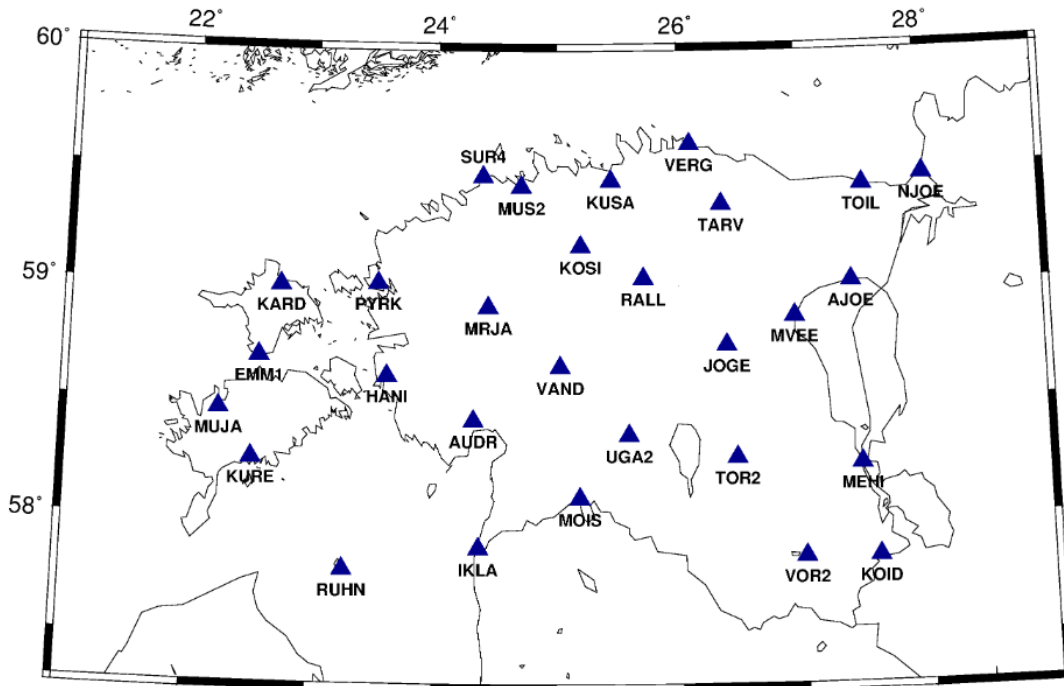
Võrreldes tahhümeetriaga on RTK GPS mõõdistamine lihtsustanud kogu tööprotsessi, kuna välitöö jaoks on vaja ainult sau, väliarvutit ja GPS vastuvõtjat, millel on andmeside baasjaamaga ühendamiseks (Pilt 3).

Peale RTK on olemas ka PPK (*Post Processed Kinematic*). Töö jaoks vajab täpselt samu vahendeid nagu RTK GPS. Antud positsioneerimislahendus aitab samamoodi suurendada täpsust, aga seda peale välitööd ehk kameraaltöö ajal liidetakse välitöö tulemused baasjaama parandustega. Kuigi see ei paku reaalseid parandusi, võimaldab see lahendus mõõdistada halva levi ja muude takistustega kohtades (Droon, 2022)



Pilt 3 Trimble R10 GNSS vastuvõtja (Geosoft, 2022)

RTK-l on mitmeid võrgu kontseptsioone, aga antud töös käsitletakse VRS ehk virtuaalse referentsjaama kontseptsiooni. VRS on välja töötatud Trimble poolt (Trimble VRS Now) (Landau jt, 2002) (Feng ja Wang, 2008). Trimble VRS Now võrgu peamiseks põhimõtteks on, et kontrolljaamad saadavad pidevalt andmeid keskserverile ja server arvutab pidevalt välja võrguga kaetud regiooni kohast ja atmosfäärist tulenevaid parandusi. Antud töös on kasutatud Eesti GNSS püsijaamade võrku, mis toetab VRS kontseptsiooni ehk VRS Now Eesti GNSS võrku. Markseiderite liikuvjaamad ühendavad andmeside abil selle süsteemiga ja saadavad NMEA (National Marine Electronics Association) formaadis andmetena oma asukoha andmed. Keskserver tunneb liikuvjaama kui VRS seadme ära ja arvutab välja unikaalsed parandused liikuvjaamast mõne meetri kaugusele ulatuva ala kohta. Lõpptulemusena saab horisontaalse tulemi 1-3 cm ja vertikaalse tulemi 1-5 cm täpsusega (Geosoft, 2022).



Joonis 2 Eesti GNSS püsijaamade võrk (Maa-amet 2022)

Fotogramm-meetria on juba pikemat aega olnud erinevates valdkondades kasutuses, nii ka markseidermõõdistamisel. Seda mõõdistamise viisi saab jagada kolmeks- satelliit-, aero- ja terrestriline fotogramm-meetria (Männamets, H. 2015). Käesolevas töös käsitletakse aerofotogramm-meetrist mõõdistamist UAV platvormilt. Tehnoloogia põhimõtte on aerofotode abil objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramine. Fotogramm-meetrisel mõõdistamisel on tähtis, et omavaheliste fotode piki- ja põikikattumine oleks vähemalt 70% (Jürgens, J., B. 2015). Tänapäeval on see meetod kõige rohkem kasutuses, saadav andmestik on mahukas ja detailne ning selle meetodiga puudub riskifaktor ehk ei pea ronima karjääris puistangutel ja töötama mäemasinate vahel (Siriba jt 2015).

Antud töös käsitletakse LiDAR, RTK ja fotogramm-meetrist mõõdistamist.

2.4 Mahu määramine

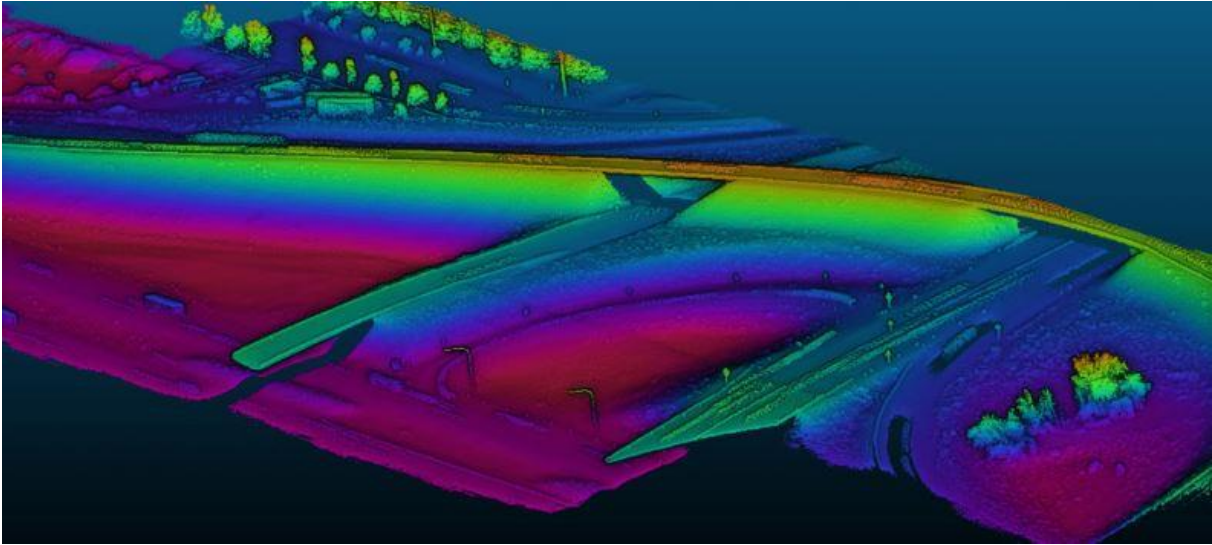
Pinna modelleerimine on muutunud oluliseks elemendiks töötlemisel ja kolmemõõtmelise geograafilise teabe visualiseerimine. Mudelid luuakse huvipakkuva piirkonna/objekti mõõdetud punktidest. Digitaalne kõrgusmudel (DEM), digitaalne pinnamudel (DSM) ja digitaalne maastikumudel (DTM) on kolm tavaliselt rakendatavat georuumilist funktsiooni, mis on loodud UAV kaardistamissüsteemidega. Iga andmestik pakub erinevaid kõrgusväärtusi, kuna iga mudel kasutab erinevat meetodikat. (Siriba jt 2015) (Geodetics, 2022)

Digitaalne kõrgusmudel (DEM) on fikseeritud ruudustiku intervalliga rasterandmed ja maastiku kolmemõõtmeline esitus, kus on välja filtreeritud ja välistatud maastiku muud osad nagu näiteks puud, majad, ojad jt. pinnaobjektid. (Llames, G., H., 2022)

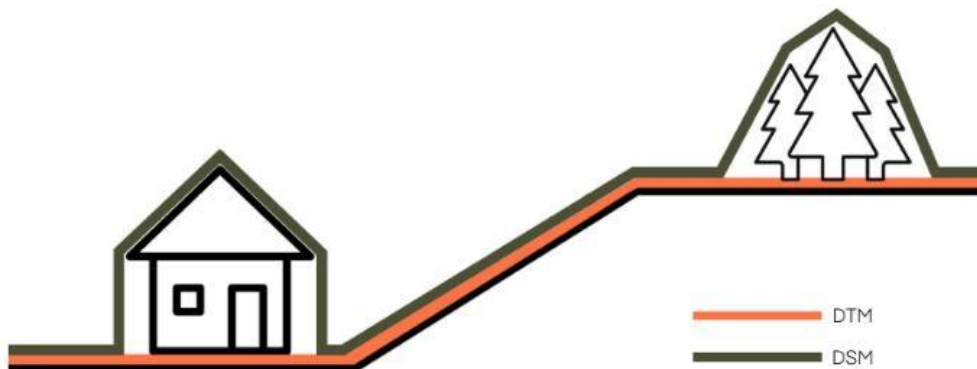
Digitaalset maastikumudelit (DTM) võib kirjeldada maastikupinna kolmemõõtmelise esitusena. Mudel koosneb digitaalse kujul salvestatud X, Y, Z koordinaatidest. Erinevalt DEM mudelist hõlmab DTM

mudel ka muid geograafilisi elemente ja looduslike objekte nagu näiteks jõed ja järsakud. Mudelil aga puuduvad taimestik ja hooned (Joonis 3). DTM-i loomiseks kasutatakse tavaliselt fotogrammeetrilist töötlemist (Llames, G. , H. , 2022).

Digitaalne pinnamudel (DSM) on maapinna kõrguste, sealhulgas sellel asuvate looduslike või tehisobjektide kolmemõõtmeline kujutis. See tähistab taimestiku, hoonete ja muude paljast maapinnast kõrgemal olevate peegelpindade keskmist merepinna kõrgust (Pilt 4)(Llames, G. , H. , 2022).



Pilt 4 DSM mudel (Geodetics, 2022)



Joonis 3 DSM vs DTM (Llames, H., G., 2022)

Mahu määramiseks ehk lõpliku tulemuse saamiseks on vaja käsitleda pinnamudeleid (DTM). Käesolevas töös käsitletakse GPS RTK, fotogramm-meetria ja LiDAR mõõdistuse tulemusel saadud pinnamudeleid. GPS mudeli jaoks on aluseks võetud punktid, mida on käsitsi ehk

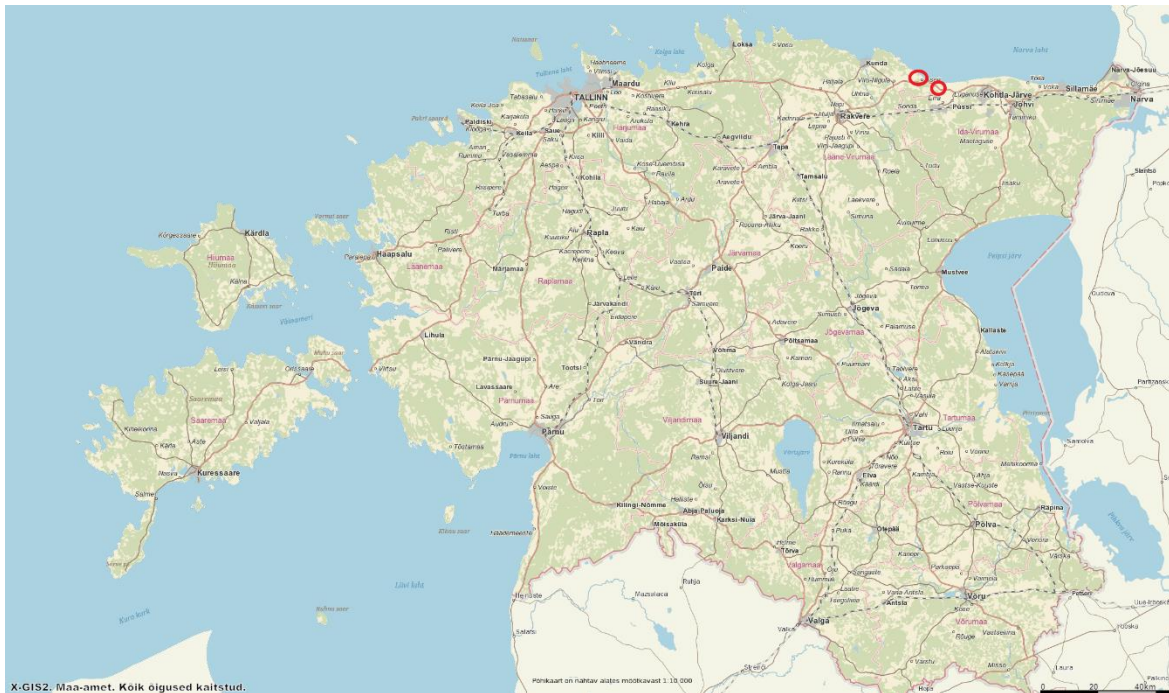
kontaktmõõdistamisega üles mõõdetud. Fotogramm-meetrilise mudeli jaoks on töötlusprogrammis koostatud pinnamudeli fail, mis kujutab endast korrapärases ruudustikus olevaid punkte ruuduküljega 0,75 m. Iga punkt omab X, Y ja Z väärtust. LiDAR andmete põhjal tehtud pinnamudeli puhul on tegemist korrapäratult olevate punktidega. Kuna LiDAR suudab toota väga suures koguses punkte, siis on mudel puhastatud ja hõrendatud. Mahuarvutust tehakse kahe mudeli võrdlusel. Antud töö juhul kasutatakse põhjamudeleid ja fiktiivse lamami mudeleid.

3. Metoodika

Antud peatükk magistritöös seletab lahti töö praktilise osa. Praktiline osa koosneb kahest etapist: välitöö ja kameraaltöö. Praktilise töö eesmärk oli välja selgitada LiDAR seadme täpsus markšeideritöödel kasutamiseks, tehnoloogia plussid ja miinused ja üldiselt hinnata selle kasutamise võimalikkust. Välitöö osa magistritööst nägi ette 2022. aasta mais mõõdistustöid kolme tehnoloogiaga- RTK GPS, fotogramm-meetriaga ja LiDAR-iga. Töid teostati karjäärides, mis asusid Ida-Eesti. Objektidelt sai kogutud andmeid erinevate valmistoodangu puistanguvormide ja erinevate kaeve-eeде reljeefide kohta. Mõõdistatud sai savikarjääri kui ka lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangut ja kaeve-eed. Kuna mõõdistasin karjääre tervikuna, siis praktilises töös käsitlen ka muid pinnavorme, et tuua välja erinevusi tehnoloogiate vahel.

3.1 Uuritavad objektid

Töös võeti uuringu alla kaks objekti- Aseri savikarjäär ja Suur-Kõrtsi II lubjakivikarjäär. Mõlemad objektid olid osa J. Viru Markšeideribüroo mõõdistamise välitööst. Objektid valiti, kuna nende mõõdistamisel sai kasutada kõiki kolme meetodit. Valik tehti ka selle alusel, et soovisin mõõdistada tervet kaeveala, mida sai teha savikarjääris ja lubjakivikarjäär pakkus erinevaid puistanguvorme.



Joonis 4 Objektide asukohad märgitud punase ringiga

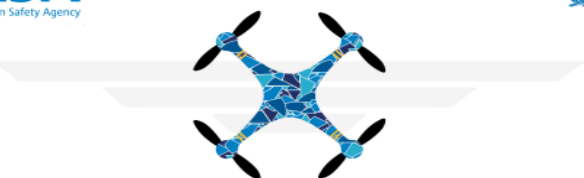
3.2 Seadusandlus

Markšeiderimõõdistamine on reguleeritud erinevate seadustega. Markšeiderimõõdistusi tehakse kooskõlas majandus- ja taristuministri 14. aprilli 2016. a määruses nr 34 „Topo-geodeetilise uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded” ja keskkonnaministri 23. jaanuari 2017. a määruses nr 4 „Üldgeoloogilise uurimistöo loa, geoloogilise uuringu loa ja maavara kaevandamise loa taotluse esitamise kord ning taotluse vorm ja täpsustatud nõuded taotluse kohta ning üldgeoloogilise

Tauri Põldema, Aerolaserskaneerimine mehitamata õhusõidukilt markšeideritöödel mahtude mõõdistamiseks

uurimistöö loa, geoloogilise uuringu loa ja maavara kaevandamise loa vorm” seatud nõuetega. Põhilised nõuded ja kord tuleb majandus- ja taristuministri 03. mai 2020. a määruses nr 32 „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord”, mille alusel tuleb tagada mõõtmise täpsus, jälgitavus, kontrollitavus ja tulemuste kasutatavus. Markšeiderimõõdistus peab olema dokumenteeritud (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord, 2020).

