

Tallinna Tehnikaülikool

Energeetikateaduskond

Mäeinstituut



Helen Männamets, 122105

Magistritöö, AKG70LT

# **DROONILT MÕÕDISTAMISE KASUTAMISE VÕIMALIKKUS MARKŠEIDERITÖÖDEL**

ID 2589

Juhendaja:

Enn Lüütre, doktorikraad

Tallinn 2015

## Sisukord

Tudengitöö ülesanne .....	5
Abstract .....	6
Sissejuhatus .....	7
1. Metoodika.....	9
1.1 Seadusandlus .....	9
1.1.1 Täpsusnõuded.....	10
1.2 Mõõdistamismeetodid .....	11
1.2.1 Kontaktmõõdistamine .....	12
1.2.2 Kaugseireline mõõdistamine .....	14
1.3 Kasutatud tarkvarad.....	17
1.4 Pinnamudelid.....	18
1.5 Mudelite võrdlus .....	18
2. Droonilt mõõdistamise andmete analüüs .....	20
2.1 Puistangute mõõdistus.....	20
2.1.1 Puistang 1 .....	22
2.1.2 Puistang 2 .....	25
2.1.3 Puistang 3 .....	28
2.1.4 Puistang 4 .....	30
2.1.5 Puistang 5 .....	32
2.1.6 Puistang 6 .....	34
2.1.7 Puistangud 7 ja 8 .....	35
2.1.8 Puistangute mõõdistusandmete kokkuvõte .....	37
2.2 Liivakarjääri mõõdistus.....	39
2.3 Lubjakivikarjääri mõõdistus.....	46
2.4 Andmete manipuleeritavus.....	52
2.5 Drooni eelised ja puudused .....	53
2.6 Tulemused .....	54
3. Diskussioon .....	56
Kokkuvõte .....	58
Kasutatud allikad.....	61
LISA 1. Droon eBee.....	64

## Tabelid

Tabel 1 Instrumentaalmõõdistuse minimaalne sagedus [4] .....	10
Tabel 2 Lubatud suhteline erinevus [6].....	11
Tabel 3 Puistangu 1 mudelite võrdlus .....	24
Tabel 4 Puistangu 2 mudelite võrdlus .....	27
Tabel 5 Puistangu 3 mudelite võrdlus .....	29
Tabel 6 Puistangu 4 mudelite võrdlus .....	31
Tabel 7 Puistangu 5 mudelite võrdlus .....	33
Tabel 8 Puistangu 6 mudelite võrdlus .....	34
Tabel 9 Puistangu 7 ja 8 mudelite võrdlus .....	35
Tabel 10 Puistangute mudelite erinevusi kokkuvõttev tabel.....	38
Tabel 11 Liivakarjääri mudelite võrdlus .....	42
Tabel 12 Lubjakivikarjääri mudelite võrdlus .....	49

## Joonised

Joonis 1 Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaamade võrk [17]. .....	14
Joonis 2 Aerofotogramm-meetria tööpõhimõtte [23].....	16
Joonis 3 Puistangute mõõdistus.....	20
Joonis 4 Puistangu 1 kolmnurgad GPS-mudelil .....	22
Joonis 5 Puistangu 1 kolmnurgad droonimudelil .....	22
Joonis 6 Puistangu 1 läbilõike asukoht .....	23
Joonis 7 Puistangu 1 läbilõige I-I' .....	23
Joonis 8 Puistangu 1 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	25
Joonis 9 Puistangu 2 läbilõike asukoht .....	26
Joonis 10 Puistangu 2 läbilõige.....	26
Joonis 11 Puistangu 2 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	28
Joonis 12 Puistangu 3 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	30
Joonis 13 Puistangu 4 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	32
Joonis 14 Puistangu 5 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	33
Joonis 15 Puistangu 6 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	35
Joonis 16 Puistangute 7 ja 8 mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	36
Joonis 17 Puistangud 1 ja 2 3D vaade droonimudelile .....	37
Joonis 18 Puistangud 1 ja 2 3D vaade GPS-mudelile .....	37

Joonis 19 Puistangute võrdlusmodelite väärtuste histogramm .....	39
Joonis 20 Liivakarjääri mõõdistus.....	40
Joonis 21 Liivakarjääri läbilõike asukoht.....	41
Joonis 22 Liivakarjääri läbilõige I-I' .....	41
Joonis 23 Liivakarjääri mudelite kõrguserinevuste paiknemine .....	43
Joonis 24 Liivakarjääri mahuarvutuse ala lõunakülg.....	43
Joonis 25 Liivakarjääri võrdlusmodeli väärtuste histogramm .....	44
Joonis 26 Liivakarjääri 3D vaade droonimudelile .....	45
Joonis 27 Liivakarjääri 3D vaade GPS-mudelile .....	45
Joonis 28 Lubjakivikarjääri mõõdistus .....	46
Joonis 29 Lubjakivikarjääri läbilõike asukoht .....	47
Joonis 30 Lubjakivikarjääri läbilõige .....	48
Joonis 31 Lubjakivikarjääri mudelite kõrguserinevuste paiknemine.....	50
Joonis 32 Lubjakivikarjääri võrdlusmodeli väärtuste histogramm .....	51
Joonis 33 Lubjakivikarjääri ee 3D vaade droonimudelile.....	52
Joonis 34 Lubjakivikarjääri ee 3D vaade GPS-mudelile .....	52

## **Abstract**

The aim of this study is to analyse the possibility of using drones for mine surveying. For this reason data has been gathered using both drone and GPS surveying. The data gathered has been analysed to find out the accuracy of drone surveying, bring out pros and cons of drone surveying and the possibility of manipulating with both GPS and drone data.

The study uses surveying data of three different objects – sand quarry, limestone quarry and stock piles in limestone quarry. First digital elevation models are created from GPS data, followed by comparison with previously created drone elevation models. There are different software products for processing drone flight data, therefore raw survey data is used to create drone models in order to assess the overall possibility of using drones for mine surveying. The volumes were calculated and height comparison models were created using both models. Histograms have been used to visualise the frequency of height differences.

The study indicates, that the difference between calculated volumes is within the permitted limits when using raw drone models but the height differences vary within a wide range (–0,63...1,07 m). Because of the variations of the height differences, raw drone models cannot be used for creating quarry plans. In addition to above-mentioned, drone surveying can only be used for mine surveying in quarries, where the mineral resources that are removed from the natural state are fully transferred. On the other hand drone surveying can be employed when surveying stock piles if the customer wants it for private use.

All considered, use of drone surveying is a perspective after thorough data processing and further studies should be carried out in order to determine the parameters (for example pixel size, data processing level etc) that are required to ensure accuracy.

## Sissejuhatus

Mehitamata õhusõidukid ehk droonid on algselt arendatud militaarotstarbeks – luureks, ründeks jms [1], ent viimastel aastatel on hoogustunud droonide kasutamine ka tsiviilelus. Peamiselt kasutatakse droone erinevate sündmuste jäädvustamiseks õhust pildistamise või filmimise teel. Sõjandusest on tulnud tsiviiltarbesse ka droonid, mida saab kasutada maa-alade kaardistamiseks ja mõõdistamiseks.

Tänu tehnoloogia arengule on mõõdistusmeetodid muutunud geodeedi jaoks lihtsamaks ja kiiremaks, teodoliit ja nivelliir on asendunud tahhümeetriga ja kohati on tahhümeetiline mõõdistamine asendunud veelgi kiirema meetodi – mõõdistamisega reaajas ehk GPS-mõõdistamisega. Seoses ajalise ja ka materiaalse ressursi piiratusega on ettevõtted reeglina huvitatud mõõdistamisemeetoditest, mis võimaldavad saada piisava täpsusega andmed võimalikult kiiresti ja odavalt. Droonilt mõõdistamine on kindlasti kiire mõõdistamise viis, kuid Eestis on uurimata, milline on droonilt mõõdistamise täpsus.

Käesoleva töö eesmärk on analüüsida droonilt mõõdistamise kasutamist markšeideritöödel ehk maavara kaevandamisel tehtaval mõõdistamisel ja dokumenteerimisel [2]. Töö käigus kogutakse andmed objektide kohta GPS-mõõdistamise ja droonilt mõõdistamise teel. Töö eesmärgiks on saadud andmeid võrrelda ja analüüsida, selgitada välja droonilt mõõdistamise täpsus ning kasutamise võimalikkus markšeideritöödel. Samuti tuua välja droonilt mõõdistamise eelised ja puudused, hinnata andmete manipuleeritavust kahe mõõdistamistechnoloogia korral ning nõutava täpsuse korral anda soovitusi tehnoloogia kasutusele võtmiseks markšeideritöödel.

Käesolevas töös on kasutatud lähteandmetena OÜ J.Viru Markšeideribüroo GPS-mõõdistamise andmeid ajavahemikul 2013...2014 ning drooniga eBee saadud andmeid samade objektide kohta. GPS-mõõdistamised teostasid geodeedid Maido Ridalaan ja Jürgen Aluoja, drooni käitas Jürgen Aluoja. Töös kasutatavate lähteandmete kasutamine on kooskõlastatud ettevõtte juhatuse liikmetega.

Töös on kasutatud lähteandmetena kolme erineva iseloomuga objekti mõõdistuse andmed, kus GPS-mõõdistamine ja droonilt mõõdistamine on teostatud üheaegselt. Töö käigus on koostatud digitaalsed pinnamudelid GPS-mõõdistuse andmete alusel, arvutatud valitud kontuurides mahud nii GPS-mõõdistamiste kui droonilt mõõdistamise andmete alusel, saadud

mahtude erinevusi on võrreldud kehtivate õigusaktidega. Lisaks on koostatud droonilt mõõdistamise ja GPS-mõõdistamise võrdlusmudelid, et hinnata mudelite kõrguserinevusi. Kõrguserinevuste esinemise sageduse visualiseerimiseks on koostatud histogrammid kõrguserinevuse vahega 0,05 m. Lähtuvalt tehtud analüüsist on toodud välja drooni eelised ja puudused ning hinnatud andmete manipuleeritavust. Andmete ja pinnamudelite analüüs ja kõik mahtude arvutused on tehtud töö autori poolt.

Töö on seotud Mäeinstituudi projektiga AR12007 – Põlevkivi kadudeta ja keskkonnasäästlik kaevandamine. Töö koostamisel aitasid kaasa OÜ J.Viru Markšeideribüroo juhatuse liikmed andmete kasutamise võimaldamisega ning Jürgen Aluoja ja Enn Lüütre soovitude ja näpunäidetega.

## 1. Metoodika

Käesolevas peatükis on kirjeldatud töö koostamisel kasutatud metoodikat, erinevaid võimalikke mõõdistusmeetodeid ning selgitatud, miks on droonilt mõõdistamise andmete võrdluseks kasutatud GPS-mõõdistamise käigus saadud andmeid. Samuti on toodud seadusandlus, milles tuleb markšeiderimõõdistamisel lähtuda, töö koostamiseks kasutatud tarkvarad ning peamised kasutatud lähteandmed.

### 1.1 Seadusandlus

Markšeideridokumentatsiooni koostamise kohustus tuleneb kaevandamisseaduse § 13 lg 1 [3] ning samas ka Maapõueseaduse alamaktist „Keskkonnatasu deklaratsiooni vormid ja nende täitmise ning maavaravaru kaevandamise mahu aruande esitamise kord“, kus on kehtestatud nõuded instrumentaalmõõdistamise sagedusele ning viidatud, et instrumentaalmõõdistamisel tuleb lähtuda kaevandamisseaduse rakendusaktis „Markšeideritöö kord“ kehtestatud nõuetest [4].

Instrumentaalmõõdistamise sagedus sõltuvalt kaevandamise aastamahust määratakse aga maapõueseaduse rakendusaktiga „Keskkonnatasu deklaratsiooni vormid ja nende täitmise ning maavaravaru kaevandamise mahu aruande esitamise kord“. Dolokivi, fosforiidi, kristalliinse ehituskivi, kruusa, liiva, lubjakivi, põlevkivi, järvelubja ja savi puhul peab sõltuvalt kaevandamise aastamahust kaevandatud, kasutatud või kasutuskõlbmatuks muudetud maavaravaru koguse instrumentaalmõõdistamise sagedus karjääris või kaevanduses on toodud järgnevas tabelis (Tabel 1). Eranditeks on turvas, mille puhul tuleb instrumentaalmõõdistamine teostada ühe korra kaevandamisloa kehtivusajal ja kolm aastat enne kaevandamisloa kehtivusaja lõppemist, ning järve- ja meremuda. Järve- ja meremuda kaevandamise korral määratakse kaevandatud, kasutatud või kasutuskõlbmatuks muudetud maavaravaru hinnanguline kogus toodangu mahtude alusel. [4]



Tabel 1 Instrumentaalmõõdistuse minimaalne sagedus [4]

Aastamaht, t/m <sup>3</sup> *	Sagedus
Üle 200 000	Kord kvartalis
50 000...200 000	Kord aastas
10 000...50 000	Kord kahe aasta jooksul
Alla 10 000	Kord kolme aasta jooksul

\*ühik oleneb sellest, mis ühikuga maavaravaru arvel on, nt turba, fosforiidi ja põlevkivi ühikuks on tonn, ülejäänud arvelolevatel maavaradel kuupmeeter [5].

Markšeideritöö korra alusel tuleb markšeideritöödel tagada mõõtmiste täpsus ja jälgitavus, kontrollitavus, tulemuste kasutatavus. Markšeideritööd tuleb dokumenteerida. Markšeideritööd tuleb teha kooskõlas ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korruga ning üldgeoloogilise uurimistöö ja maavara geoloogilise uuringu tegemise korruga, arvestades käesolevast määrusest tulenevaid erisusi. Lisaks tuleb markšeideritöö korra järgi graafilise osa vormistamisel lähtuda Keskkonnaministri 06.05.2005 määrusest nr 36 „Maavara kaevandamisloa taotluse vorm, kaevandamisloa taotlusele, seletuskirjale ja graafilisele lisale esitatavad täpsustatud nõuded, kaevandamisloa andmise, muutmise ja ümberregistreerimise menetlustoimingute tähtajad ja kaevandamisloa vorm“. [6]

### 1.1.1 Täpsusnõuded

Markšeiderimõõdistamise täpsusnõuded tulenevad nii markšeideritöö korrast kui ka ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korrast.

Vastavalt ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korrale tuleb kõik mõõdistamisvõrgud siduda lähtepunktidega ning tohib kasutada ainult mõõdistamismeetodeid, mille kasutamisel on plaanilise mõõdistamisvõrgu punktide maksimaalsed lubatavad vead lähtepunktide suhtes järgmised:

- 1) M 1:2000 plaani puhul tiheasustusaladel 20 cm ja hajaasustusaladel 30 cm;
- 2) M 1:1000 plaani puhul tiheasustusaladel 10 cm ja hajaasustusaladel 15 cm;
- 3) M 1:500 plaani puhul tiheasustusaladel 5 cm ja hajaasustusaladel 8 cm. [7]

Reeglina on mäeeraldise plaanid mõõtkavas 1:1000 või 1:2000, eriti väikeste mäeeraldiste korral ka mõõtkavas 1:500. Kuna markšeiderimõõdistuse peamine eesmärk on siiski kaevandatud mahtude määramine ja dokumenteerimine, mõõdistatakse välitööl peamiselt reljeefi.

Lubatud reljeefielementide ja kõlviku piiride asendi maksimaalne viga plaanil lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes on 1 mm plaanil (1:500 mõõtkavas 50 cm, 1:1000 mõõtkavas 1 m ja 1:2000 2 m looduses), maapinnapunktide kõrguste maksimaalsed vead lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes M 1:500 puhul – 10 cm, M 1:1000 puhul – 15 cm, M 1:2000 puhul – 20 cm [7].

Käesoleva töö koostamise hetkel kehtiv ehitusgeodeetiliste uurimistöode tegemise kord kehtib kuni 30.06.2015 [7], kuid seisuga 27.05.2015 pole määruse uut redaktsiooni avaldatud, seega pole teada, kas samad nõuded kehtivad ka pärast 1. juulit 2015.