Alates 1. juulist 2021 peavad kõik droonilennutajad tulenevalt Euroopa Komisjoni rakendusmäärusest 2019/947 omandama kaugpiloodi algpädevuse. Enda ja teiste turvalisuse tagamiseks tuleb enne drooni lennutamist läbida kaugpiloodi (A1/A3) pädevust tõendav eksam (EASA 2019/947). Eksamit on võimalik sooritada Lennuohutuse infosüsteemis ja on tasuta. Töö tegijana oman pädevust tõendavat dokumenti (Joonis 4).



VEEBIPÕHISE KOOLITUSE TÕEND

PROOF OF COMPLETION OF THE ONLINE TRAINING

Eesnimi ja perekonnanimi (First and Last name)

TAURI PÕLDEMA

Kaugpiloodi registreerimisnumber (Identification number)

EST-RP-4iwpaqku48s0

Kehtiv kuni (Valid until)

22.05.2027

Joonis 5 Pädevust tõendav dokument

3.2.1 Täpsusnõuded

Et luua töös praktilise osa analüüsi jaoks täpsuse alampiir, tuleb vaadata täpsusnõudeid markšeideritööde jaoks. Esiteks määruse ”Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord” § 4 lg 1 ütleb, et markšeiderimõõdistused peab saama kontrollida kordusmõõdistamisega või arvutustega. Sama määruse lg 2 toob välja protsendid, mille alusel võib kordusmõõtmisel mõõtesuuruse väärtus erineda (Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord, 2020). Väärtused toodud all järgnevas tabelis 1.

Mahu vahemik,	Protsent, %
Kuni 20 000 m ³	10
20 001- 50 000 m ³	6
50 001- 200 000 m ³	4

Mahu vahemik,	Protsent, %
200 001- 1 000 000 m ³	3
Üle 1 000 001 m ³	2

Tabel 1 Kordusmõõtmise mõõtesuuruse väärtuse erinevuse lubatud protsendid

3.3 Kasutatud tehnika ja tarkvara

3.3.1 Droonid

Magistritöö praktilise osa peamiseks töövahendiks välitöödel aerolaserskaneerimise puhul on droon ja LiDAR seade, mis on selle külge kinnitatud. Antud uurimustöö jaoks on kasutatud laserskaneerimisel õhusõidukina ehk droonina DJI Matrice 300 RTK drooni (Pilt 5). DJI Matrice 300 RTK droon pakub äärmiselt võimekat pagasit, et teostada mõõdistusi. Antud mudelil on signaali vastuvõtmise maksimaalne kaugus 15 km ehk kui olla statsionaarne ja ümberringi ei ole takistusi, siis droonil on maksimaalselt 70,7 ha lennuala. Lennuajaks on brošüüris välja toodud 55 minutit. Droonil on IP45 veekindluse reiting, mis laseb lennata ka kerge vihmaga. Drooni üheks eriliseks omaduseks on akude vahetus ilma drooni välja lülitamata (*hotswap*) ehk droon saab koheselt lendu jätkata (Tabel 2).

	DJI Matrice 300 RTK	DJI Phantom 4 RTK
Lennukaugus	15 km	7 km
Lennukõrgus	7000 m	6000 m
Lennuaeg (maksimaalne)	55 min	30 min
IP reiting	45	-
Tuulekindlus (maksimaalne)	15 m/s	10 m/s
Töötemperatuuri vahemik	-20°C kuni 50°C	0°C kuni 40°C

Tabel 2 Kasutatud droonide parameetrite võrdlus (DJI, 2020) (DJI, 2022)



Pilt 5 DJI Matrice 300 RTK droon välitööl, millel on küljes LiDAR seade

Fotogramm-meetrilise mõõdistuse jaoks kasutati DJI Phantom 4 RTK drooni (Pilt 6). Antud mudel on olnud turul viimased neli aastat ja olnud suuresti kasutuses markšneideritöödel, et teostada fotogramm-meetrilist mõõdistamist. Droonil on võimekust olla lennus maksimaalselt 30 minutit, mis on peaaegu poole vähem, milles on Matrice 300 võimeline. Tuulekindlus on droonil 10 km/h, aga realsuses turvalisuse mõtte tuuakse droon juba 8 km/h tuule puhul alla. Droonil puudub ka IP reiting ehk pole tolmu- ega vihmakindel (Tabel 2).



Pilt 6 DJI Phantom 4 RTK droon (Geosoft, 2022)

3.3.2 LiDAR seade

Laserskaneerimiseks kasutati Zenmuse L1 LiDAR seadet, mis on lihtsasti kinnitatav Matrice 300 drooni külge (Pilt 7). Kasutades koos drooniga Matrice 300 saab võimsa koosluse, mis annab reaajas 3D andmeid ning jäädvustab keerukate struktuuride üksikasju, mille tulemusena on võimalik rekonstrueerida ülitäpseid mudeleid. Seadmesse on integreeritud kokku LiDAR moodul, RGB kaamera ja ülitäpne IMU ehk inertsiaalandur. Seadmel on endal IP54 reiting, mis lubab tegutseda ka vihmases või uduses keskkonnas, kuid antud töös ei käsitleta neid tingimusi. Ühe valgusimpulsi kohta on võimalik saada 3 peegeldust. Äärmiselt kõrge täpsusega on L1 võimeline mõõtma 240 000 punkti sekundis. Kõiki neid punkte ja valmivat pilve on võimalik ka reaajas sõidu ajal jälgida. Seadme üks miinus on see, et ta peab soojenema mõni minut enne lendu, kuid üldkokkuvõttes ei oma see suurt tähtsust (DJI, 2022).

	Zenmuse L1
Kaal	930±10 g
IP reiting	IP54
Punkte sekundis	240000
Töötemperatuuri vahemik	-20°C kuni 50°C 0°C kuni 50°C (kui kasutada RGB kaamerat)

Tabel 3 Zenmuse L1 parameetrid (DJI, 2021)



Pilt 7 Zenmuse L1 LiDAR (DJI, 2022)

3.3.3 RTK GPS

RTK GPS mõõdistamise jaoks kasutasin GNSS vastuvõtjat Trimble R10 (Pilt 2). Tegemist on disainilt kerge ja väikese vastuvõtjaga, mida on kerge kasutada. Koos sauja ja väliarvutiga kaalub vastuvõtja kõigest 3,57 kg, millega on kerge ringi liikuda. Vastuvõtjal on ka väga hea IP reiting ehk on tolmukindel ja veekindel kuni 1 m sügavuseni (Tabel 4).

	Trimble R10
Maksimaalne täpsus	8 mm H / 15 mm V
Kaal	1,12 kg (3,57 kg koos sauja ja väliarvutiga)
Töötemperatuuri vahemik	-40°C kuni 65°C
IP reiting	IP67

Tabel 4 Trimble R10 parameetrid (Trimble, 2022)

3.3.4 Tarkvarad

Töö praktilises osas on kasutatud erinevaid tarkvarasid eelkõige mudelite ja jooniste analüüsiks kui ka sellele eelneva andmetöötluse jaoks. Kuna on kasutatud kahte tehnoloogiat, siis on ka topelt programme, mida tuleb kasutada. Mudelite analüüsi puhul on programm mõlema puhul sama. Kasutatud on tarkvarapaketti Bentley PowerCivil for Baltics V8i SELECT series 3. Tarkvarapakett koosneb kahest põhiosast: CAD osa joonestamiseks ja Bentley Inroads, mis on mõeldud 3D modelleerimiseks.

Fotogramm-meetria puhul on vaja peale lendu teha põhjalik kameraaltöö, et saadud andmetes saaks vormitud valmis andmestik mudelite koostamiseks. Selleks tuleb eelnevalt töödelda välitöö andmeid Pix4Dmapper programmis, mis on loodud fotogramm-meetria andmete tõlgendamiseks ja terviku koostamiseks (Pix4Dmapper, 2022).

LiDAR välitöö andmete puhul on samme rohkem, kuid ei nõua suurt ajakulu. Kuna LiDAR seade kogub lennu ajal väga suures mahus erinevaid andmeid, tuleb need andmed kõik kokku viia üheks, tõsta õigele kõrgussüsteemile ja eemaldada taustamüra.

Esimeseks sammuks LiDAR andmete töötlusel on DJI Terra. Terra on programm, kus saab planeerida lende, analüüsida andmeid ja modelleerida. Terrat kasutan selles töös eesmärgiga muudab välitöö andmed .las failiks ja viia punktid Euroopa kõrgussüsteemi (Terra, 2022).

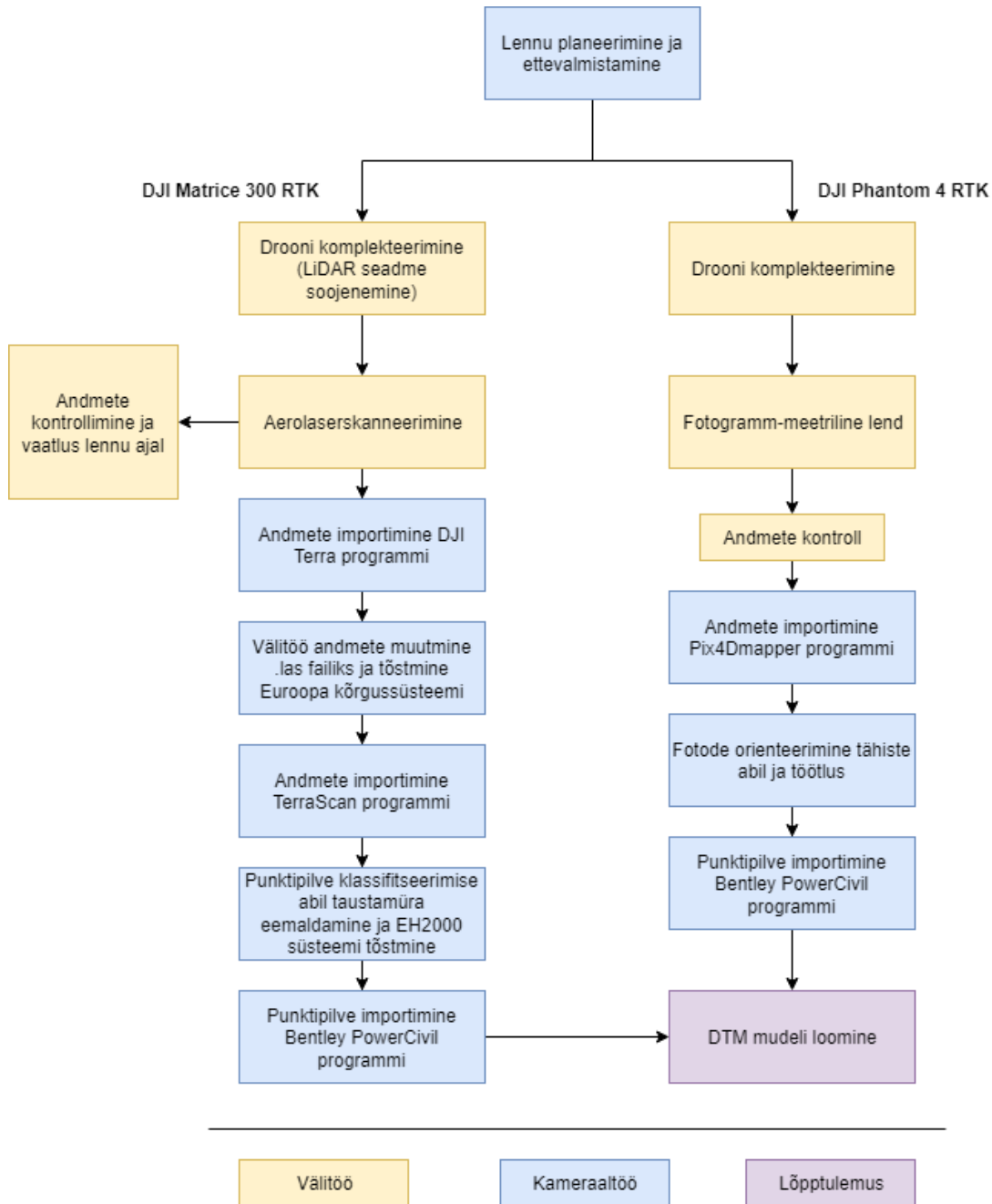
Kuna kogutud on kõikide objektide andmed ehk eelnevalt mainitud DSM mudeli eelvormingus, siis tuleb kasutada programmi TerraScan. Terrascan on rakendus igat tüüpi punktipilvede haldamiseks ja töötlemiseks. TerraScani abil saab eemaldada kõik ebavajalik ehk klassifitseerimise käigus saada kätte

ainult maapind likvideerides puud, võsa ja hooned. Lõpetuseks saab TerraScaniga mudeli viia Eesti EH2000 kõrgussüsteemi kontrollpunktide abiga (TerraScan, 2022).

3.4 Ülevaade mõõtmisseadmete tööprotsessist

Mõlema aeromõõdistamise seadme lihtsustatud tööprotsessid on toodud eelnevast lähtudes joonisel 3. Tööprotsess saab alguse lennu planeerimisest ja ettevalmistamisest lähtudes objekti eripäradest. Kuna transpordi jaoks on troonidel eraldi kastid, siis need tuleb kohapeal ka komplekteerida. Aerolaserskaneerimise puhul on vaja ka oodata, et LiDAR seade ennast üles soojendaks enne kui saab alustada mõõdistamisega. Joonist vaadates võib esmapilgul järeldada, et LiDAR seadme töö ja lõpptulemi kättesaamine on ajakulukas, kuid täpsemalt sellest Tulemuste analüüsi peatüki all. Üldjoontes on mõlemad tööprotsessid sarnased ja lihtne on minna üle ühelt droonilt teisele.

RTK GPS mõõdistamise puhul on eelnevalt vaja kontoris valmistada objekt ette kui selleks on vajadust (vajalikud piirid, objekti plaan). Objektis olles on vaja komplekteerida seade ehk kinnitada väliarvuti ja GPS vastuvõtja saua külge. Kui seade on koos tuleb lülitada kõik tehnika sisse ja ühendada vastuvõtja andmesidega, et saaks ühendust baasjaamaga. Selle meetodi puhul võtab välitöö kõige rohkem aega, kuna tahetud ja vajalikud punktid peab manuaalselt läbi käima, mitte nagu droonil, mis lendab objekti üle. Edasine kameraaltöö näeb ette andmete eksportimist väliarvutist ja nende andmete põhja DTM mudeli koostamist Bentley Powercivil programmis.



Joonis 6 Mõõtmisseadmete tööprotsess tahetud tulemini

3.5 Mudelite võrdlus

LiDAR, fotogramm-meetria ja GPS mudelite võrdluseks ning analüüsiks kasutatakse erinevaid vorme. Markseideritööde peamine eesmärk on kaevandamismahtude määramine. Selleks on üks mudelite võrdluse osa mahtude võrdlus, kus puistangute puhul kasutatakse aluseks eraldi koostatud puistangupõhja mudelit ja terve karjääri mahu arvutamiseks võetakse fiktiivne lamam. Mahud arvutatakse triangulatsiooni interpolatsiooni meetodit kasutades (PowerCivil programmis Triangle volumes). Mahtude arvutamisele järgnevalt kontrollitakse mahtude erinevust lähtudes peatükis 3.2.1 välja toodud lubatud protsentide alusel. Protsendi arvutatakse LiDAR mõõdistamismeetodile eeldades

seada, et RTK GPS või fotogramm-meetriline mõõdistamine on olnud esimene mõõdistus ja LiDAR on kordusmõõdistus. Protsendi leidmiseks kasutan mahu suhtelise erinevuse valemit.

$$M_s = \frac{\Delta M}{V_{min}} * 100\%,$$

kus M_s - mahtude suhteline erinevus, %

ΔM - mahtude erinevus, m^3

V_{min} - väiksem maht, m^3

Võrdlen ka objektidest tehtud läbilõikeid, et saada aru mudelite detailsusest ja erinevusest. Võrdlusesse toon ka pinnamudelite punktide arvud, mudelite maksimaalsed/minimaalsed kõrgused.

4. Tulemuste analüüs

Tulemuste analüüsi osa töö praktilises etapis koosneb RTK GPS, fotogramm-meetria ja aerolaserskaneerimise tulemusel saadud mudelite võrdlemisest. Võrdlusesse võeti kogu kaeveala, valmistoodangu puistangud, kui ka kattepinnase vallid/puistangud, et testida tehnoloogiate erinevusi. Antud peatükk toob välja LiDAR seadme kasutamise plussid ja miinused analüüsile toetudes. Kõik aeromõõdistamised on tehtud 100 meetri kõrguselt. Fotogramm-meetria pinnamudelite ruudustike mõõtmed on 0,75 x 0,75 m ehk iga 75 cm tagant on punkt X, Y ja Z väärtustega.