Markšeideritööde korras on ettenähtud nõuded markšeiderimõõdistuse kontrollimisele, kusjuures kahe mõõtesuuruse väärtuse erinevus kordusmõõtmisel ei tohi ületada järgmises tabelis toodud suhtarve (Tabel 2). Mahu kahe määranu lubatud erinevuse korral jäetakse lõplikuks mõõtetulemuseks esimene määranu. [6]

Tabel 2 Lubatud suhteline erinevus [6]

Maht (1000 m <sup>3</sup> )	Kuni 20	20–50	50–200	200– 1000	Üle 1000
Kahe erineva määranu lubatud suhteline erinevus väiksema mõõtetulemuse suhtes (%)	12	8	4	3	2

Käesolevas töös on esimeseks määranuks loetud droonimudeli järgi arvatud maht ning teiseks määranuks GPS-mudeli järgi arvatud maht.

## 1.2 Mõõdistamismeetodid

Mõõdistamismeetodid võib mõõdistamisviisi alusel jagada kaheks: kontaktmõõdistamine ning mittekontaktne ehk kaugseireline mõõdistamine. Kaugseirelise mõõdistamine on mõõdistamisviis fototehnoloogia või laserkiirte abil, kus mõõdistamispunktiga ei ole vaja luua otseselt kontakti, mistõttu võib mõõteseadet olla paigaldatud õhusõidukitele, aga ka maapinnal olevale statiivile [8]. Kontaktmõõdistamisel toimub mõõdistamine maapinnal, kusjuures kõik mõõtepunktid käiakse läbi, kas mõõteinstrumenti või prismaga.

Kontaktmõõdistamisviisid on näiteks tahhümeetriline mõõdistamine ja GPS-mõõdistamine, kaugseirelise mõõdistamise alla kuuluvad laserskaneerimine ja fotogramm-meetria erinevad vormid.

### **1.2.1 Kontaktmõõdistamine**

Tahhümeetrilisel mõõdistamisel on mõõteinstrumendiks tahhümeeter, mis on geodeesiainstrument, mida kasutatakse mõõdistustöödel maastikupunktide plaanilise ja kõrgusliku asendi kiireks määramiseks. Käesoleval ajal on enamlevinud elektrontahhümeeter, mis on kombinatsioon elektronteodoliidist ja –kaugusmõõturist koos väli- või sisearvutiga andmete salvestamiseks ja matemaatiliseks töötlemiseks. Lisaseadmena välitöödel on vaja prisma viseerimis-kiire suuna, kaldenurga ja kauguse mõõtmiseks. Elektrontahhümeeter võimaldab peale kauguste määrata ka horisontaal- ja kaldenurki, kõrguskasve ning koordinaate ja lahendada teisigi geodeetilisi ülesandeid. [9] Elektrontahhümeetri kasutamiseks on vaja kahte inimest – üks on tahhümeetri juures ning teine käib prisma mõõdistamispunkte läbi.

Olemas on ka robottahhümeeter, millega töötamiseks on vaja ühte inimest. Eelnimetatud tahhümeeter on varustatud servomootori ja raadiosaatjaga ning prisma juurde kuulub samuti raadiosaatja ja väike arvuti. Tööd juhib sellisel juhul prisma liikuv inimene. Kui prisma on mõõdetavas punktis tsentreeritud, vajutab mõõtja nupule ja tahhümeeter pöörab end prisma suunas, mõõdab kauguse ja nurgad ning salvestab need andmed. Robottahhümeetri kasutamine on ratsionaalne hea nähtavusega aladel. [9]

Elektrontahhümeeter võib väljas salvestada mõõtmis- ja sisestusandmed (nurgad, jooned, parandid) või ka koordinaadid. Kui soovitakse salvestada ka koordinaadid, tuleb enne mõõdistust salvestada ka lähtepunktide koordinaadid. [10]

Tahhümeetrilist mõõdistamist kasutatakse mäenduses viimasel ajal harva, kuna tahhümeetrise korral on mõõdistamisel vajalik kahe inimese olemasolu, samuti on vaja määrata enne lähtepunktide koordinaadid ning lisaks ei piisa reeglina mõõdistamiseks ühest tahhümeetri seisupunktist (nt puistangud takistavad vaatevälja jne), mistõttu tuleb seadet mitu korda ümber tõsta. Eeltoodust tulenevalt kasutatakse tahhümeetrilist mõõdistamist tavaliselt metsaga kaetud aladel, kus GPS-mõõdistamine on raskendatud.

Teiseks kontaktmõõdistamise viisiks on GPS-mõõdistamine. GPS-mõõdistamise all on käesolevas töös silmas peetud reaajas GNSS-mõõdistamist. GNSS on rahvusvaheline lühend

ülemaailmse navigatsioonisatelliitide süsteemi kohta, mille alla kuuluvad USA asukohamääramise süsteem GPS, Venemaa asukohamääramise süsteem GLONASS ning rajatav Euroopa asukohamääramise süsteem GALILEO [11]. GPS-mõõdistamisel liigub markšeider GNSS-vastuvõtjaga ehk liikuvjaamaga ühest mõõdistuspunktist järgmisesse, fikseerides igas punktis kolmemõõtmelised koordinaadid. GPS-mõõdistamisel kasutatakse viimasel ajal reaalajas mõõdistamist kasutades GNSS püsijaamade RTK (ingl k. *Real Time Kinematic* - kinemaatilised mõõtmised reaalajas [12]) võrgust saadavaid parandeid.

GNSS vastuvõtjad töötavad ühesugusel põhimõttel: mõõdetakse satelliidilt saabuva raadiosignaali vastuvõtjani jõudmiseks kuluvat aega ning selle järgi arvutatakse vastuvõtja asukoht ruumis. Plaanilise asukoha saamiseks piisab, kui signaal saadakse kolmelt satelliidilt. Kolmemõõtmelise asukoha määramiseks on vajalik vähemalt nelja satelliidi signaali. Rusikareegel on, et mida rohkem satelliite on vastuvõtjale “näha“ ja mida laiemalt need paigutuvad, seda parem. [13]

GNSS püsijaamade RTK võrgu tööpõhimõte seisneb selles, et kõik püsijaamad saavad pidevalt satelliitidelt saadud andmeid kesksesse serverisse kus on RTK võrgu tarkvara. RTK võrgu eesmärgiks on vähendada võrgu territooriumil distantsist tulenevaid vigasid liikuvjaama positsiooni arvutamisel. RTK võrgu serveritarkvara genereerib parandi, mis saadetakse liikuvjaamadele. Liikuvjaam võtab RTK serveriga ühendust (raadio- või GSM modem, internet, jne). Peale RTK andmete saamist arvutab liikuvjaam vastavalt algoritmile oma positsiooni. [14] Oluline on mõõtmise ajal tagada vähemalt nelja satelliidi lukustus, seetõttu töötatakse vähemalt viie satelliidi lukustusega (üks on reservis) [10].

Käesolevas töös kasutatud GPS-mõõdistamise tulemused on saadud kasutades GNSS-vastuvõtjat Trimble R8 ning Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaamade võrku, mis koosneb 19-st püsijaamast (Joonis 1) [15]. Trimble® VRS Now™ on kommertsteenuse, mis pakub mõõdistajale kogu riigis kohest juurdepääsu reaalajas kinemaatilistele GPS & GLONASS parandustele, ilma et selleks oleks vaja kasutada baasjaama [16]. Kasutades GNSS-vastuvõtjat ja Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaamade võrku, on plaaniline täpsus 1...2 cm ning kõrguslik täpsus 3 cm [16]. Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaamade võrgu näol on tegemist 3. klassi riikliku geodeetilise tihendusvõrguga [15].



Joonis 1 Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaamade võrk [17].

GPS-mõõdistamine on peamine meetod, mis käesoleval ajal karjäärade mõõdistamisel kasutusel on, kuna on lihtne, kiire ja odav (tänu sellele, et vajab vaid üht inimest).

### 1.2.2 Kaugseireline mõõdistamine

Kaugseirelise mõõdistamise alla kuuluvad nii terrestiline kui ka aerolaserskaneerimine ning fotogramm-meetriline mõõdistamine. Kaugseirelise mõõdistamise puhul ei vali inimene mõõdistuspunktide asukohta, vaid määrab mõõdistamispunktide soovitud tiheduse.

Laserskaneerimise seadet nimetatakse LIDARiks (*LIDAR - Light Detection And Range*). LIDARi töö põhimõte seisneb maapinnalt tagasipeegeldunud laserimpulsilt kolmemõõtmeliste koordinaatide arvutamisel. Laserskaneerimist saab teostada nii õhusõidukilt (aerolaserskaneerimine) kui ka maapinnalt (terrestiline). LIDARi seade saadab välja valgusimpulsi, mis sihtkohta jõudes peegeldub tagasi seadmesse. Laserskaneerimine toimub valguskiirusel ja valguskiirus on konstantne, saab välja arvutada valguskiire levimise teekonna pikkuse seadmest pinnani, millelt valguskiir tagasi peegeldub. [18]

Terrestilisel laserskaneerimisel paikneb mõõteseadet statsionaarsel statiivil, mille koordinaadid on eelnevalt teada. Terrestiline laserskaneerimine leiab kasutust peamiselt ehitiste mõõdistamisel.

misel ja modelleerimisel. Eriti kasulik on see näiteks kumerate ja muutuva raadiusega pindade mõõdistamisel, kuna tahhümeetriline mõõdistus on sellistel pindadel väga ajamahukas. [8]

Terrestilise laserskaneerimise tehnoloogia kogub aina populaarsust. Seda seetõttu, et tehnoloogiat on mugav kasutada, kuna ta on suhteliselt kõrge täpsusega ( $\pm 4$  mm mõõtmisel,  $\pm 2$  mm mudeldamisel) ning suhteliselt suure ulatusega (6000 m). Kõik need omadused on loonud olukorra, kus aina enam koostatakse ja ka tellitakse 2D plaanide asemel detailsemaid 3D mudelid. [19]

Arvestades, et terrestilise laserskanneri maksumus võib ületada 100 000 € [8] ning karjääris oleks vaja mõõdistada mitmes seisupunktis ning hiljem saadud andmeid oluliselt töödelda, pole antud meetodi kasutamine markšeiderimõõdistamisel hetkel kasutuses.

Aerolaserskaneerimise puhul asub mõõteseade õhusõidukil, objekti omadusi uuritakse valguse peegelduste kaudu. Kui seade asub õhusõidukil ja valgusimpulsid lähetatakse maapinna suunas, annab ülitäpne ajamõõtmine teada lennuki ja peegelduva objekti vahemaa. Kuna objekti mõõdistamisel lennuk liigub, on vaja objekti plaanilise asukoha määramiseks määrata ka lennuki asukoht maapinna suhtes. Lennuki asukoha määramiseks kasutatakse satelliidipõhist meetodit (GPS või GLONASS). Kuna lennuk ei lenda sirgjooneliselt, vaid kiirendab ja raputab päris tugevasti, on vaja teada ka lennuki asendit, milleks kasutatakse IMU-seadet (*IMU – Inertial Measurements Units*). Lennuki asukohta tuleb määrata tihti, sest vahemaade mõõtmise aeg on lühike ning lennuk võib õhuauku sattudes kaotada sekundiga mitu meetrit kõrgust. [20]

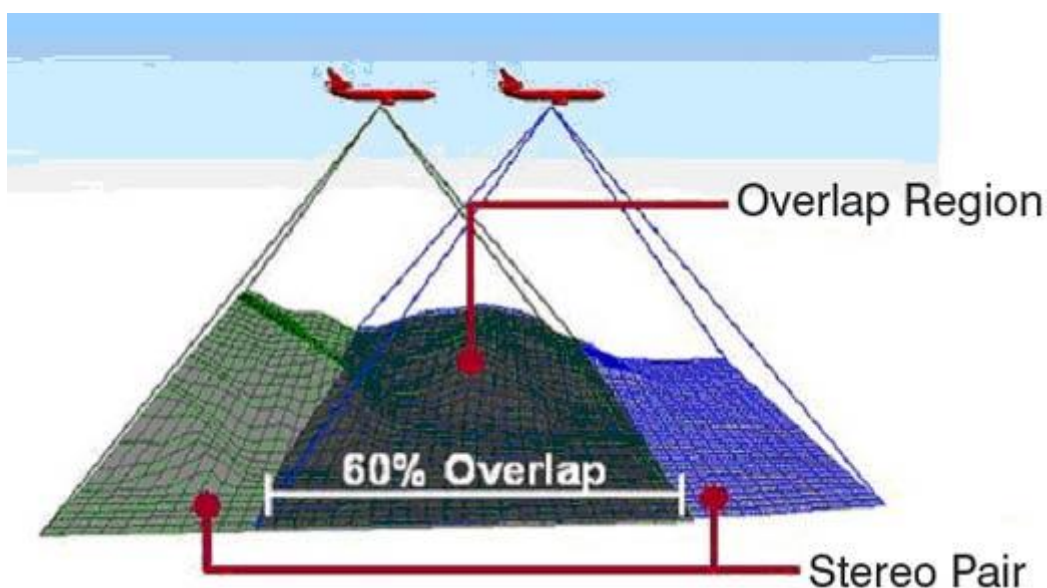
Aerolaserskaneerimisel võib õhusõidukiks olla nii mehitatud õhusõiduk kui droon. Käesoleval ajal Eestis teadaolevalt ühtegi laserskanneriga varustatud drooni ei ole, ilmselt võib selle põhjuseks olla laserskanneri kõrge maksumus ning drooni kõrge riskitase. Maa-amet omab aerolaserskannerit Leica ALS50-II, millega on teostatud kogu Eesti aerolaserskaneerimine lennukilt perioodil 2008...2011 [20]. Kuna karjääris on olukord kiires muutumises ning kogu Eesti aerolaserskaneerimist teostatakse harva (ca nelja aasta tagant [20]), samuti tuleks ühe objekti mõõdistamiseks lennu tellimine väga kallis [8], ei ole võimalik antud meetodit kasutada markšeiderimõõdistamisel.

Teiseks kaugseirelise mõõdistamise viisiks on fotogramm-meetriline mõõdistamine, mille korral määratakse objekti kuju, mõõtmed ja asend fotode järgi. Fotogramm-meetria jaguneb

kolmeks – satelliit-, aero- ja terrestiline fotogramm-meetria. Satelliitfotogramm-meetria korral paikneb kaamera satelliidil, aerofotogramm-meetria korral õhusõidukil ning terrestilise fotogramm-meetria puhul maapinnal statiivil. [21]

Fotogramm-meetrilise mõõdistamise kasutamist mäenduses on mainitud 2011. aastal raamatus „Geodeesia ja kartograafia läbi aegade : maamõõtmise ning kaardistamiskultuuri ajalugu sõnas ja pildis“ [22], kuid teadaolevalt Eestis seda mäenduses markšneiderimõõdistamiseks ei kasutata.

Aerofotogramm-meetrilise mõõdistamise korral võib spetsiaalne kaamera paikneda nii mehitatud kui mehitamata õhusõidukil. Tegelikult pole aerofotogramm-meetria korral suurt tehnoloogilist erinevust, kas kasutatakse mehitamata või mehitatud õhusõidukit, drooni puhul on lennu kõrgus lihtsalt madalam. Kuna lennukilt mõõdistamine on kallis ning käesoleva töö koostamiseks kasutatud lähteandmed on saadud kasutades drooni, aerofotogramm-meetrial lennukilt pikemalt ei peatuta. Fotogramm-meetria puhul määravad saadavate andmete täpsuse kasutatava kaamera parameetrid ning fotode ülekattuvus, samuti ka piltide töötlemiseks kasutatav tarkvara [21].



Joonis 2 Aerofotogramm-meetria tööpõhimõte [23]

Käesolevas töös kasutatud drooni mõõdistusandmed on kogutud drooniga eBee, mis objekti kohal kindlal marsruudil lennates teeb pilte, mida on hiljem võimalik töödelda ning saada

georefereeritud ortofotomosaiike, kõrgusmodelid jne. Drooni eBee ja selle toimimist on lähemalt kirjeldatud [Lisas 1](#).

Arvestades ehitusgeodeetiliste uurimistöde korras toodud tingimust mõõdistamisvõrgu sidumise kohta lähtepunktidega ei saa käesoleval hetkel kaugseirelist mõõdistamist kasutada markšeiderimõõdistamiseks.

### **1.3 Kasutatud tarkvarad**

Jooniste ja mudelite koostamiseks ning mahtude määramiseks on kasutatud tarkvarapaketti Bentley PowerCivil for Baltics V8i SELECT series 3. Bentley PowerCivil for Baltics V8i on tarkvarapakett, mis hõlmab endas Bentley MicroStation CAD-platvormi ning 3D modelleerimistarkvara Bentley InRoads, kusjuures V8i tähistab kaheksandat põlvkonda, mis paistab silma innovatsiooniga nii tehnoloogias, kui ka lähenemises litsentsimise- ja sisuhaldusküsimustele, SELECT series 3 tähistab aga tarkvara kõige uuemat versiooni [24].