4.2 Savikarjääri mõõdistus

Esimene analüüsi ja võrdluse alla kuuluv karjäär on savikarjäär. Valitud karjäär aitab luua hea ülevaate mõõtmismeetodite erinevusest. Välitöö toimus 2022. aasta mai kuu teises pooles. Mõõdistamiseks sai kasutatud kolme erinevat meetodit- RTK GPS, fotogramm-meetria droonilt ja LiDAR mõõdistamine droonilt. RTK GPS mõõdistamisega sai kogutud 558 mõõdistuspunkti. Fotogramm-meetrilise mõõdistamise jaoks märgiti maha 5 tähist. Kõigi meetodite pinnamudeli punktide arvud on toodud tabelis 5. Pinnamudeli punktide arvu osas on näha ulatuslikku ülekaalu LiDAR mudelil, mis on näiteks fotogramm-meetrilise mudeli punktiarvu suhtes 6 korda suurem. Suurem punktide arv annab mudelile parema detailsuse. Kõigi kolme meetodi mudelite 3D pinnad on toodud lisades (LISA 2-4).



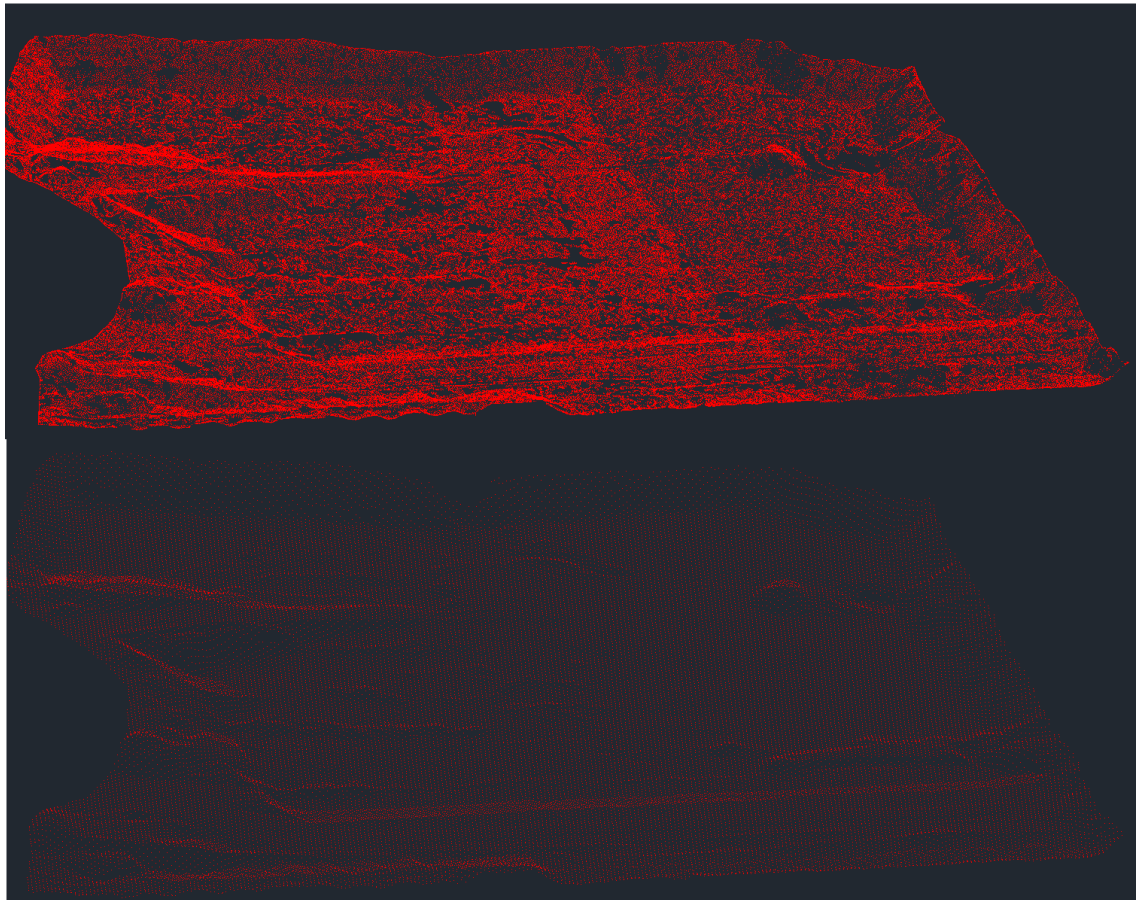
Joonis 7 Mõõdistatud savikarjääri üldvaade

Savikarjääri puhul sai aeromõõdistamisega üles võetud suurem ala kui savikarjääri kaeveala, mida käsitlen. Selleks piiritlesin mudelid ja selle arvelt vähenes ka punktide arv mudelis. Kui võtta tervik fotogramm-meetria mudel oleks punktide arv ligikaudu 256 000. LiDARi puhul on punktide arv ligikaudu 3 miljonit, mis on märkimisväärne. Tasub ka mainida, et LiDARi algne mudel, mis tuleb välja DJI Terra programmist koosneb ligikaudu 43,5 miljonist punktist (141 punkti/m²). See mudel lihtsalt läbib puhastamise ja hõrendamise vastavalt reljeefile sellel eesmärgil, et saada kätte puhas maapind ehk alles jäetakse reljeefi iseloomustavad punktid. Hõrendamine toimub eesmärgil faili suuruse vähendamise eesmärgil ehk kui reljeef ei muutu siis pole vaja ka nii palju punkte. Faili suuruseid võrreldes on LiDAR mudelifail 15,8 Mb suur ja fotogramm-meetiline mudelifail 6,7 Mb.

Punktipilvede võrdlusel tuleb hästi välja detailsuse erinevus fotogramm-meetria ja LiDAR pinnamudelite vahel (Joonis 7). Joonisel on näha kuidas fotogramm-meetiline pilv ei ole väga tihe ja on korrapärane. LiDAR pilvel aga on kõik punktid korrapäratult just seal, kus on vaja. Ilmekalt on näha ka väiksemad künkad ja augud. Karjäär ise on ka nagu kuumaastik ehk detailsus on LiDAR pilvel väga korralik.

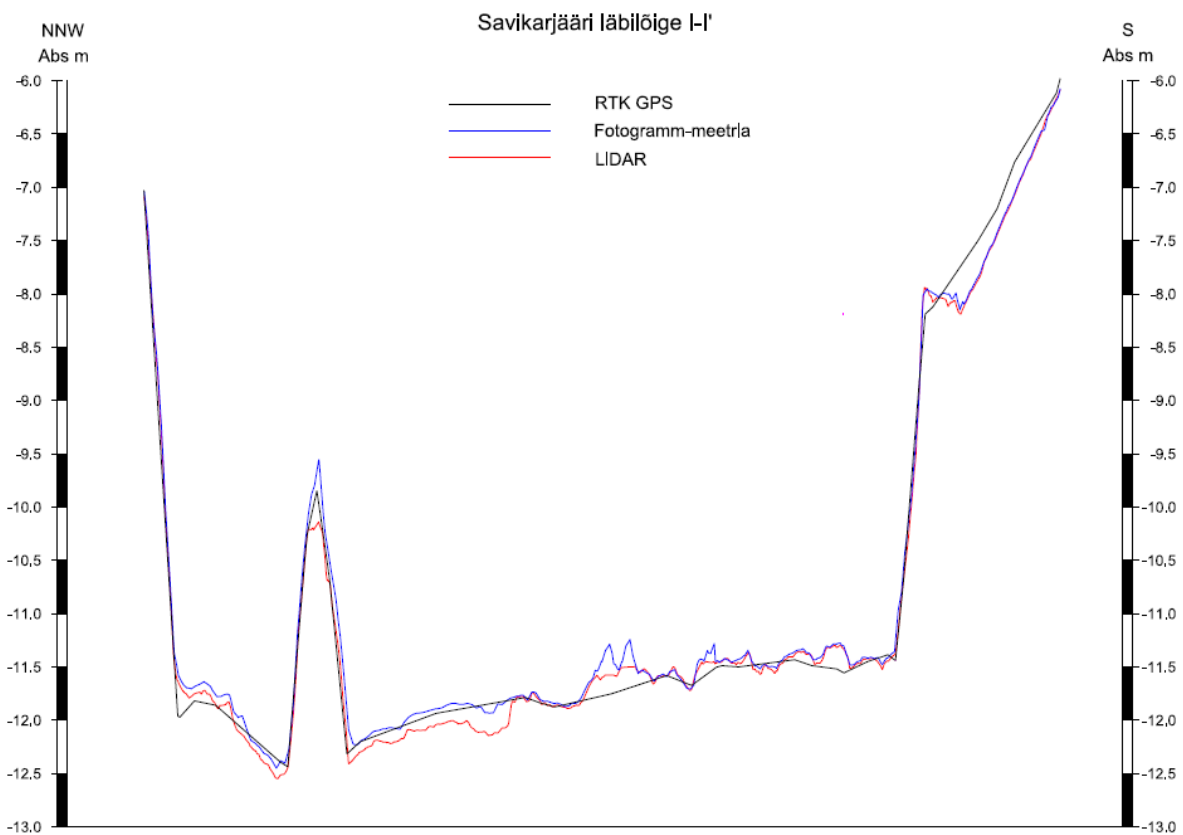
	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Punktide arv mudelis	37603	245359	558

Tabel 5 Savikarjääri pinnamudelite punktide arvud



Joonis 8 Ülemine pilv on LiDAR punktipilv, alumine fotogramm-meetiline punktipilv

Savikarjääri läbilõige sai valitud nii, et see läbiks ka üksikut puistangut/kuhilat, mida on näha lõike vasakul otsas (Joonis 8). Huvitaval kombel on läbilõikel näha suuri erinevusi nii LiDARI ja fotogramm-meetria vahel kui ka RTK GPS ja LiDARI vahel. Puistangu juures on LiDAR üles võtnud tipu ligikaudu 0,5 m madalamalt kui fotogramm-meetria. Raske on öelda, millest see tingitud on. Ei saa ka öelda, et LiDAR tulemus vale on, kuna RTK GPSi ja fotogramm-meetria vahel on ka umbes 0,3 m. Need erinevused on väga drastilised, kuid kui toetuda LiDAR detailsusele, siis võiks arvata, et see meetod on siinkohal kõige täpsem. Suured erinevused jätkuvad ka mööda lõiget minnes vasakul. Puistangust vasakule jääv ala kujutab endas suuri vahesid LiDAR ja fotogramm-meetria mudelite vahel. Ortofotot vaadates võib öelda, et ala on väga ere ja fotogramm-meetria ei ole suutnud korraliku mudelit moodustada, aga punktipilved on korrapärased.



Joonis 9 Savikarjääri läbilõige I-I'

Mahu määramiseks on modelleeritud fiktiivne lamam. Lamami pind asub absoluutkõrgusel -20 m. Lamam on negatiivne, kuna savikarjäär asub allpool merepinda. Olgugi, et LiDARI punktipilv on äärmiselt täpsem teiste meetodite punktipilvest on näha väga minimaalset mahtude erinevust. Mõõdistatud ala peale, mis on 2,11 ha, on LiDARI andmete põhjal leitud maht 207 348,2 m³, fotogramm-meetria abil leitud maht 209 093,8 m³ ja RTK GPS meetodil leitud maht 208 181,8 m³ (Tabel 6). LiDAR mõõdistamisel leitud maht on fotogramm-meetrisest ligikaudu 1,7 tuhat m³ väiksem ehk 0,8%. Arvestades, et üle 200 000 m³ mõõtesuuruse väärtuse juures võib erinevus olla 3%, siis LiDAR mõõdistamise tulemus mahub väga hästi selle piiridesse ja selle võib lugeda tõseks. Veel väiksem erinevus on LiDAR-il GPS mõõdistamisega. Mahu suhteline erinevus tuleb kõigest 0,4%, mis on sisuliselt olematu. Märkimisväärseks teeb selle asjaolu see, et tegemist on suure alaga ja mahuga. Kui vaadata

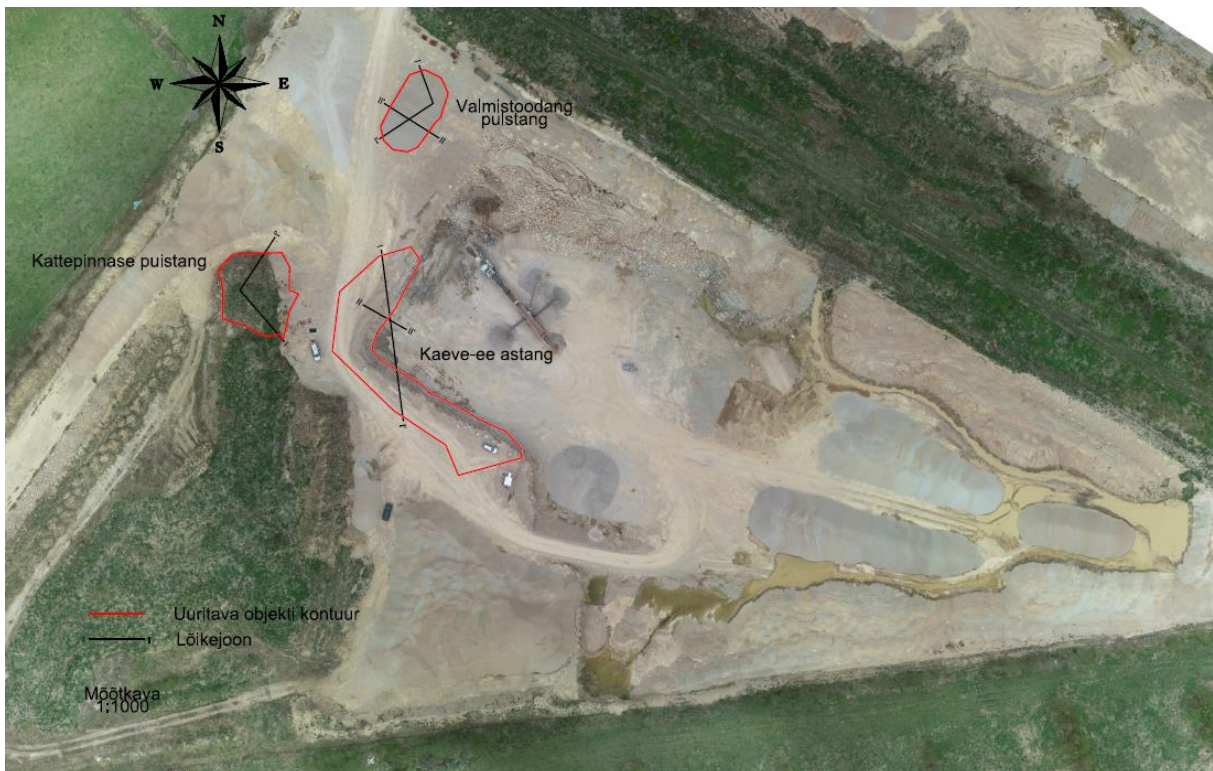
veel mõõdistatud punktide vahekorda, siis võib järeldada, et sel juhul ei oma detailsus suurt kaalu kui tulemused tulevad sisuliselt samad. Huvitav on veel see, et savikarjäär on kui kuumaastik, kus on künkad ja augud, mis eeldaksid endast suurt tööd RTK GPS-iga, et saavutada väga hea täpsus.

Parameetrid	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Maht, m ³	209 093,8	207 348,2	208 181,8
Maksimaalne kõrgus, abs m	-2,61	-2,65	-2,07
Minimaalne kõrgus, abs m	-14,08	-14,06	-13,11
Mahu suhteline erinevus, %	0,8		0,4

Tabel 6 Savikarjääri mõõdistusmeetodite parameetrite võrdlus

4.3 Lubjakivikarjääri mõõdistus

Välitöö teise objektina sai üles mõõdetud lubjakivikarjääri kaeve-ee, valmistoodangu puistang ja kattepinnase puistang. Välitöö toimus samal päeval savikarjääri mõõdistamisega. Situatsioon ja huvi pakkuvad objektid on näidatud all oleval joonisel (Joonis 9). Soov oli mõõdistada ka lõhatud lasu ala, kuna tegemist on väga korrapäratu reljeefiga, kuid samal ajal käis antud lõhatud lasu purustamine ja seda ei õnnestunud mõõdistada. Antud objekti jaoks sai RTK GPS-iga kogutud 127 mõõdistuspunkti ja fotogramm-meetria jaoks maha märgitud 5 tähist.



Joonis 10 Lubjakivikarjääri mõõdetud objektide situatsioon

Aeromõõdistamisega sai mõõdetud suurem ala kui ainult käsitletavad objektid ehk mudeleid sai kärbitud, et ei koormaks üle PowerCivil programmi. Punkt pilvede võrdluses on näha suuri erinevusi. LiDAR punkt pilv koosneb 310 064 punktist ja fotogramm-meetiline mudel 38 760 punktist (Tabel 7). Vahe on ligikaudu 8 kordne ehk LiDAR mudel on 8 korda detailsem ja tihedam. Tabelis 6 on näha ka teiste objektide jaoks kasutatud punkt pilve punktide arve. Kõik on võetud samadest mudelitest, aga lihtsalt kontuuri järgi välja sorteeritud. Valmistoodangu puhul on fotogramm-meetrisel mõõdistamisel olnud tegemist anomaalse alaga selle meetodi jaoks. Sellest lähemalt peatükis 4.3.2 Valmistoodangu puistang. Fotogramm-meetria ja LiDAR-i mudelite 3D pinnad on toodud lisades (LISA 5-6). RTK GPS pinda pole välja toodud, kuna antud karjääri puhul ei mõõdistatud tervet karjääri ala.

	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Punktide arv mudelis	38760	310064	127
Valmistoodangu puistang	715*	7206	21
Kattepinnase puistang	972	6098	44
Ee astang	2348	20561	48

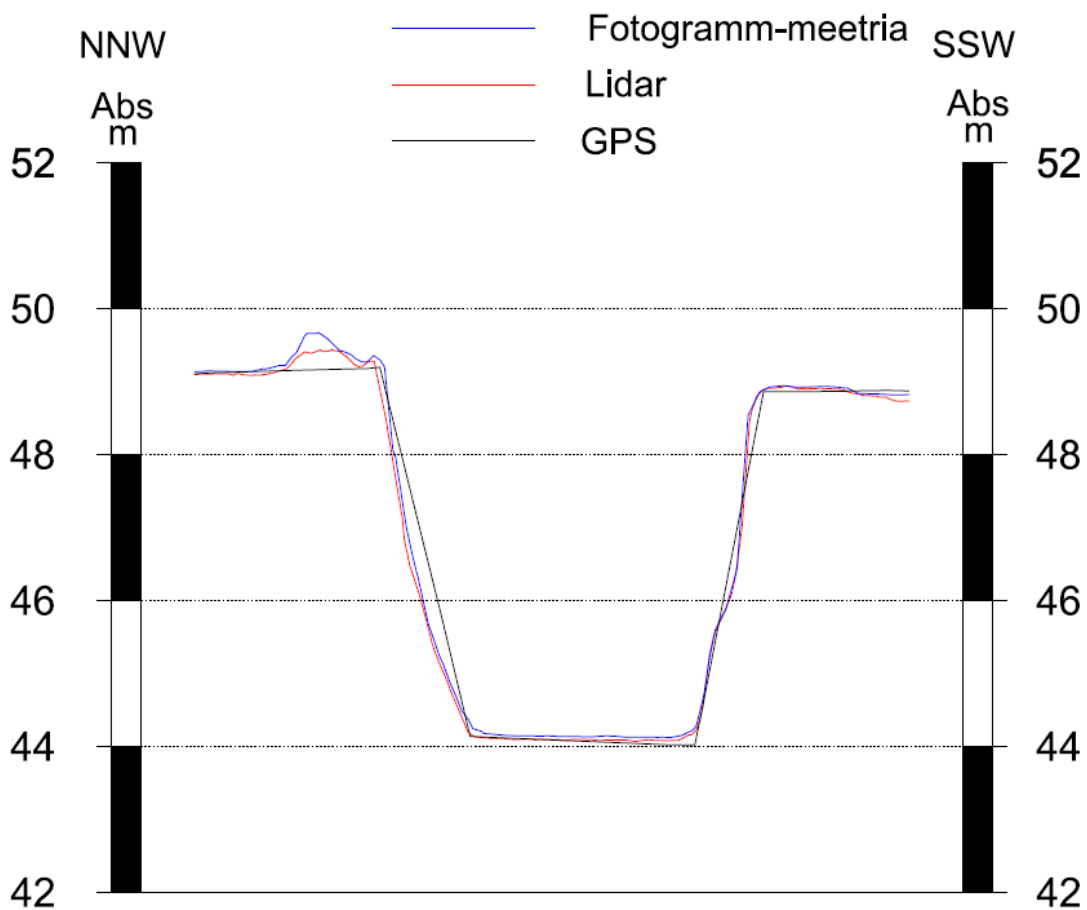
Tabel 7 Lubjakivikarjääri pinnamudelite punktide arvud

*pilve punktid on kaootiliselt

4.3.1 Lubjakivikarjääri EE

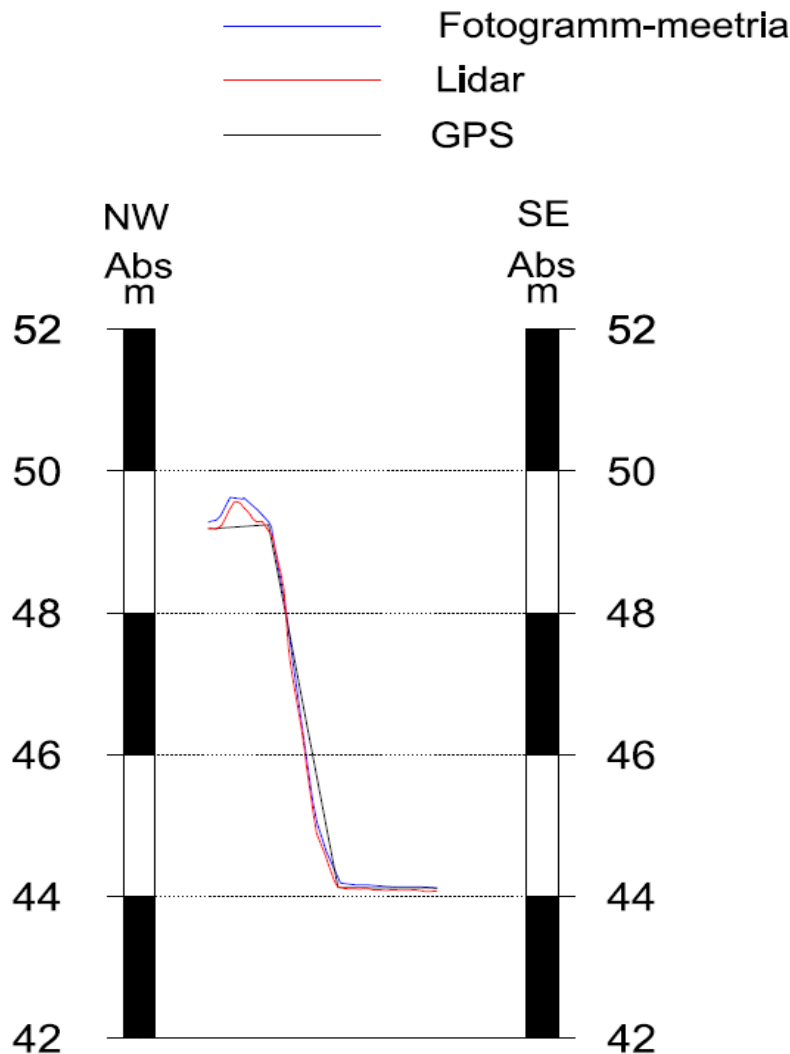
Valitud kaeve-ee astangust sai tehtud läbilõiked, et võrrelda selle välja joonistumist. Sellega on aga natuke keerulisem, kuna astangu alune on tavaliselt täis purustatud kivisodi ja täielikult astangu alumise ääreni on keeruline saada. Tava näeb RTK GPS mõõdistamisel ette seda, et hiljem tõstetakse astangu alumine serv ligikaudu 90 kraadi alla. Antud juhul ei ole seda rakendanud, kuna tahtsin luua võrdsed tingimused igale meetodile. Kui vaadata joonist 11 ja 12, on näha, kuidas alumine äär, mis on lubjakivi kaevist täis, moonutab kõigi lõikejoonte kujunemist. LiDAR-i ja fotogramm-meetria punkt pilved on suutnud tuvastada seina kulgemist ülevalt allapoole, kuni keskosani nii nagu realselt see astang välja näeb. Kuna kaevisehunnik on alumises otsas, siis on mõlema mudeli jooned joonistunud kaarjalt, mida see astangusein ei ole. RTK GPS annab välja sirge kalde, kuna GPS-iga pole võimalik vahepeale punkte genereerida. RTK GPS mudeliga on kerge lahendada seda olukorda kui alumine äär on kaevist täis, aga fotogramm-meetrisel mudelil ja LiDAR mudelil on äärmiselt raske muuta nende tuhandete punktide pärast.

Lubjakivikarjääri ee lõige I-I'



Joonis 11 Lubjakivikarjääri ee lõige I-I'

Lubjakivikarjääri ee lõige II-II'



Joonis 12 Lubjakivikarjääri astangu lõige II-II'

Astangu mahu jaoks on moodustatud kontuur, mille piires mahtu arvutatakse. Põhja jaoks on koostatud mudel kasutades RTK GPS moodsitatud punkte. Astangu pealt on leitud põhjamudeli punktid selle järgi, et astangu kõrgus on antud karjääris 5 m seega on maha lahutatud astangu pealsetest kõrguspunktidest astangu kõrgus. Tabelis 8 on näha, kuidas LiDAR-iga saadi mahuks 4100,9 m³, fotogramm-meetriaga 4237,7 m³ ja GPS moodsitamisega 3699,1 m³. LiDARi ja fotogramm-meetria mahtude vahe ei ole väga märkimisväärne, kõigest 3,3% erinevust ehk 136,8 m³. Selline protsent on sobilik ja on ka suure varuga, siis saab lugeda LiDARi mahu õigeks. Vahe mahtudel võib seletada sellega, et kui vaadata läbilõikejooni, siis fotogramm-meetria on astangu peal olevad kuhjad võtnud ligikaudu 0,4 m kõrgemalt kui LiDAR. Sellist vahet küll on raske seletada, kuna 0,4 m on väga suur erinevus. Vahe on ka märgatav maksimaalse kõrguse võrdlusel, kus LiDARi mudeli maksimaalne kõrgus on 0,49 m fotogramm-meetrisest mudelist madalamal. Tegemist võib olla peatükis 4.3.2 seletatud anomaaliaga. Väga suur vahe on LiDARil GPS tulemusega. Suhteline erinevus mahtude vahel on 10,9%,

mis ületab seadusest tuleneva lubatud piiri. Kui peaks võrdlema fotogramm-meetriat GPS-iga, siis oleks see protsent veel suurem. Suure vahe aitab tekitada kindlasti mõõdetud punktide vahe, kuna LiDARil on 428 korda rohkem punkte antud mudelis. Kõrguste vahe tuleb ka suuresti välja nii LiDARI ja fotogramm-meeria vahel kui ka LiDARI ja GPS mõõdistamise vahel. GPS mudeli kõige kõrgem punkt on 0,55 m madalamal LiDAR mudelist ja üle meetri madalamal fotogramm-meetriast. LiDAR-iga vahe on seletatav sellega, et GPS-iga ei mõõdistatud astangu peal olevaid väikseid kuhilaid. Üle meetrine vahe fotogramm-meetriaga aga ei ole seletatav. Kuna ligi poole meetrine vahe on ka LiDAR mudeli kõige kõrgema punktiga, siis see võib viidata liiga eredale pinnale, mis ajab mudelipunktid sassi. Kõige madalama punkti puhul on LiDAR ja fotogramm-meetria sisuliselt samad, kus LiDAR on tuvastanud punkti 0,05 m madalamale. Huvitav on see, et GPS punkt on kõige madalam kolmes, olles LiDAR-ist 0,18 m madalamal ja fotogramm-meetrisest mudelist 0,23 m madalamal.

Parameetrid	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Astangu maht, m ³	4237,7	4100,9	3699,1
Maksimaalne kõrgus, abs m	50,31	49,82	49,27
Minimaalne kõrgus, abs m	44,05	44,00	43,82
Mahu suhteline erinevus, %	3,3		10,9

Tabel 8 Lubjakivikarjääri astangu mahtude võrdlus

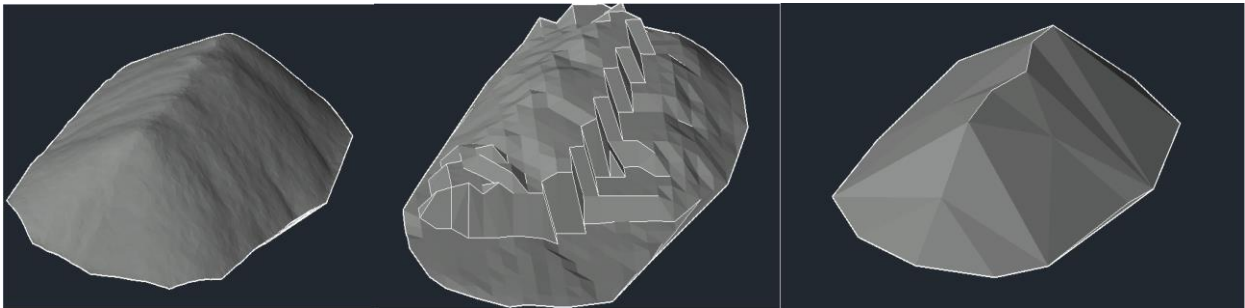
4.3.2 Valmistoodangu puistang

Valmistoodangu puistangute puhul tuli välja huvitav asjaolu. Nimelt on fotogramm-meetria meetodi üks suuri miinuseid mõõdistamisel väga valged ja eredad, tekstuurita või peegelduvad pinnad. Töödeldes Pix4Dmapper programmis lõpptulemit, tuli välja, et puistang mille olin valinud, ei olnud tuvastatud fotogramm-meetria poolt, kuna tundub, et on liiga ere või tekstuur on liiga sarnane (Joonis 12). Lähemal vaatlusel on näha ka kuidas kõrval asuvad puistangud on punktipilvest välja jäänud. Näitena võib ka välja tuua Vasalemma lubjakivikarjääri, kus ei saa mõõdistamiseks fotogramm-meetriat kasutada, kuna selle karjääri lubjakivi ja selle valmistoodangu puistangud on liiga eredad ehk tegemist on anomaalse objektiga. Lahendus oleks ehk peale vihma lennata, aga sellist välitööd on raske planeerida ja vihmaga ei saa näiteks Phantom 4 RTK droon opereerida. Kuna LiDAR ja GPS mõõdistused said edukalt lõpptulemi kätte, siis sai kasutatud usaldusväärsete võrdlustena neid. Fotogramm-meetria tulemuste andmed sai lisatud näitamaks kui väärad võivad tulemused tulla anomaaliatega puhul.



Joonis 13 Puuduv puistang ja punktipilv Pix4Dmapper töötlusprogrammis

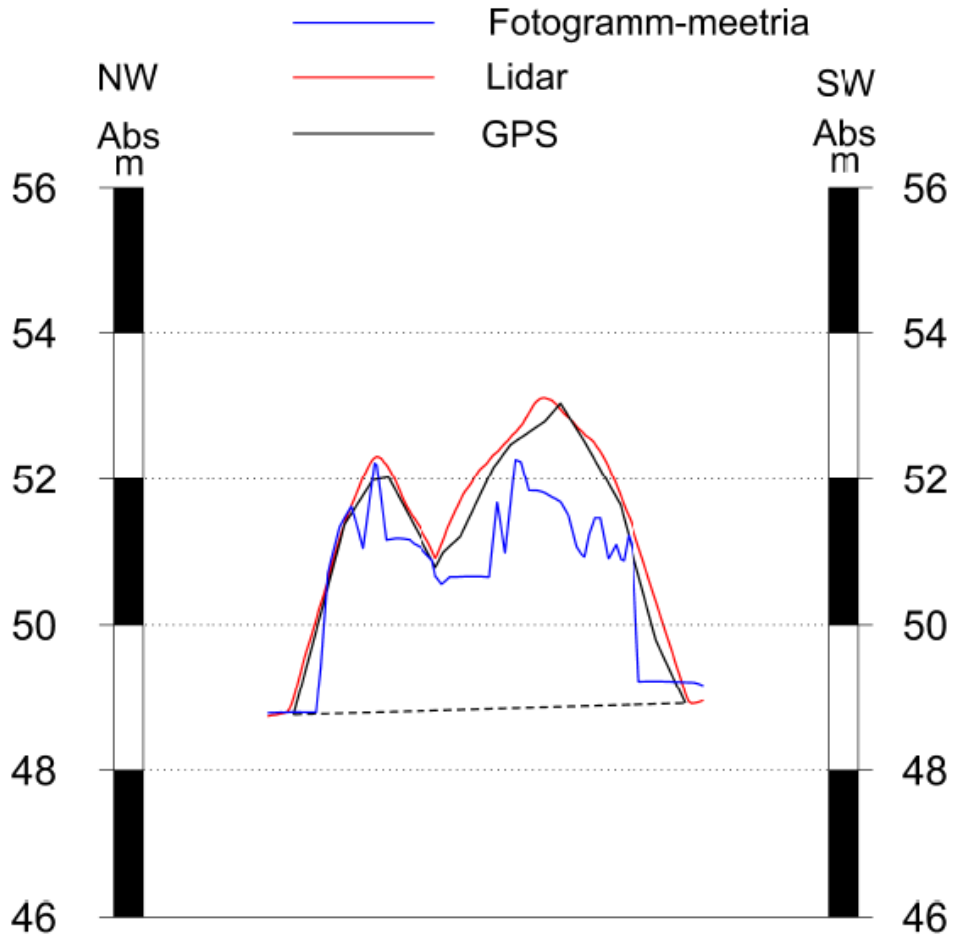
Joonisel 14 on näidatud võrdlus kolme meetodi vahel valitud puistangu puhul. Sellest võrdlusest tuleb väga hästi välja fotogramm-meetrilise moodsustamise anomaalia. Kuna töötlusprogramm annab välja isegi anomaalse koha pealt 0,75x 0,75 m XYZ võrgustiku, siis on sinna genereeritud väär situatsiooni tõlgendus. GPS ja LiDAR mudelid kujutavad siinkohal situatsiooni sarnaselt.