Bentley MicroStation on universaalne CAD-platvorm professionaalsete insenerirakenduste tarbeks, võimaldades joonestada nii kahe- kui kolmemõõtmeliselt, kasutada WMS-i, referentse ning mudeldamise baasfunktsioone [24]. Bentley Microstation toetab formaate: DWG, DGN, DXF, SHP, 3DM jne [25].

Bentley InRoads on erinevate infrastruktuuri objektide projekteerimiseks mõeldud tarkvara. Bentley InRoads kasutab paindlikku, kõrgendatud täpsuse ja piiramatute punktide arvuga pinnamudelit. Pinnamudeli sisestamiseks saab kasutada enamikke standardformaate, lisaks saab pinnamudeli punktile omistada palju erinevate tunnuste ja omadustega topoloogiaelemente (*features*), millel on kindel tähendus ja mõju pinnamudelile. Punkte hoitakse eraldi andmebaasis, kuid visualiseeritakse CAD-failis ning nende redigeerimiseks on lai valik graafilisi meetodeid. [24]

Töö koostamiseks on kasutatud Microsoft Office 2007 tekstiõõtlustarkvara Word ning Microsoft Office 2007 tabelarvutustarkvara Excel.



## 1.4 Pinnamudelid

Mõõdistusandmete põhjal on koostatud pinnamudelid. Droonilt mõõdistamise andmete alusel loodud pinnamudelit nimetatakse edaspidi droonimudeliks ning GPS-mõõdistamise andmete alusel loodud pinnamudelit GPS-mudeliks.

Töös on kasutatud objektide reljeefi iseloomustamiseks droonimudelit ja GPS-mudelit. GPS-mudeli koostamise aluseks on GPS-mõõdistamisel mõõdetud punktid, GPS-mudelid on koostatud käesoleva töö käigus välitöö mõõdistamispunktide alusel. Töös kasutatud droonimudelid on koostatud OÜ J.Viru Markšeideribüroo geodeet Jürgen Aluoja poolt.

Droonimudeli loomisel pole kasutatud kõiki drooniga kaasasoleva tarkvara võimalusi punkti-pilve filtreerimiseks, mistõttu on droonimudeli näol tegemist n-ö toormudeliga, millest oleks võimalik erinevaid tarkvaralahendusi kasutades eemaldada müra (ümbrisevatest kõrguspunktidest oluliselt erinevad üksikud punktid) ja seeläbi droonimudelit täpsemaks muuta [26]. Toormudelit on kasutatud, kuna erinevate droonide puhul on kasutuses erinevad tarkvarad, mille võimalused on erinevad, seetõttu on toormudeli analüüsimisel võimalik teha järeldusi ka teiste sarnaste parameetritega droonide täpsuse kohta. Droonilt mõõdistused on tehtud piksli suurusega 4,6...5,2 cm, kuid pinnamudeli loomisel on kasutatud punkte hõredamalt ning droonimudelil paiknevad punktid ligikaudu 0,5 m küljepikkusega ruudustikus. Droonimudeli detailsust on vähendatud, kuna arvuti võimekus seab piirid.

## 1.5 Mudelite võrdlus

Droonimudeli ja GPS-mudeli erinevuste leidmiseks on koostatud võrdlusmudel kasutades funktsiooni Generate Isopach Surface, millega luuakse uus pinnamudel, kus pinnamudeli kõrgused leitakse teise pinnamudeli punkti kõrgusest esimese pinnamudeli kõrguse lahutamise teel. Antud töös on valitud funktsioonis Generate Isopach Surface esimeseks pinnamudeliks GPS-mudel ning teiseks pinnamudeliks droonimudel. Selliselt toimides on positiivsed väärtused võrdlusmudelil nendel punktidel, kus droonimudel on GPS-mudelist kõrgem ning negatiivsed väärtused nendel punktidel, kus droonimudel on GPS-mudelist madalam.

Kuna markšeiderimõõdistuse peamine eesmärk on kaevandatud mahu määramine, on antud töös määratud ka mahud kasutades droonimudelit ja GPS-mudelit. Mahu arvutamisel on alamiseks pinnaks kasutatud puistangute puhul puistangu alumise kontuuri kõrgusi ning muudel

juhtudel valitud kõrgusel asuvat tasapinda. Tasapinna kõrguse valiku selgitus on antud konkreetse mahu arvutuse kirjelduses. Mahud on arvutatud triangulatsiooni interpoleerimismeetodiga. Pärast mahtude arvutamist on leitud droonimudeli ja GPS-mudeli alusel arvutatud mahtude erinevus ning suhtelise erinevuse leidmiseks on kasutatud järgmist valemit:

$$E_s = \frac{E}{V_{\min}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

kus  $E_s$  – mahtude suhteline erinevus, %;

$E$  – mahtude erinevus, m<sup>3</sup>;

$V_{\min}$  – leitud väiksem maht, m<sup>3</sup>.

Droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste keskmine erinevus on leitud arvutades võrdlusmudeli kõikide punktide aritmeetilise keskmise. Võrdlusmudelite väärtuste kohta on koostatud histogrammid, millelt on näha erinevate kõrguserinevuste esinemise sagedused. Lisaks on tehtud kahest puistangust, liivakarjäärast ja lubjakivikarjäärast droonimudeli ja GPS-mudeli 3D vaated, et visualiseerida mudelite detailsust ja maapinna reljeefi erinevate mõõdistamistechnoloogiate korral.

## 2. Droonilt mõõdistamise andmete analüüs

Käesolevas peatükis on toodud andmed kolme erineva iseloomuga objekti kohta ning võrreldud droonimudeleid ja GPS-mudeleid. Mõõdistusobjektideks on valmistoodangu puistangud lubjakivikarjääris, liivakarjääri mõõdistus ja lubjakivikarjääri mõõdistus. Liivakarjääri mõõdistuse puhul on drooni lennutrajektoor ühtepidi edasi-tagasi, puistangute ja lubjakivikarjääri mõõdistuste korral on droon lennanud ka ristipidi edasi-tagasi üle esmase trajektoori.

### 2.1 Puistangute mõõdistus

Välitöö toimus puistangute mõõdistamiseks 09.06.2014 [27]. Droonilt mõõdistamisel kasutati piksli suurust 4,6 cm, alale paigutati 13 maapinna kontrollpunkti [27]. Kaheksa puistangut mõõdistati üle GPS-mõõdistamise teel. Kokku on alal mõõdistatud kaheksa puistangut nii droonilt mõõdistamise kui ka GPS-mõõdistamise teel. Kuna GPS-mõõdistamisel on mõõdistatud vaid valitud puistangud ning pole mõõdistatud puistangute vahelisi alasid, on koostatud iga puistangu kohta eraldi pinnamudelid, samuti on arvatud iga puistangu maht eraldi. Droonilt mõõdistatud ala ning GPS-mõõdistuse punktid on näidatud järgneval joonisel (Joonis 3).



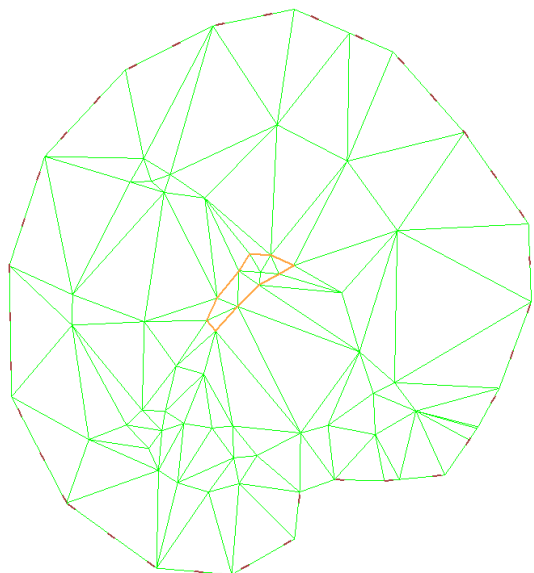
Joonis 3 Puistangute mõõdistus

Puistangute mahu arvutamisel on arvatud mahud GPS-mõõdistamisel mõõdetud puistangu kontuuri piires ning puistangu alumiseks pinnaks on võetud GPS-mõõdistamisel saadud puistangu väliskontuuri kõrgused. Kuna mahuarvutuseks on kasutatud mõlema mudeli puhul sama kontuuri, on puistangu pindala mõlema mudeli korral sama. Esimese puistangu puhul on näidatud mõõdistamisandmete alusel loodud pinnamudelite kolmnurkade tihedus nii GPS-mõõdistamise kui droonilt mõõdistamise põhjal. Puistang 1 on valitud seetõttu, et tema pindala on väike, mistõttu on drooni pinnamudeli puhul eristuvad mudeli kolmnurgad, suuremate puistangute korral ei eristu kolmnurgad selgelt. Droonilt mõõdistamise puhul on mudelipunktid  $0,5 \times 0,438$  m (X×Y) võrgustikuna.

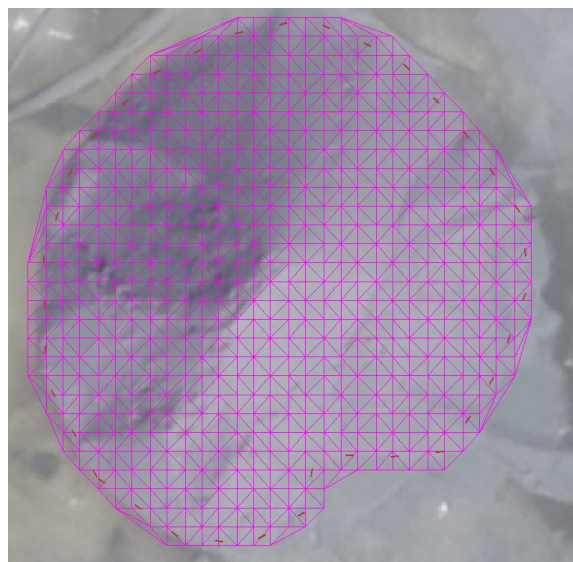
Puistangute läbilõiked on koostatud puistangutest 1 ja 2, kuna esimese kahe puistangu läbilõiked illustreerivad droonimudeli ja GPS-mudeli maapindade erinevust piisavalt hästi ning ülejäänud puistangute läbilõigete näitamine ei annaks lisaväärtust. Läbilõiked on koostatud selliselt, et läbilõikejoon läbib GPS-mudeli punkte. Läbilõike GPS-mudeli maapinnajoone kirjeldab konkreetselt mõõdistatud punkte ning droonimudeli maapinnajoone konstrueerimisel interpolerib programm maapinna kõrgused. Kuna droonimudeli puhul on mudelipunktid tihedamalt, illustreerib selline läbilõige reaalsemalt mudeli erinevust kui suvaliselt joonestatud läbilõike joon. Läbilõigete koostamisel on valitud vertikaalne mõõtkava kaks korda suurem kui horisontaalne, et droonimudeli ja GPS-mudeli maapinnajooned eristuksid teineteisest paremini.

### 2.1.1 Puistang 1

Järgnevatel joonistelt kajastub GPS-mudeli ja droonimudeli erinev mudelipunktide tihedus (Joonis 4, Joonis 5).

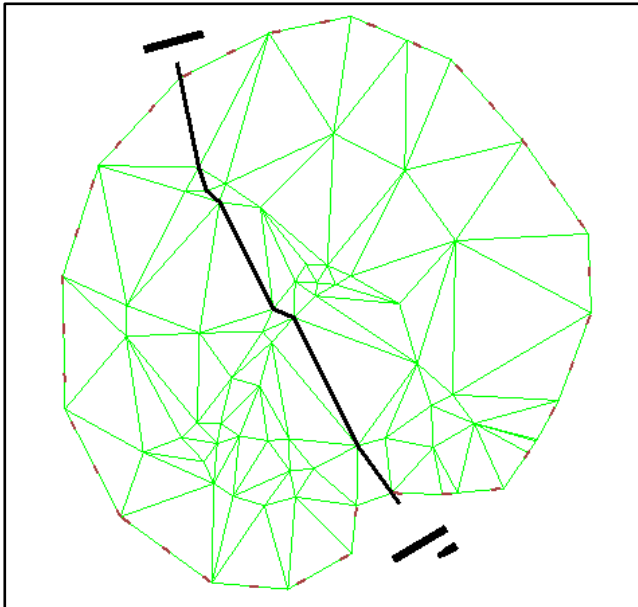


Joonis 4 Puistangu 1 kolmnurgad GPS-mudelil

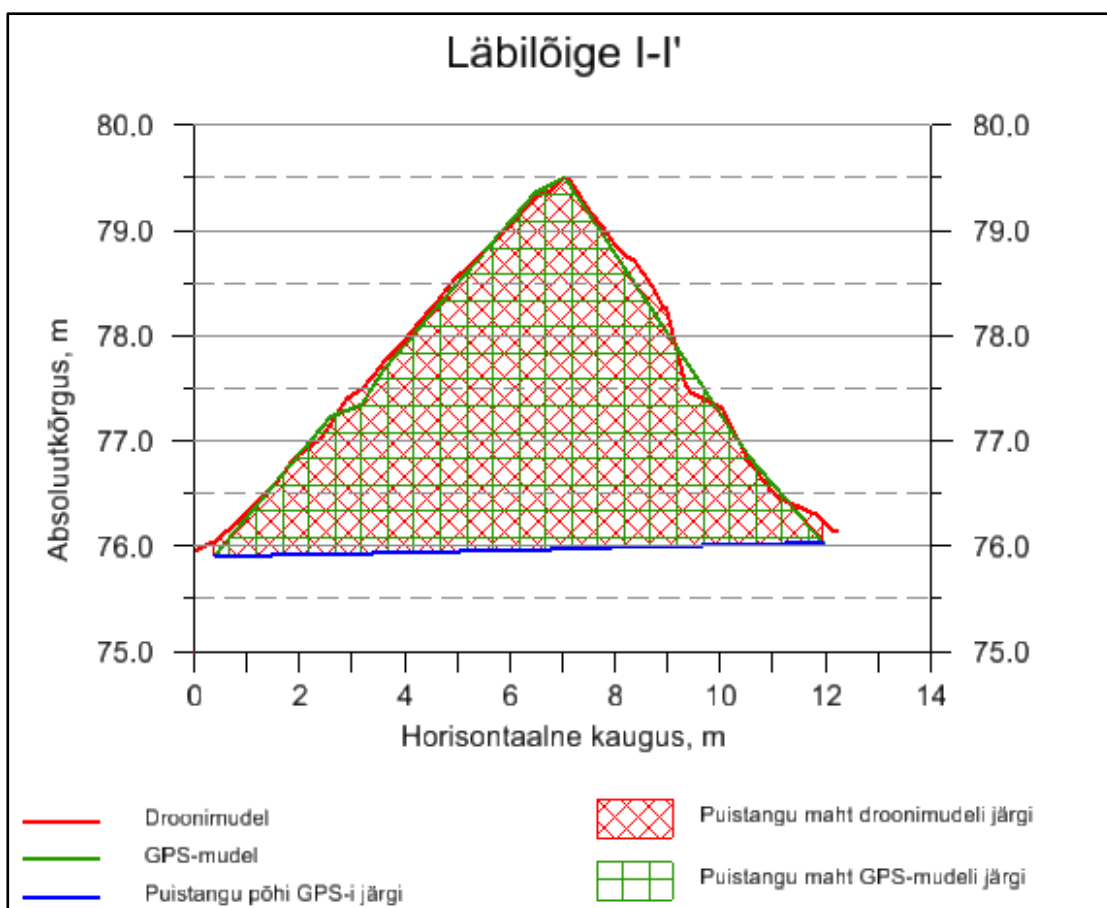


Joonis 5 Puistangu 1 kolmnurgad droonimudelil

GPS-mõõdistamisel on mõõdistuspunktide arv 74, droonilt mõõdistamise korral on aga punkte 661. GPS-mõõdistuspunktide korral luuakse mudelisse 122 kolmnurka, aga drooni mõõdistuspunktide korral 1261. Samuti on näha, et GPS-mudeli korral asuvad punktid korrapäraselt (vastavalt markšeideri valitud punktidele), ent droonimudeli puhul on paiknevad punktid võrgustikuna. GPS-mõõdistamisel on mõõdistatud puistangu alumine kontuur, ülemine kontuur ning kuna tegemist on suhteliselt korrapäraselt puistanguga, on mõõdistatud ka päris palju punkte puistangu nõlvadel. Droonilt mõõdistuse korral on aga punktid võrgustikuna, olenemata puistangu reljeefi keerukusest.