Joonis 14 Puistangute võrdlus. Vasakult LiDAR- Fotogramm-meetria- RTK GPS

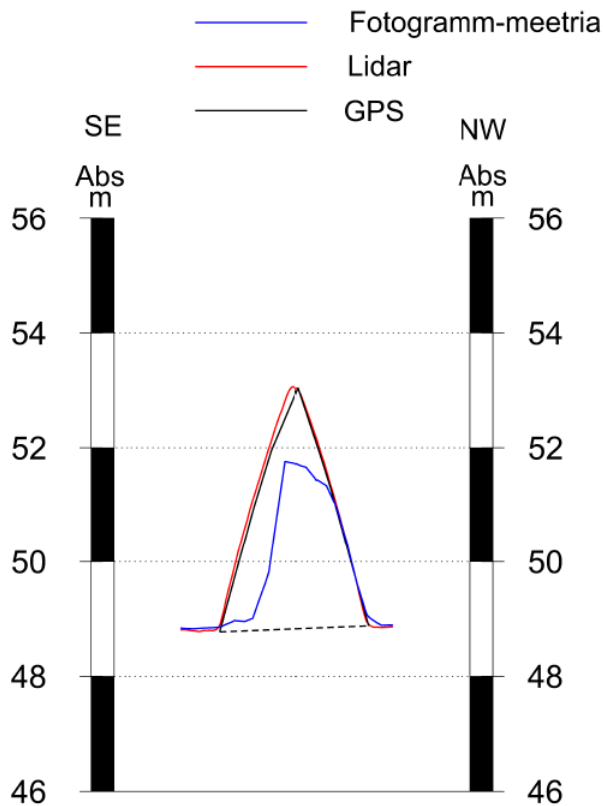
Puistangu mahtude arvutamiseks on moodustatud kontuurid ja nende kontuuride piires puistangutele põhjamudelid. Põhjamudelid on koostatud RTK GPS andmete põhjal. Nagu näha joonisel 15 ja 16, siis fotogramm-meetriline mudel ei kujuta mitte mingit moodi reaalselt situatsiooni. Lõikejoon on sakiline ja näitab, et kui see oleks reaalne situatsioon välitöö andmetega, siis tuleks uuesti mõtma minna, mis on jällegi aja ja ressursi kulu. RTK GPS mudel ja LiDAR mudel on mõlemad suutnud valmistoodangu reljeefi välja joonistada. Kui jällegi arvestada LiDARi punktipilve detailsust, siis sel juhul on punane joon kõige vastavam tegelikule situatsioonile. Kõige suurem vahe nende kahe mudeli vahel jääb ligikaudu 0,1 m juurde. Kuna RTK GPS pinnamudeli punktide arv on ligikaudu 138 korda väiksem, siis sellele toetudes võiks lugeda LiDAR mudelit täpsemaks.

Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu lõige I-I'



Joonis 15 Valmistoodangu puistangu lõige I-I'

Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu lõige II-II'



Joonis 16 Valmistoodangu lõige II-II'

Mahtude arvutamisel saadi kõige kolme meetodi mahud kätte, aga ei saa kasutada fotogramm-meetrilisel teel leitud mahtu punktipilves esineva anomaalia tõttu. LiDAR-iga leitud maht on 568,3 m³, fotogramm-meetriaga 396 m³ ja RTK GPS mõõdistamisega 515,6 m³ (Tabel 9). Kui vaadata LiDARi ja fotogramm-meetria vahet, siis on selgelt näha kuidas anomaalia võib muuta mahtu 43,5 % kui lugeda LiDAR maht õigeks. Ka maksimaalne kõrgus tundub viitavat sellele, et fotogramm-meetriline meetod on selle objekti puhul alt vedanud. Erinevus LiDAR andmetest on 0,73 m ja RTK GPS andmetest 0,61 m. Minimaalne kõrgus jääb isegi teistega samale pulgale, aga seda arvatavasti selle tõttu, et alumine kontuur tuli punktipilves ilusti välja. LiDAR mahu võrdluses RTK GPS-iga on näha jällegi suuremat suhtelise mahu erinevust kui on lubatud. Maht erineb 10,2 % ehk 52,7 m³ võrra, mis on napilt 0,2% võrra üle lubatud kordusmõõdistuse täpsuspiiri. Siinkohal võib arvata, et selline tulemus on tingitud GPS punktipilve punktide arvust, milleks on 21 punkti. LiDAR aga hiilgab 7206 punktiga, mis peaks tagama äärmiselt hea puistangu detailsuse, mida on ka lõigetelt näha. Maksimaalse kõrguse osas on GPS mudel 0,12 m madalamal, mis kindlasti aitab kaasa mahu vähenemisele. Huvitaval kombel on kõigi mudelite minimaalsed kõrgused sisuliselt samad.

Parameetrid	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Puistangu maht, m ³	396*	568,3	515,6

Parameetrid	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Maksimaalne kõrgus, abs m	52,44*	53,17	53,05
Minimaalne kõrgus, abs m	48,76*	48,77	48,76
Mahu suhteline erinevus, %	43,5*		10,2

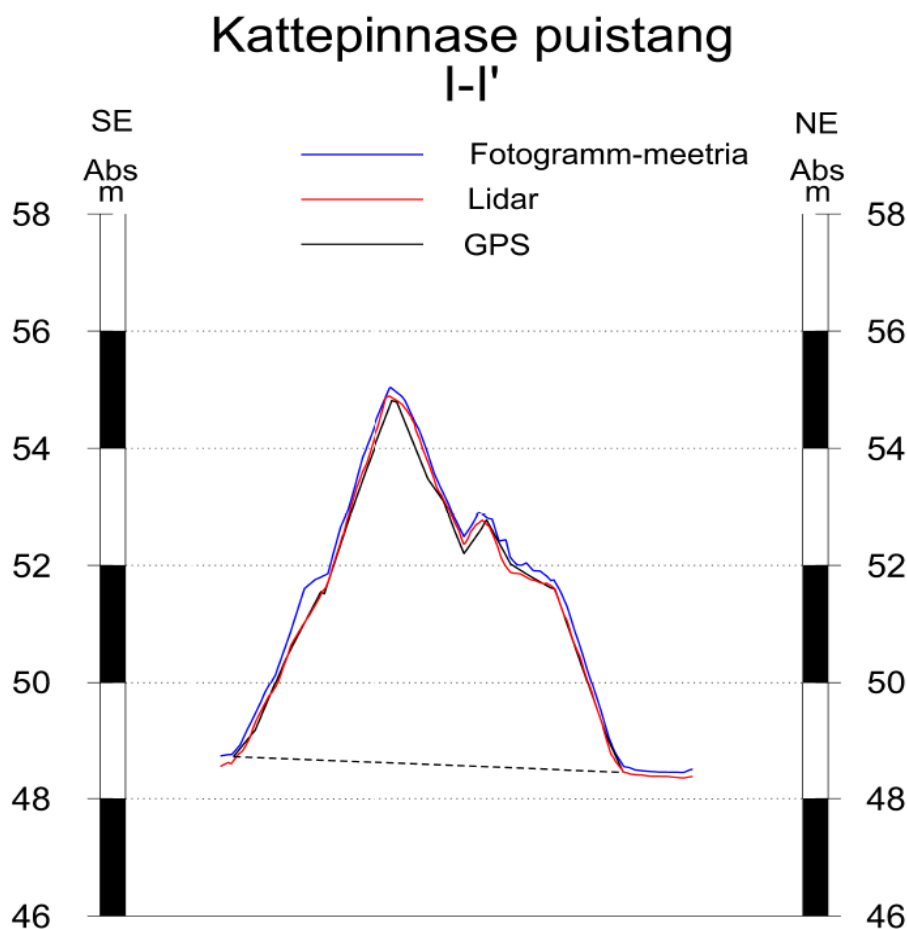
Tabel 9 Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu tulemuste võrdlus

* ei ole arvestatav ega pole usaldusväärne anomaalia tõttu

4.3.3 Kattepinnase puistang

Et näidata LiDAR seadme võimekust valisin analüüsi jaoks ka kattepinnase puistangu, mis oli kaetud võrsete ja orgaanikaga. Kuna seade saab ühe impulsiga kolm peegeldust, siis mingid punktid suudavad läbida taimestikku, et jõuda maapinnani. Kameraaltöö käigus eemaldatakse punktid, mis tuvastasid taimestiku osa ja jäetakse alles punktid, mis on jõudnud maapinnani. Nii saab kätte LiDARi abil ka reljeefi, mis on kaetud orgaanikaga. Joonisel 17 on selgelt näha fotogramm-meetria ja LiDARi vahet sellistes tingimustes mõõdistamisel. Fotogramm-meetrilise mudeli läbilõikejoon liigub terve lõike vältel ülevalpool LiDAR mudeli joont. Kui vaadata tabelit 10, siis maksimaalse kõrgus järgi võib järeldada, et fotogramm-meetrilise mõõdistamise mudel on ligikaudu 0,1 m kõrgemal LiDAR mudelist ehk umbes taimestiku võrra nihkes. Sama on näha ka kõige madalama punkti puhul. Seda arvestades on LiDAR seade tõestanud antud objekti puhul, et sellega saab mõõdistada pinda, mida võib olla fotogramm-meetria ei näe. Sellest tulenevalt on ka määruse "Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord" lisas 1 välja toodud punkt, et fotogramm-meetriaga ei tohi mõõdistada ala, mis on taimestikuga kaetud. LiDAR seadmega selline punkt pole vajalik.

Selle objekti puhul on ka GPS mõõdistamise tulemusel saadud kõrgusandmete poolest sarnased tulemused LiDAR-ile. Maksimaalse kõrguse vahe on kõigest 0,04 m madalamal LiDAR-ist. Vahet saab ehk seletada saua vajumisega pinnasesse. Minimaalse kõrguse osas jäävad LiDAR ja GPS mõõdistamine täpselt samale tasemele.



Joonis 17 Lubjakivikarjääri kattepinna puistangu lõige I-I'

Mahu arvutuses on jällegi näha, kuidas fotogramm-meetiline mudel on suurema mahuline, kuna on võtnud pinna kõrgemale tegelikust. LiDAR-iga on mahuks saadud 761,2 m³, fotogramm-meetrilise moodsustamisega 819,9 m³ ja RTK GPS-iga 729,3 m³. LiDARi ja fotogramm-meetria mahtude vahe on 7,7 %, mis on lähedal lubatud 10%-le, kuid siiski piirides. RTK GPS mudeliga võrreldes on LiDAR mahu tulemus tunduvalt suurem. Põhjuseks LiDARi punktipilve detailsus, kuna see on punktide arvu osas 138 korda suurem kui GPS mudel. Mahu suhteline erinevus, aga on väike, olles 4,4% juures. See jääb seadusest tuleneva piiri sisse ja tõestab LiDAR seadme täpsust, nii mahu arvutamisel kui ka võimes arvutada mahtu läbi taimestiku.

Parameetrid	Fotogramm-meetria	LiDAR	GPS
Puistangu maht, m ³	819,9	761,2	729,3
Maksimaalne kõrgus, abs m	55,49	55,38	55,34
Minimaalne kõrgus, abs m	48,93	48,82	48,83
Mahu suhteline erinevus, %	7,7		4,4

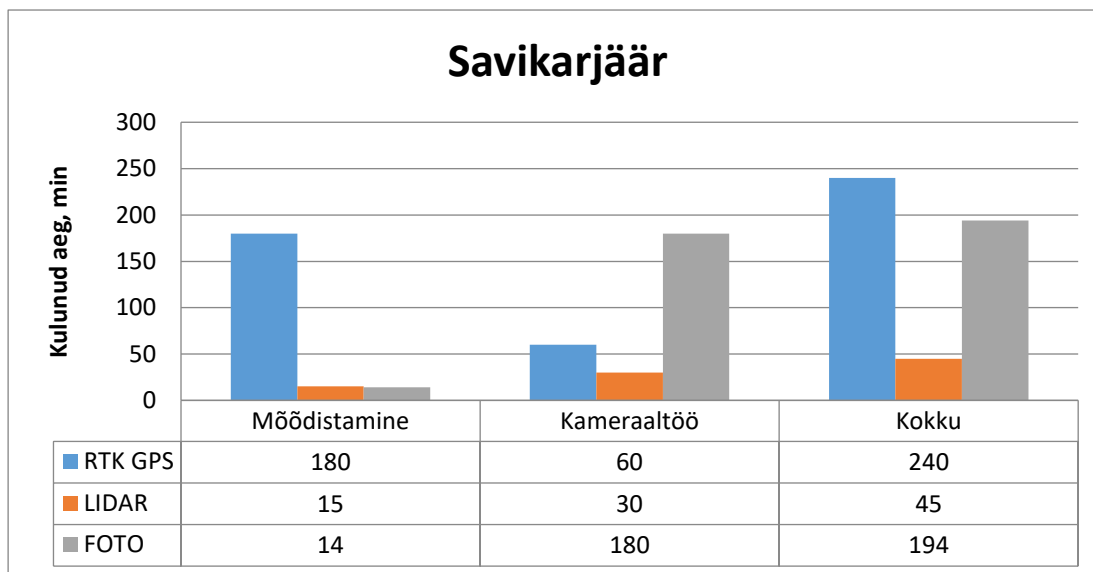
Tabel 10 Lubjakivikarjääri kattepinna puistangu tulemuste võrdlus

4.7 Ajakulu erinevus

Kuna kogu mäendusgeodeesia juures on ka oluline ajaline kulu, siis on töö käigus hinnatud kolme mõõdistusmeetodi ajaline erinevus. Ajaline erinevus on välja toodud savi karjääri kaeveala ja lubjakivikarjääri ee mõõdistamise puhul, kuna neil objektidel kasutati kõiki mõõdistusmeetodeid. Arvestatud on töö/lennu planeerimisega, mõõdistamise ajaga ja järeltötlusega, kuni DTM mudeli saamiseni. LiDAR drooni mõõdistamise ajakulu sisse on arvestatud ka LiDAR seadme soojenemisega.

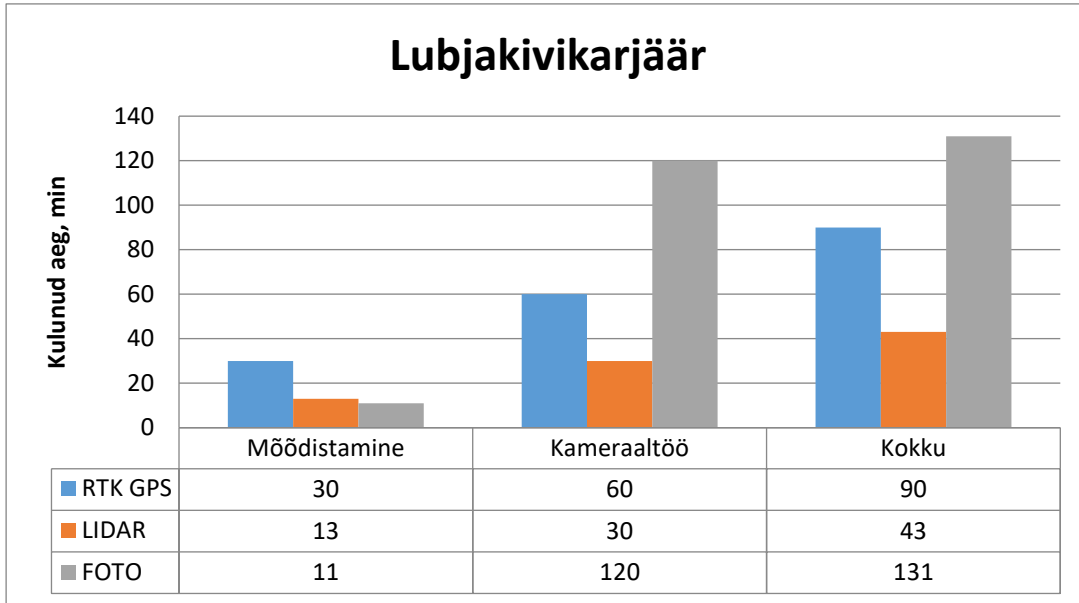
Savikarjääri mõõdistamise ajakulu on toodud joonisel 18. Kuna üles sai mõõdetud kogu kaeveala osa, siis on selgelt näha äärmiselt suurt erinevust droonilt mõõdistamiste ja RTK GPS mõõdistamise vahel. Kontaktmõõdistamise ajakulu on ligikaudu 12 korda suurem teistest meetoditest. Kui võtta LiDAR meetodi kogu ajakulu ja võrrelda seda kontaktmõõdistamise ajakuluga, siis LiDAR-iga on sama ajaga võimalik 4 korda droon lendu lasta, mõõdistada, mudeldada ning jõuda lõpptulemuseni. Selle objekti puhul on selgelt näha LiDAR seadmega mõõdistamise ajavõit, mis omab markseiderimõõdistamisel äärmiselt suurt tähtsust, eriti kuna täpsusklass jääb samasse vahemikku või on isegi parem.

Fotogramm-meetria ajakulu jääb nende meetodite võrdluses RTK GPS mõõdistamisega sama pulga peale. Ajaline kulu tuleneb fotogramm-meetria andmete töötlemisest kameraaltöö ajal, kuna töötamise aeg oleneb väga palju objekti suurusest ja antud juhul oli mõõdistatava objekti töö mahuliselt suurem kui näiteks töös käsitletav lubjakivikarjäär. Kuigi töötlust ei pea tegema inimene ise, vaid teeb seda arvuti, on arvestatud siiski ajakuluga, mis läheb selleks, et jõuda mudelini.



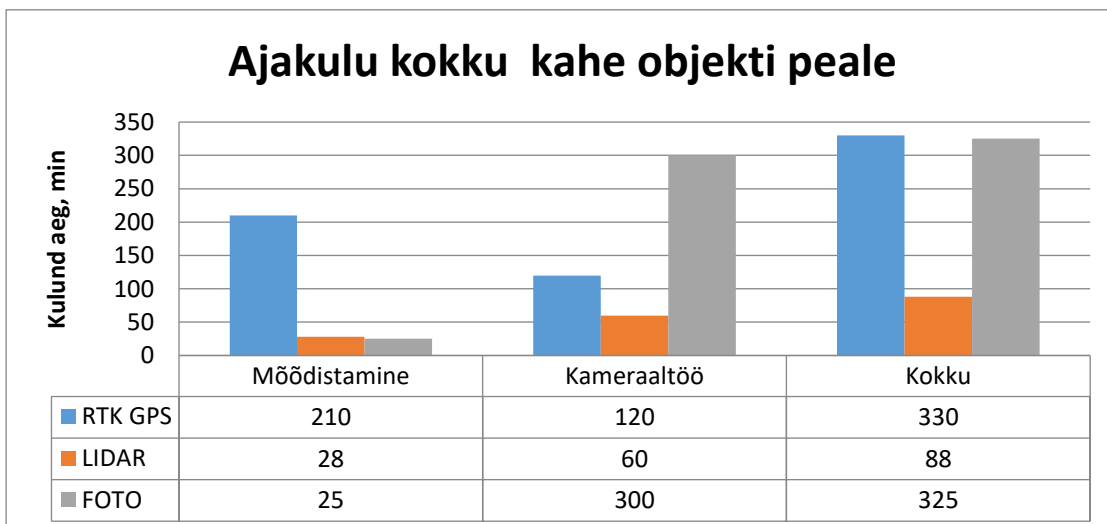
Joonis 18 Savikarjääri ajakulu kokkuvõte

Lubjakivikarjääri mõõdistamise ajakulu on toodud joonisel 19. Lubjakivikarjääri puhul jääb ajaliselt fotogramm-meetria teistest meetoditest pikalt maha ja seda jällegi kameraaltöö jaoks kuluva aja tõttu. Selle meetodi puhul on ja jääb ajaline kulu suureks töötamise osas, kuna kõik fotod tuleb orienteerida ja tähised tuvastada. LiDAR puhul jääb samaks ajaline kulu kameraaltööl, kuna vajalikud programmid DJI Terra ja TerraScan ei vaja pikka töötusaega. Tavapärase 30 minutit töötamiseks eeldab loomulikult ka programmi ja nende tehtavate sammude tundmist.



Joonis 19 Lubjakivikarjääri ajakulu kokku

Kokkuvõtvalt kahe objekti mõõdistamise ja kameraaltöö peale kulunud aja järgi on näha kuidas ajakulu on RTK GPS ja fotogramm-meetria meetoditel sarnased (Joonis 20). Kui RTK GPS mõõdistamise suure ajakulu põhjustab mõõdistamine, siis fotogramm-meetria puhul on suur ajakulu kameraaltöö taga, kuna töötlus on väga mahukas. Ajakulu on äärmiselt suure kaaluga markseideritöödel, mille tõttu on LiDAR-i tehnoloogia kasutamine siin suur võitja. Markseideritööd mahtude poolest käivad laineti ja tihti on näiteks aasta lõpus palju objekte, millega vaja tegeleda ja mida on vaja mõõdistada. Kui LiDAR-i kasutamine aitab antud uurimustöö põhjal vähendada ühe objekti ajakulu (mõõdistamine kuni DTM mudeli saamine) keskmiselt 73%, siis on tegemist äärmiselt märkimisväärse tulemusega, mille põhjal on LiDAR-i kasutamine väga kasulik.



Joonis 20 Kahe objekti mõõdistamise ajakulu kokkuvõte

4.8 Seadme tasuvus

Tooted või seaded võivad head olla, aga oluline osa selle juures on ka maksumus ja küsimus, et kas eelised, mis uuringu käigus tuvastati, aitavad seadme kasutamisel olla ettevõttele kasumlikumad kui teisi tehnoloogiaid kasutades. Hetkel on ühe objekti mõõdistamise ja kameraaltöötöö peale arvestatud ajaliselt 4 tööpäeva ehk 32 tundi, mis hõlmab ka protokoll ja plaani koostamist. Umbes pool sellest ajast on mõeldud välitöö ja töötluse peale, mida eelmises peatükis käsitleti. Kui võtta arvesse eelmise peatüki kahe objekti peale kulunud aja keskmine, siis LiDAR-i puhul kuluks välitööle ligikaudu 14 minutit ja kameraaltööle ligikaudu 30 minutit ehk kokku umbes 44 minutit. Siinkohal tuleks ka arvestada ajakuluga, mis läheb sõitmise peale. Enamus objektid on maksimaalselt 2 tunni kaugusel ehk edasi-tagasi oleks maksimaalselt 4 tundi. Kokku läheks LiDAR-it kasutades välitöö peale 4,25 h ja kameraaltöö peale 0,5 h. All järgnevas tabeli on arvatud ligikaudne LiDARi seadme ja drooni tasuvuse aeg ilma hinda tõstmata. Tunnihinna on võetud J. Viru Markseideribüroo leheküljelt (J. Viru Markseideribüroo, 2022). Kõik kuluv aeg on pandud ideaaltingimuste alusel, kus objektid kõik sujub ja ilmastik ei mängi rolli. Tabel on koostatud lihtsustatult ja ei hõlma kuluallikaid.

	DJI Matrice 300 RTK + Zenmuse L1
Maksumus, €	27 250
Välitöö tunnihind, €	55
Kameraaltöö tunnihind, €	52
Välitööle kuluv aeg, h	4,25
Kameraaltööle kuluv aeg, h*	16,5
Välitöö hind, €	234
Kameraaltöö hind, €	858
Töö maksumus kokku, €	1092
Kulunud aeg kokku, h	21
Kuu jooksul tehtavate objektide arv**	8
Kuus tehtavate tööde maksumus kokku, €	8736
Seadme maksumuse tagasiteenimiseks kuluv aeg kuudes	~3

Tabel 11 Seadme tasuvuse analüüs

*töötlus, mudeldamine, plaani koostamine ja protokoll

** võetud 2022 aasta keskmine tööpäevade arv kuus (21,25 päeva)

Arvestades kuu keskmist tööpäevade arvu, siis teisi meetodeid kasutades saaks sama ajaga teha umbes 5 objekti. Siinkohal tuleb muidugi mängu see, et kui aega kulub rohkem siis ka saab rohkem teenida, kuna töö käib tunnihinnaga, aga peab ka arvestama sellega, et on tähtis ka see, et tellija saab kätte oma andmed kiiresti ka täpselt. Peale selle saab LiDAR-it kasutades ka teha rohkem töid kuus jooksul, mis peaks anda kas rohkem käivet või olema samal tasemel teiste meetoditega. Seda kõike arvestades sellega, et hinda ei tõsteta. Drooni ja LiDAR seadme tagasimaksmiseks kulub tabeli põhjal ligikaudu kuud, mis on tehtav, aga väga optimistlik, kuna tabelis on kasutatud ideaaltingimusi töö tegemisel ja ei ole arvestatud kuludega.

5. LiDARi plussid ja miinused

Lähtudes eelnevast analüüsist võib välja tuua mitmeid LiDAR seadme eeliseid. Üks peamiseid plusse on väga väike ajakulu nii välitööl mõõdistamisel kui ka kameraaltööd tehes. Väga väikese ajaga on võimalik mõõdistada väga suur ala väga suure detailsusega. Seadet ei takista ka taimestik, kuna LiDAR suudab ühe lennuga tekitada kümneid miljoneid punkte, kust saab lõpuks kätte reljeefi. Peale selle võib LiDAR-iga mõõdistada nii pimedas, hämaras, suurem tuulega (kuni 15km/h), kerge vihmaga, eredaid objekte ning varjutatud objekte. Kõike seda, mida näiteks fotogramm-meetria ei võimalda.

Eelisenähtena tooksin ka välja LiDAR andmete mahu, millest tuleneb ka see, et neid andmeid on äärmiselt keeruline manipuleerida. Miljonid punktid valib seadme laserkiir mitte inimene ehk hiljem on väga keeruline seda kõike manipuleerida. Samas mahu osas on ka üks miinus, milleks on mudeli enda maht, mis ületab fotogramm-meetria ja RTK GPS mudelite mahtusid suurelt.

Kõige suuremaks plussiks tooksin LiDAR drooni võimekuse mõõdistada äärmiselt suuri alasid. Kui näiteks Phantom 4 RTK drooniga mõõdistaksin 60 ha ala akuvahetustega ehk ajakulu suureneb, siis LiDAR droon suudab selle ühe sõiduga ära mõõdistada.

LiDAR mõõdistamine teeb töö ka väga turvaliseks. Kuigi fotogramm-meetria on samuti turvaline, siis LiDAR-iga ei pea enam sõitma näiteks karjääri sisse, vaid saab alustada mõõdistusi karjääri äärest. Fotogramm-meetria jaoks peaks olema karjääris sees, kuna nii saab drooni sõiduaega pikendada, sest alguspunkt on karjääris.

Miinuseks saab tuua selle, et droon ise maksab palju ja LiDAR seade on samuti pigem kallima võitu, olgugi, et ajaga on LiDAR seadme maksumus väga kättesaadavaks muudetud. Peale selle koosneb LiDAR drooni komplekt mitmest transpordi kastist, mida võib olla tüütu transportida. Tehnoloogia nõuab ka võimekat arvutit, kuna andmestiku visualiseerimiseks tuleb arvutil läbi töötada miljoneid punkte.

6. Tulemuste kokkuvõte

Savikarjääri kaeveala mahu arvutamisel oli kahe kasutusel oleva meetodi erinevus LiDAR mõõdistamise tulemusest väga minimaalne. Fotogramm-meetriaga võrreldes oli vahe kõigest 0,8% ja RTK GPS-iga võrreldes 0,4%. Kui võtta nende kahe keskmine, siis LiDAR tulemus erineb olemasolevatest meetoditest kõigest 0,6%. Antud on objekti puhul selline tulemus ütleb seda, et LiDAR mõõdistamine on sama täpne kui olemasolevad meetodid. Tulemus on äärmiselt märkimisväärne arvestades kui suurt ja reljeefset ala käsitleti. Kõrguserinevuste poolest olid ka tulemused pigem positiivsed. LiDAR-i kõige kõrgem mudelipunkt oli -2,65 abs m kõrgusel. See on fotogramm-meetrisest mudelist kõigest 0,04 m kõrgemal ehk väga täpne tulemus. RTK GPS-iga võrreldes oli vahe 0,58 m võrra väiksem. See tulemus aga ei tõstata suurt küsimärki, kuna ala oli suur ja RTK GPS mõõdistamisega võib vahele jääda mõni kõrgem punkt, mida ei märka. Minimaalse kõrguse osas jäid fotogramm-meetriseline mudel ja LiDAR mudel sama pulga peale olles kõigest 0,02 m võrra nihkes. Suur vahe tuleb aga sisse RTK GPS tulemusega, mis on peaaegu meetri võrra kõrgemal. Antud tulemust on raske seletada, kuna ainuke koht, kust sai selline tulemus tulla, oli kaevatud sügavam auk veega, mille veepind sai üles mõõdistatud GPS-iga. LiDAR suudab küll läbi vee teatud lainepikkusega natuke penetreerida, aga fotogramm-meetriselise meetodiga see võimalik pole.

Lubjakivikarjääri puhul käsitletud kaeve-ee mahu arvutamise tulemused kõikusid rohkem kui arvata võis. LiDAR tulemuse suhtes erines RTK GPS maht 10,9% võrra, mis ületas seadusest tuleneva lubatud piiri. Põhjuseks arvatavasti LiDAR punkt pilv on GPS punkt pilvest 343 korda suurem ehk palju täpsem. Fotogramm-meetriaga võrreldes oli tulemus kõigest 3,3%, mis on väga hea tulemus. Kuna tundub, et GPS tulemus jäi selle taha, et oli palju vähem punkt, siis loeksin fotogramm-meetria tulemust arvestades LiDAR mõõdistamisel tulnud mahu väga täpseks. Kõrguserinevuste poolest olid sees suuremad erinevused kui algselt tundus. Fotogramm-meetria mudeli kõige kõrgem punkt oli LiDAR-ist peaaegu 0,5 m võrra kõrgemal. GPS kõige kõrgem punkt oli aga üle 0,5 m madalamal. GPS erinevus tuli sellest, et ei mõõdetud üles astangu ääres olevaid killustiku kuhjasid.

Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu mahu arvutamisel saadi kätte anomaalia, mida antud karjääris ei osanud oodata. Kuna fotogramm-meetriseline mõõdistamine on tundlik heledat või eredate pindade suhtes, siis valitud puistang oli kaootiliselt paiknevate mudelipunktidega, mille tulemus tuli hästi välja puistangu läbilõigete peal. RTK GPS mahu arvutamise tulemus erines LiDAR tulemusest 10,2%, mis jääb vaevu välja lubatud piirist. Siin tuleb taas arvestada punkt pilve arvu ja detailsusega. LiDAR annab äärmiselt rohkem välja pinnapunkte, mis joonistavad välja sisuliselt reaalse puistangu kuju samal ajal kui GPS mõõdistamisega võivad puistangu osad reljeefi osad välja jääda, kuna sinna pole punkte võetud. Kõrgusliku erinevuse poolest tuleb ka välja see, et GPS mudeli kõige kõrgem punkt on LiDAR-i kõrgeimast punktis 0,12 m madalamal. Kõige minimaalsema väärtusega punktid on sisuliselt samad.

Kattepinnase puistangu võrdlus tehti, et näidata LiDAR seadme võimekust võrreldes fotogramm-meetriaga. Mahtude poolest erines RTK GPS mõõdistamise tulemuse LiDAR-ist 4,4%, mis jääb lubatud vahemikku. Fotogramm-meetriselise mõõdistamise tulemus erines 7,7%. Protsentide vahe meetodite vahel tulenes sellest, et fotogramm-meetriseline mõõdistamine ei suuda läbida taimestatud ala. Seda näitas hästi läbilõige ja ka maksimaalse kõrguse erinevus, mis oli LiDAR-iga võrreldes 0,11 m kõrgemal

ehk taimestatud ala võrra. Maksimaalne kõrguse erinevus LiDAR-i ja GPS vahel oli kõigest 0,02 m, mis on väga täpne tulemus.

Kõigi tulemuste jaoks on koostatud tabel (LISA 1). Tabelis on välja toodud RTK GPS ja fotogramm-meetria keskmine mahu erinevus LiDAR tulemuste suhtes. RTK GPS mõõdistamise teel saadud mahtude keskmine erinevus LiDAR tulemuste suhtes on 6,5%, mis on suhteliselt positiivne tulemus. Fotogramm-meetrilise mõõdistamise teel saadud mahtude keskmine erinevus LiDAR-i suhtes on kõiges 3,9%.

7. Diskussioon

Tehnoloogia areng pakub pidevalt uusi lahendusi ja võimalusi olemasolevate meetodite parandamiseks või asendamiseks. Antud töös katsetati LiDAR seadet markšeideritöödel mahtude mõõdistamiseks ja tulemused olid positiivsed, kuna kokkuvõtvalt jäävad mahtude erinevused seadusest tulenevate täpsusnõuete piiridesse. Kõikumisi oli küll kõrguste erinevustes, aga võib järeldada, et mõõdistusala piirides need erinevused tasandusid. Raske on võrrelda osade objektide puhul RTK GPS mõõdistamisi LiDAR seadmega mõõdistamistega, kuna andmestik, mida on võimalik saada ei ole koguselt võrreldav laserskaneerimise teel saadud andmestikuga. Fotogramm-meetrilise mõõdistamisega on parem LiDAR-it võrrelda, sest mõlema puhul on tegemist aeromõõdistamisega ja andmestikud on mõlemal detailsed kuigi jällegi on LiDAR-i andmemaht mitmeid kordi sisukam kui fotogramm-meetrial.

Aerolaserskaneerimise täpsuse kahelda ei saa, kuna töö tulemusel on seda tõestatud ja saadav andmestik on väga täpne võrreldes objekti reaalse situatsiooniga. Kõige suurema väärtuse annab aga selline mõõdistamise viis ajaliselt. Kui vaadata kui palju aega kulub teistel meetoditel, näiteks fotogramm-meetrial mudelini jõudmiseks, siis LiDAR on selles suur võitja. Markšeideritöödel on ajaline kulu oluline, sest periooditi võib olla väga mitmeid objekte korraga, mida peab mõõdistama ja tulemusi andma. Eriti suure mõju annab LiDAR-i kasutamine mõõdistajale endale, kuna ei pea liikuma ringi karjäärides ja ronima puistangutel ehk risk on suuresti vähendatud. Fotogramm-meetria küll pakub sama, kuid nagu töös tõestati võib see meetod anda väärraid tulemusi, kuna osaliselt on sel teatud piirangud. Need piirangud on ka seaduses kirjas, mis ei luba näiteks mõõdistada fotogramm-meetriaga ala mis on taimestunud, kaetud veega, varjutatud või on ilma tekstuurita ning läikiv või läbipaistev objekt. LiDAR-il selliste piirangutega probleemi ei ole ja lubab nii palju rohkem objekte mõõdistada lihtsamalt ja kiiremini, säästes nii aega kui ka mõõdistajat.