Joonis 6 Puistangu 1 läbilõike asukoht



Joonis 7 Puistangu 1 läbilõige I-I'

Puistangu 1 läbilõikelt on näha, et puistangu kuju mõlema mudeli puhul on suhteliselt sarnane, aga GPS-mudeli maapinnajoonel on vähe murdepunkte, droonimudeli maapinnajoonel aga palju ning kõik puistangu reljefimuutused on näha.

Järgnevas tabelis (Tabel 3) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et puistangu miinimumkõrgustes suurt erinevust ei ole, droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,87 abs m, mis on 0,02 m võrra kõrgem kui GPS-mudelil. Suurem erinevus tuleneb aga maksimumkõrguse puhul, kus droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus on 0,17 m, kusjuures droonimudel on jällegi kõrgem. Miinimum- ja maksimumkõrguste erinevused võivad tuleneda sellest, et väljas mõõdistamisel valib markšeider mõõdistuspunktid silma järgi reljefi iseloomulikematesse punktidesse, kuid silma järgi võib olla raske hinnata, milline on kõige kõrgem punkt, eriti arvestades, et kõrguste erinevus jääb alla 20 cm.

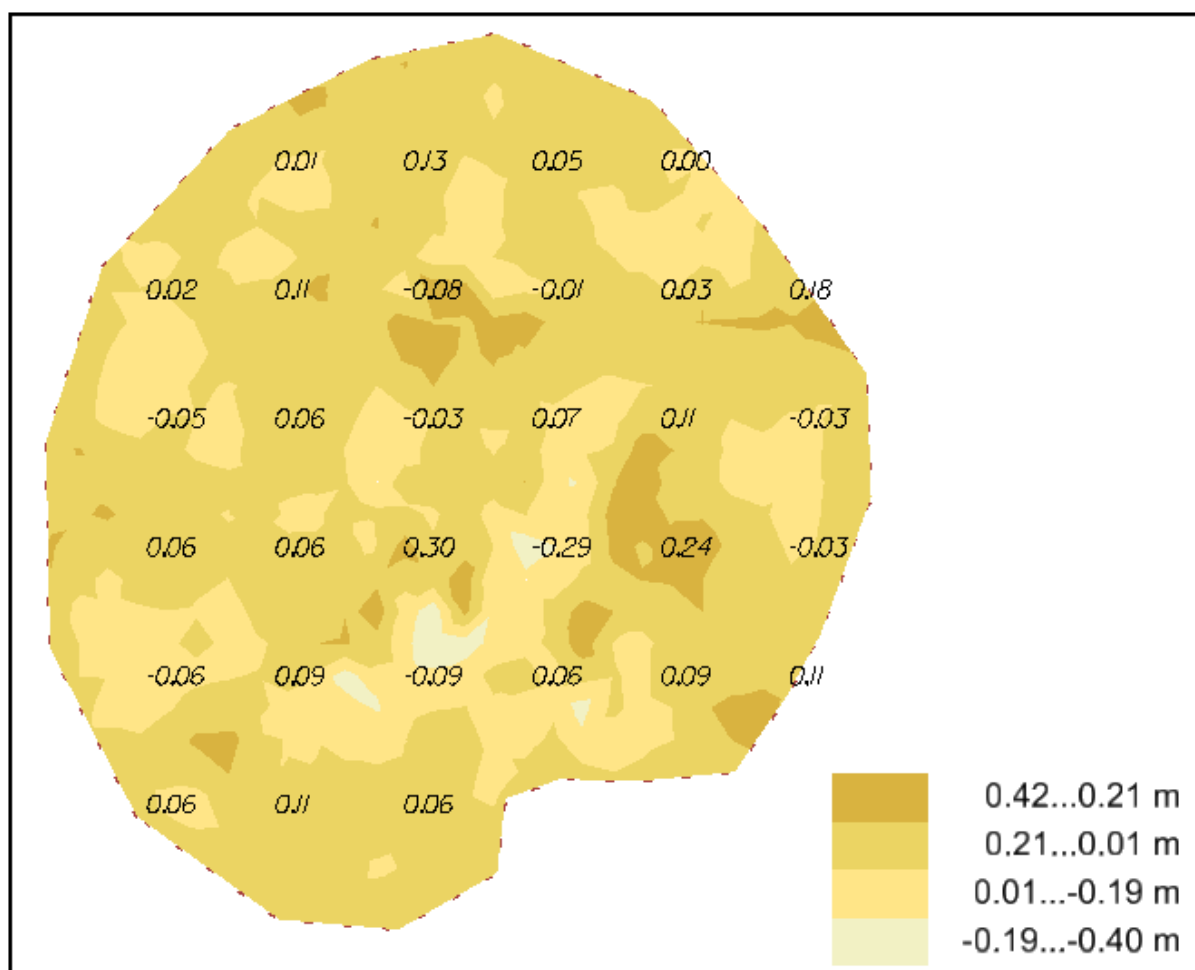
Tabel 3 Puistangu 1 mudelite võrdlus

<b>Parameetrid</b>	<b>Droon</b>	<b>GPS</b>	<b>Erinevus</b>
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	130	130	0
Miinimumkõrgus, abs m	75,87	75,85	0,02
Maksimumkõrgus, abs m	79,79	79,62	0,17
Punkte mudelis	661	74	587,00
Kolmnurki mudelis	1261	122	1139
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	169,3	161,3	8,0
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>5,0</b>		

Puistangu 1 maht droonimudeli järgi on 169,3 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 161,3 m<sup>3</sup>, mis on 8 m<sup>3</sup> võrra vähem. Kuna droonimudeli minimaalsed ja maksimaalsed kõrgused olid kõrgemad kui GPS-mudelil, võis arvata, et droonimudeli järgi tuleb ka puistangu maht suurem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 5%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse rohkem kui kahekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 1 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,40...0,42 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,06 m, kusjuures droonimudeli pind on 479-s punktis kõrgem ning 159-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguserinevuste paiknemist kirjeldab järgnev joonis (Joonis 8).

Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.