Üks olulisimad punkte käsitletud tehnoloogia juures on see, et suur ja täpne andmestik jätab väikese võimaluse vigade tegemiseks. Väga palju on ette tulnud markšeideritööd pakkuvatel ettevõtetel vaidlusi tellijatega, kuna mahud ei sobi. Kui kunagi oli mahu määramisel väga suur roll mõõdistajal endal, sest tema valis punkte, siis tänaseks on jõudnud mäendusgeodeesia punkti, kus andmestik, mis kätte saadakse, on nii mahukas, et selle manipuleerimine on sisuliselt võimatu ja täpsus on sama või parem kui eelnevalt kasutusel olnud meetoditel. LiDAR tehnoloogia laialdasem kasutuselevõtt markšeideritööde teostamisel mahtude arvutamiseks peaks lõpetama vaidluste tekke ja need üldse välistama.

Käesolevas töös ei uuritud LiDAR drooni kasutamist erinevates ilmastikutingimustes. Edasistes uuringutes võiks käsitleda näiteks uduse ilmaga mõõdistamist, et kas LiDAR-i valgusimpulsid läbivad udukogu või peegeldavad osaliselt sellelt. Samamoodi oleks huvitav teada, millised on kerge vihmaga mõõdistamise tulemused. Kuna lumistes tingimustes ei ole markšeiderimõõdistamine võimalik või on raskendatud, siis oleks hea uurida, kuidas seda tehnoloogiat kasutades see võimalikuks teha.

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärk oli katsetada LiDAR seade markseideritöödel mahtude mõõdistamiseks. Mõõdistamised tehti kahe erineva karjääri alusel, kus analüüsi alla võeti savikarjääri terve kaeveala, lubjakarjääri kaeve-ee astang, valmistoodangu puistang ja kasvupinnase puistang. Töö käigus koostati digitaalsed pinnamudelid RTK GPS mõõdistuse andmete alusel, fotogramm-meetrilise aeromõõdistamise tulemuste alusel ja LiDAR-i aerolaserskaneerimise alusel. Mudelite abil arvatati lõputöös valitud objektide mahud ja võrreldi nende erinevusi seadusandlusest tulenevate piiride alusel.

Savikarjääri kaeveala mahu arvutamisel oli kahe kasutusel oleva meetodi erinevus LiDAR mõõdistamise tulemusest väga minimaalne. Fotogramm-meetriaga võrreldes oli vahe kõigest 0,8% ja RTK GPS-iga võrreldes 0,4%. Kui võtta nende kahe keskmine, siis LiDAR tulemus erineb olemasolevatest meetoditest kõigest 0,6 %. Kõrguserinevuste poolest olid tulemused pigem positiivsed. LiDAR-i kõige kõrgem mudelipunkt oli -2,65 abs m kõrgusel. See on fotogramm-meetrisest mudelist kõigest 0,04 m kõrgemal seega väga täpne tulemus. RTK GPS-iga võrreldes oli vahe 0,58 m võrra väiksem.

Lubjakivikarjääri puhul käsitletud kaeve-ee mahu arvutamise tulemused kõikusid rohkem kui oleks osanud oodata. LiDAR-i tulemuse suhtes erines RTK GPS maht 10,9% võrra, mis ületas seadusest tuleneva lubatud piiri. Põhjus arvatavasti tulenes sellest, et LiDAR punktipilv on GPS punktipilvest punktide arvu poolest 343 korda suurem. Fotogramm-meetriaga võrreldes oli tulemus kõigest 3,3%, mis jääb lubatud piiridesse. Fotogramm-meetria mudeli kõige kõrgem punkt oli LiDAR-ist peaaegu 0,5 m võrra kõrgemal. GPS kõige kõrgem punkt oli aga üle 0,5 m madalamal. GPS erinevus tulenes sellest, et ei mõõdetud üles astangu ääres olevaid killustiku kuhjasid.

Lubjakivikarjääri valmistoodangu puistangu mahu arvutamisel saadi kätte anomaalia, mida antud karjääris ei osanud oodata. Kuna fotogramm-meetiline mõõdistamine on tundlik heledate või eredate pindade suhtes, siis valitud puistang oli kaootiliselt paiknevate mudelipunktidega. Anomaalia tuli samuti välja puistangu läbilõigete peal ning selle tulemust arvestada ei saanud. RTK GPS mahu arvutamise tulemus erines LiDAR tulemusest 10,2 %, mis jääb vaevu välja lubatud piirist. GPS mudeli kõige kõrgem punkt on LiDAR-i kõrgeimast punktis 0,12 m madalamal. Kõige minimaalsema väärtusega punktid on sisuliselt samad.

Kattepinnase puistangu võrdlus tehti, et näidata LiDAR seadme võimekust võrreldes fotogramm-meetriaga. Mahtude poolest erines RTK GPS mõõdistamise tulemuse LiDAR-ist 4,4%, mis jääb lubatud vahemikku. Fotogramm-meetriselise mõõdistamise tulemus erines 7,7%. Protsentide vahe meetodite vahel tulenes sellest, et fotogramm-meetiline mõõdistamine ei suuda läbida taimestatud ala.

Kokkuvõtvalt on RTK GPS mõõdistamise teel saadud mahtude keskmine erinevus LiDAR tulemuste suhtes 6,5%, mis on suhteliselt positiivne tulemus. Fotogramm-meetriselise mõõdistamise teel saadud mahtude keskmine erinevus LiDAR-i suhtes on kõiges 3,9%.

Arvestades töös saavutatud tulemusi võib öelda, et LiDAR tehnoloogia kasutamine mäendusvaldkonnas mahtude arvutamiseks on äärmiselt sobilik. Kõige positiivsema tulemuse andis ajakulu erinevus teiste meetoditega võrreldes. LiDAR-i kasutamise on võimalik ligikaudu 73% kiiremini jõuda mudeli valmimiseni.

Tänuavaldused

Käesoleva töö teostamiseks olen saanud abi nii J. Viru Markšeideribüroolt, Geosoft-ilt ja muidugi juhendajalt Sander Kanter. Tänu J. Viru Markšeideribüroole sain kasutada kontaktmõõdistamiseks vajalikku Trimble R-20-t ja fotogramm-meetria jaoks DJI Phantom 4 RTK drooni. Geosoft võimaldas algselt Zenmuse L1 ja DJI Matrice 300 RTK drooni kasutamist, hiljem oli sama seade markšeideribürool endal olemas. Sooviksin tänada ka Jürgen Aluojat, kes abistas mind uue tehnoloogia käsitlemisel.

Kirjanduse loetelu

- 1) Mehendale, N. ja Neoge, S. (2020). Review on LiDAR Technology.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3604309>
- 2) Männamets, H. (2015). *Droonilt mõõdistamise kasutamise võimalikkus markšneideritöödel* [Magistritöö]. Tallinna Tehnikaülikool, Mäeinstituut
- 3) Markšneiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord (18.08.2020). *Riigi Teataja*.
<https://www.riigiteataja.ee/akt/107052019005?leiaKehtiv>
- 4) Wang, X., Pan, H., Guo, K., Yang, X. ja Luo, S. (2020). The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 502 012008
- 5) Acroname. The history of LiDAR. (2020). Kasutatud 26.04.2022,
<https://acroname.com/blog/history-lidar>
- 6) Laser (2022, aprill 24). Vikipeedia. <https://et.wikipedia.org/wiki/Laser>
- 7) Jelínková, H. ja Šulc J. (2013). Laser characteristics. Jelínková, H. (toim), Lasers for medical applications (lk 17–49). Woodhead kirjastus.
<https://doi.org/10.1533/9780857097545.1.17>.
- 8) Siriba, D. , Matara, S. ja Musyoka, S. (2015). Improvement of volume estimation of stockpile of earthworks using a concave hull-footprint. *Micro, Macro & Mezzo Geo Information*. nr 5. 1857–9019.

https://www.researchgate.net/publication/287196050_Improvement_of_volume_estimation_of_stockpile_of_earthworks_using_a_concave_hull-footprint
- 9) DEM, DSM & DTM: Digital elevation model – Why it's important.
<https://geodetics.com/dem-dsm-dtm-digital-elevation-models/>
- 10) Llamas, G. H. (2022). Elevation Modeling - the differences between DTM, DSM & DEM. *Plex Earth*. <https://support.plexearth.com/hc/en-us/articles/4642425453201-Elevation-Modeling-the-differences-between-DTM-DSM-DEM>
- 11) DJI. Zenmuse - L1 (2022). Kasutatud 24.04 2022, <https://www.dji.com/ee/zenmuse-1>
- 12) DJI. DJI Matrice 300 RTK (2022). Kasutatud 24.04 2022,
<https://www.dji.com/ee/matrice-300>
- 13) DJI. Terra (2022). Kasutatud 24.04.2022, <https://www.dji.com/ee/dji-terra>

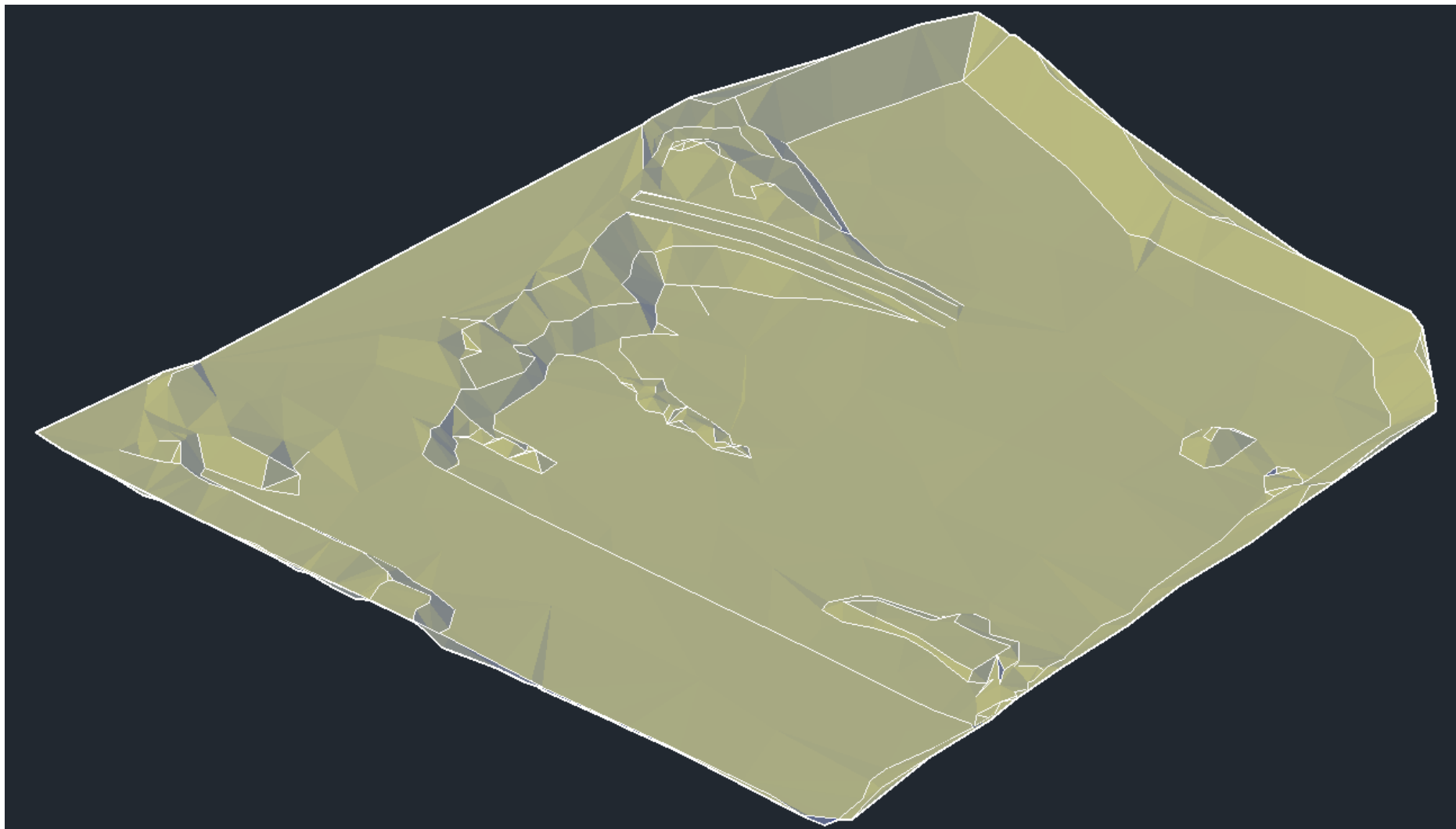
- 14) Terrasolid. Terrascan (2022). Kasutatud 24.04.2022, <https://terrasolid.com/products/terrascan/>
- 15) Pix4d. Pix4Dmapper (2022). Kasutatud 24.04.2022, <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software>
- 16) Roadsbridges. Bentley Powercivil (2022). Kasutatud 24.04.2022, <https://www.roadsbridges.com/bentley-powercivil>
- 17) Ali, A. S. (2001). Stadia Tacheometry with Electronic Theodolites. *Journal of King Saud University - Engineering Science*, 13(1), lk 25-36. [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30723-2](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30723-2)
- 18) Landau, H., Vollath, U. ja Chen, X. (2002). Virtual reference station systems. *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2), lk 137-143. https://www.researchgate.net/publication/242082075_Virtual_Reference_Station_Systems
- 19) Maa-amet. GNSS püsijaamade võrk(2022). Kasutatud 17.05.2022, <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Geodeetilised-vorgud/GNSS-pusijaamade-vork-p571.html>
- 20) Feng, Y. ja Wang, J. (2008). GPS RTK performance characteristics and analysis. *Journal of Global Positioning Systems*, 7(1). https://www.researchgate.net/publication/41202035_GPS_RTK_Performance_Characteristics_and_Analysis
- 21) Photogrammetry (2022, 10 mai). Vikipeedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>
- 22) Chekole, S. D. (2014). *Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner a: comparative study* [Magistritöö]. School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology
- 23) European union agency for the space programme (EUSPA) (2021). *What is GNSS*. Kasutatud 05.05.2022, <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>
- 24) Kirs, E. (2017). *Eesti GNSS võrkude täpsuse hindamine* [Bakalaureusetöö]. Eesti Maaülikool, Metsandus- ja maaehitusinstituut
- 25) Jürgens, J., B (2015). *Erinevate meetoditega loodud ortofotomosaiikide täpsus mehitamata lennuki must Q aerofotode näitel* [Magistritöö]. Eesti Maaülikool, Metsandus- ja maaehitusinstituut

- 26) Pike, J. (2000, veebruar 22). *AN/GVS-5 Laser Rangefinder*. Military analysis Network. <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/an-gvs-5.htm>
- 27) Bimplus (2020 juuli 6). *How do robotic total stations work?* <https://www.bimplus.co.uk/how-do-robotic-total-stations-work/>
- 28) Geosoft. Trimble R10 (2022). Kasutatud 16.05.2022. <https://geosoft.ee/trimble-r10/>
- 29) SCCS. Leica FlexLine TS06plus Total Station (2022). Kasutatud 16.05.2022. <https://www.sccsurvey.co.uk/leica-flexline-ts06plus-total-station.html>
- 30) Llamas, H., G. (2022). *Elevation Modeling - the differences between DTM, DSM & DEM*. Plex Earth. <https://support.plexearth.com/hc/en-us/articles/4642425453201-Elevation-Modeling-the-differences-between-DTM-DSM-DEM>
- 31) Geosoft. Phantom 4 RTK (2022). Kasutatud 16.05.2022. <https://uas.ee/phantom-4-rtk/>
- 32) Trimble (2022). *Trimble R10 GNSS system (brošüür)*. https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-625158/022543-544K_TrimbleR10_DS_4pg_USL_1219_LRsec.pdf
- 33) DJI (2021). *Zenmuse L1 manuaal*. https://dl.djicdn.com/downloads/Zenmuse_L1/20210518/Zenmuse_L1%20User%20Manual_EN_1.pdf
- 34) DJI (2020). *Phantom 4 RTK manuaal*. https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_rtk/20200721/Phantom_4_RTK_User_Manual_v2.4_EN.pdf
- 35) Droon. *Mis on RTK ja mis droonile juurde annab* (2022). https://droon.ee/mis-on-rtk-ja-mis-see-droonile-juurde-annab/?fbclid=IwAR2QI-14KPRGs_peAXEMmHTELRYOWEdJjkcerXkXHoI-OpmVVjsqOIM7o0
- 36) J. Viru Markseideribüroo. Tellimine. Kasutatud 28.06.2022. <https://vmb.ee/hinnakiri-2/#1468865408403-06554d00-d3e3>

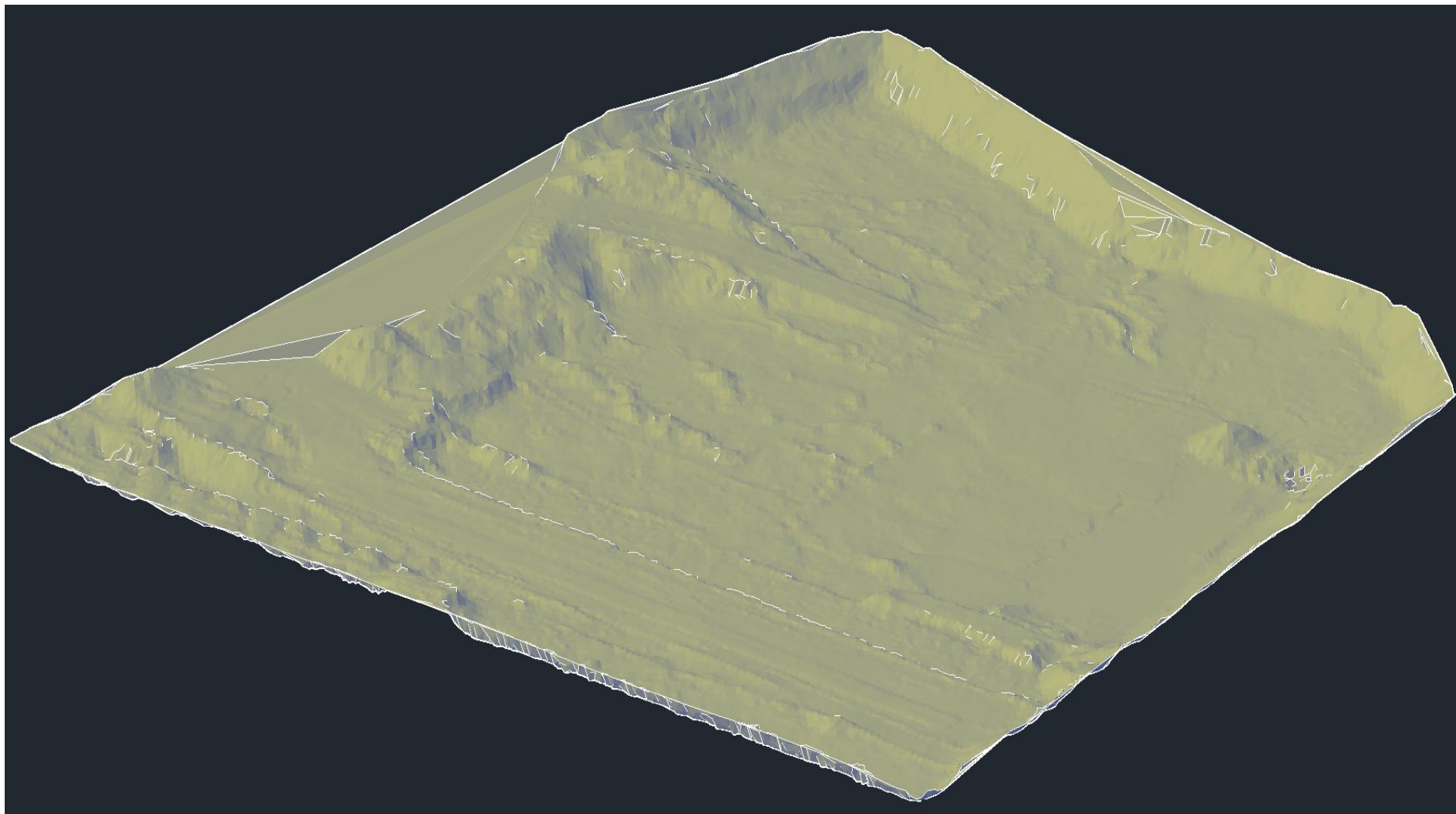
Lisa 1. Mõõdistamise tulemuste kokkuvõtlik tabel

		Savikarjäär	Lubjakivikarjäär			Keskmine mahu erinevus, %
		Kogu kaeveala	Kaeve- esi	Valmistoodangu puistang	Kattepinnase puistang	
RTK GPS	Puistangu maht, m ³	208 181,8	3699,1	515,6	729,3	6,5
	Maksimaalne kõrgus, abs m	-2,07	49,27	53,05	55,34	
	Minimaalne kõrgus, abs m	-13,11	43,82	48,76	48,83	
	Mahu suhteline erinevus, %	0,4	10,9	10,2	4,4	
LIDAR	Puistangu maht, m ³	207 348,2	4100,9	568,3	761,2	
	Maksimaalne kõrgus, abs m	-2,65	49,82	53,17	55,38	
	Minimaalne kõrgus, abs m	-14,06	44,00	48,77	48,82	
Fotogramm-meetria	Puistangu maht, m ³	209 093,8	4237,7	396*	819,9	3,9
	Maksimaalne kõrgus, abs m	-2,61	50,31	52,44*	55,49	
	Minimaalne kõrgus, abs m	-14,08	44,05	48,76*	48,93	
	Mahu suhteline erinevus, %	0,8	3,3	43,5*	7,7	

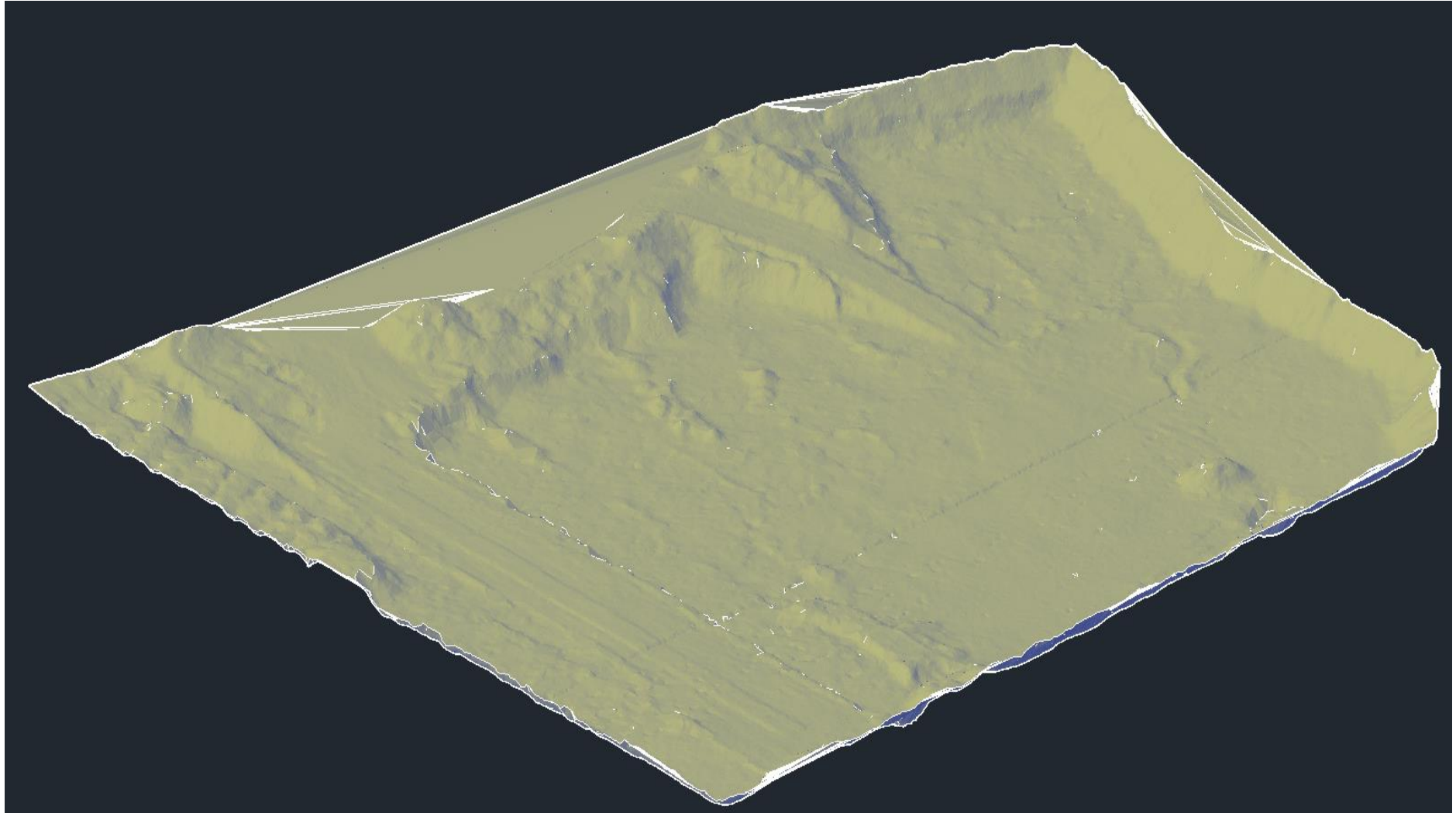
LISA 2. Savikarjääri RTK mudel



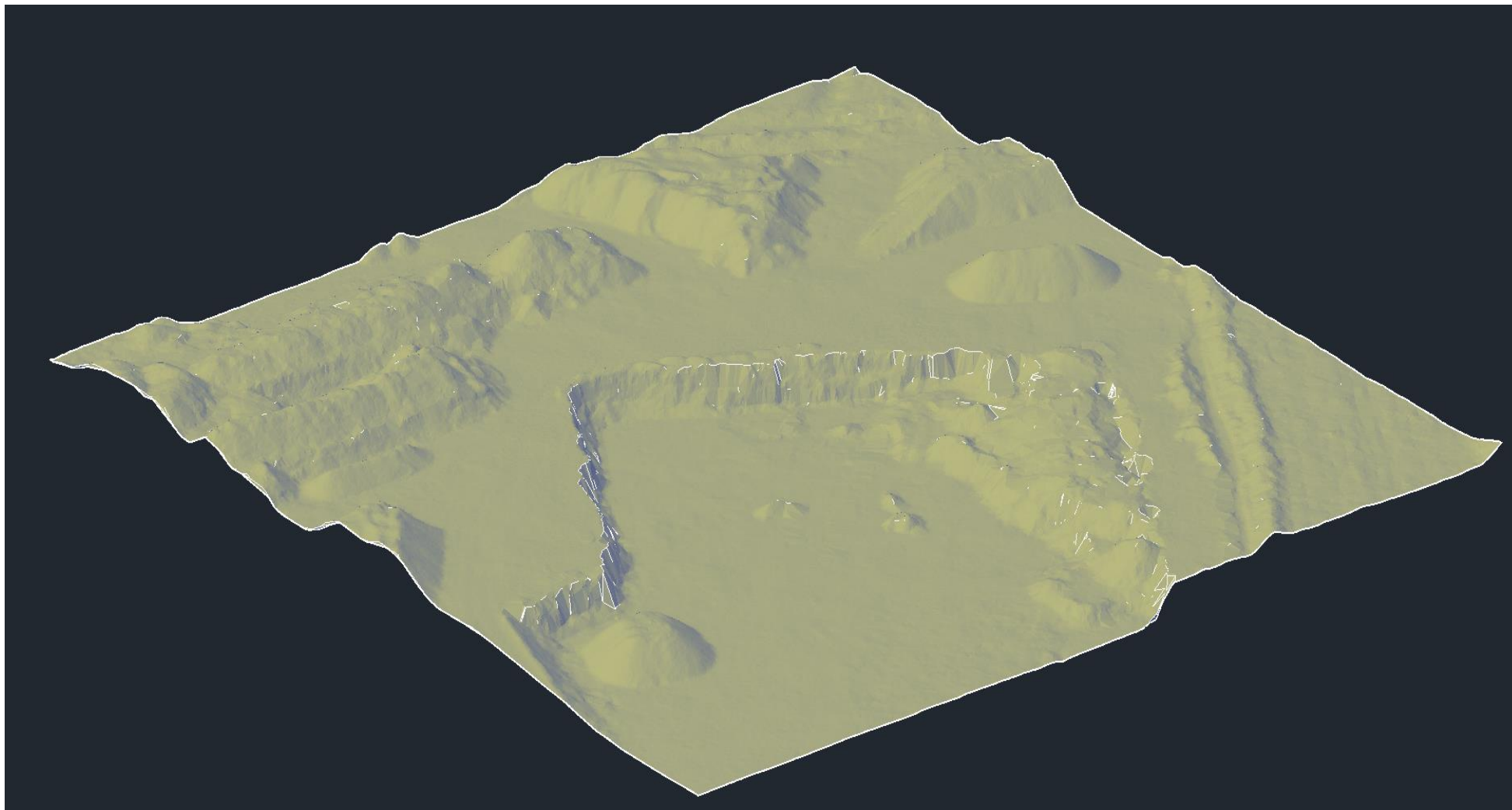
LISA 3. Savikarjääri fotogramm-meetriline mudel



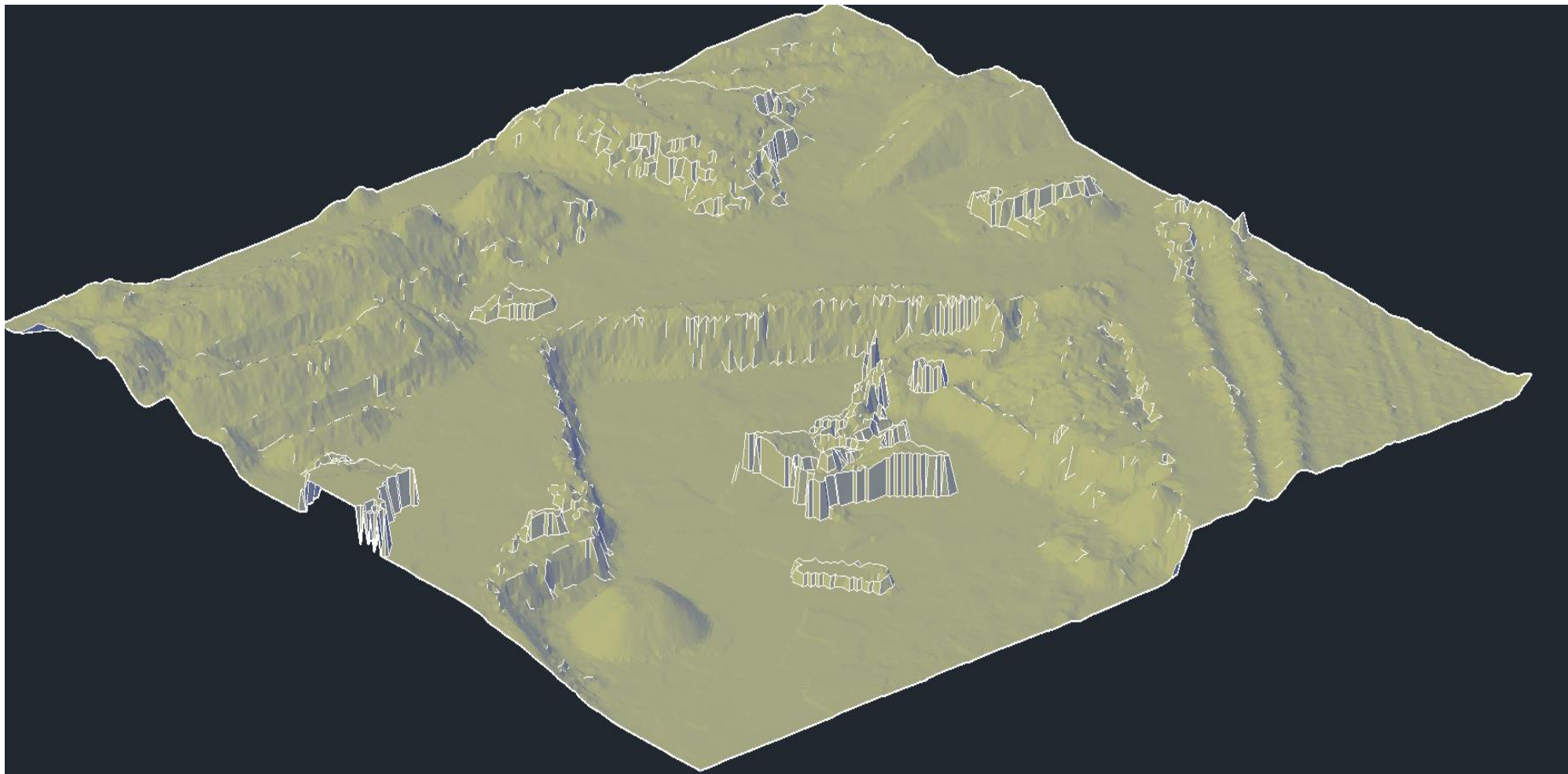
LISA 4. Savikarjääri LiDAR mudel



LISA 5. Lubjakivikarjääri LiDAR mudel



LISA 6. Lubjakivikarjääri fotogramm-meetiline mudel



Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks

Mina Tauri Põldema (sünnikuupäev: 25.11.1997)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Aerolaserskaneerimine mehitamata õhusõidukilt markšneideritöödel mahtude mõõdistamiseks”

mille juhendaja on: Sander Kanter

reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Allkirjastatud digitaalselt 28.05.2022

allkiri

kuupäev