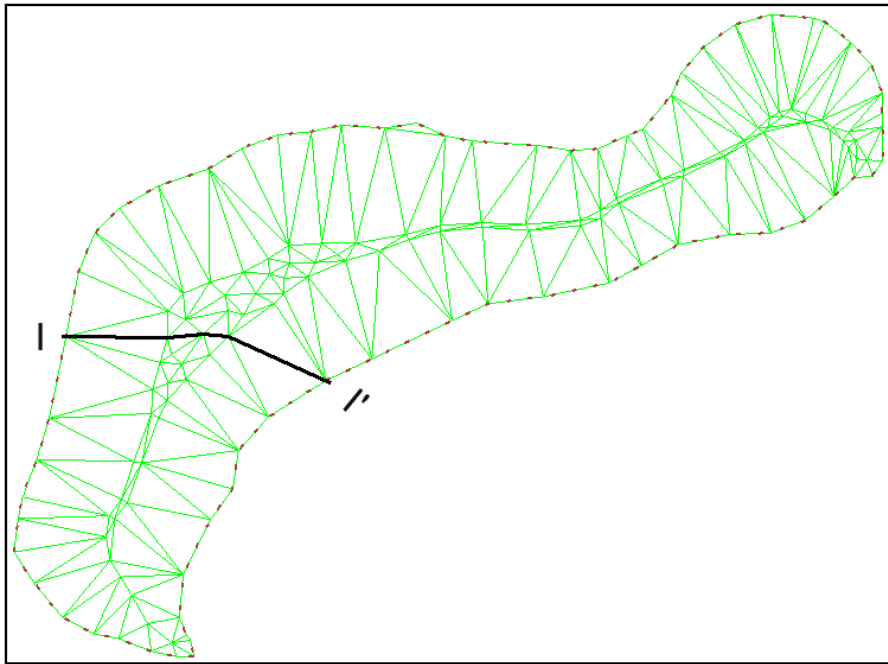


Joonis 8 Puistangu 1 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

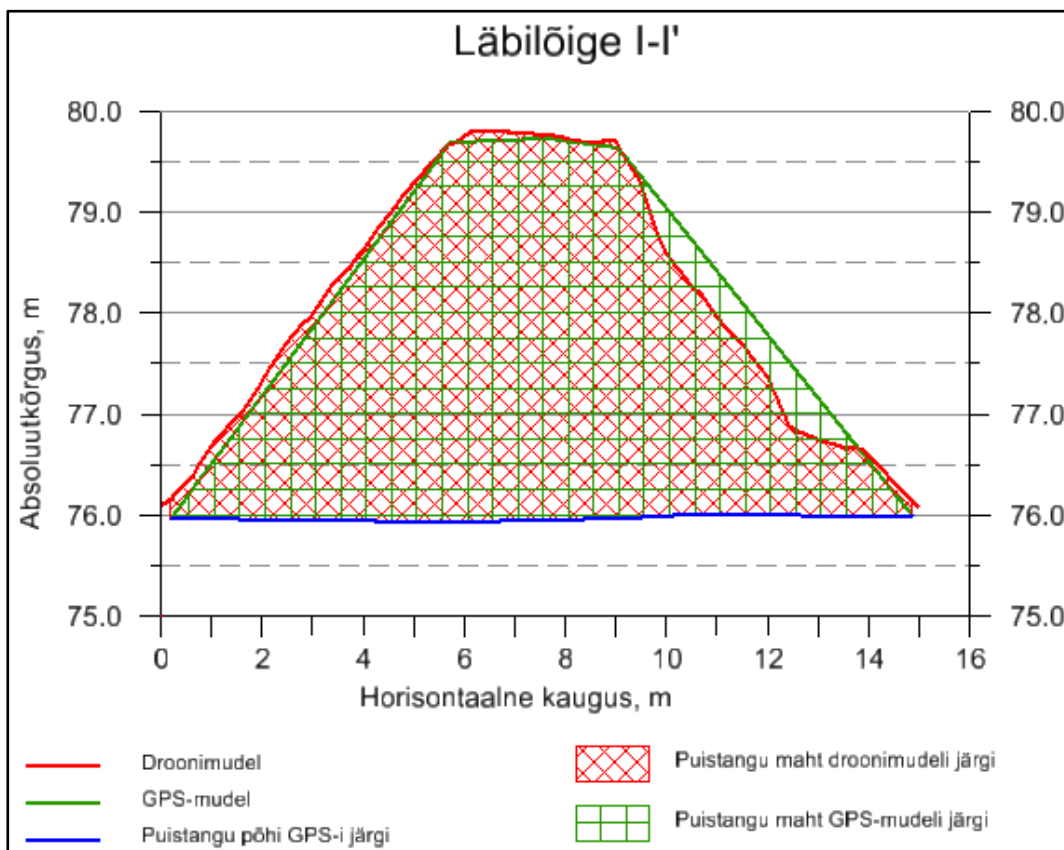
### 2.1.2 Puistang 2

Puistangu 2 puhul on tegemist suhteliselt korrapärase puistanguga, arvestades, et geodeet on väljas mõõtnud peamiselt puistangu alumise ja ülemise kontuuri ning üksikud punktid puistangu peal. Järgnevalt on toodud puistangu 2 läbilõike asukoht (Joonis 9) ning läbilõige I-I' (Joonis 10).





Joonis 9 Puistangu 2 läbilõike asukoht



Joonis 10 Puistangu 2 läbilõige

Läbilõikelt on näha, et sarnaselt puistangu 1 läbilõikele on GPS-mudeli maapinnajoonel vähe murdepunkte, aga droonimudelil palju. GPS-mudeli maapinnajoonel on viis murdepunkti: markšeider on väljas mõõtnud puistangu alumise kontuuri, ülemise kontuuri ning üksikud punktid puistangu peal. Puistangu nõlvadel mõõdistuspunkte ei ole, seetõttu joonistub läbilõikel GPS-mudeli maapinnajoon puistangu ülemisest kontuurist sirgelt alla, ent droonimudeli maapinnajoon lähtub puistangu nõlva reaalsest kujust.

Järgnevas tabelis (Tabel 4) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et puistangu miinimumkõrgustes suurt erinevust ei ole, droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,74 abs m, mis on 0,01 m võrra kõrgem kui GPS-mudelil. Ka maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus vaid on 0,01 m, kusjuures droonimudel on jällegi kõrgem.

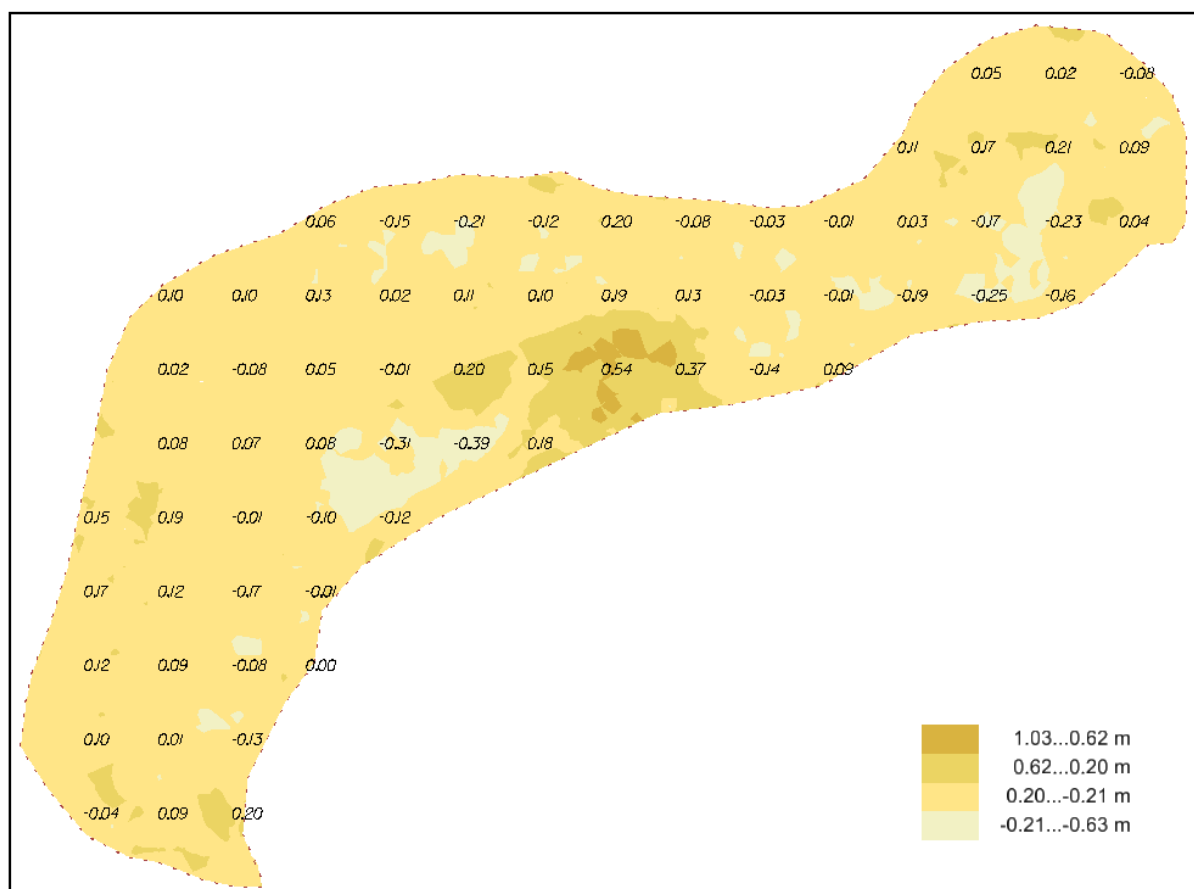
Tabel 4 Puistangu 2 mudelite võrdlus

<b>Parameetrid</b>	<b>Droon</b>	<b>GPS</b>	<b>Erinevus</b>
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	592	592	0
Miinimumkõrgus, m	75,74	75,73	0,01
Maksimumkõrgus, m	79,86	79,85	0,01
Punkte mudelis	2866	159	2707
Kolmnurki mudelis	5464	240	5224
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	1014,6	999,7	14,9
<b>Suhteline erinevus väiksema tulemuse suhtes, %</b>	<b>1,5</b>		

Puistangu 2 maht droonimudeli järgi on 1014,6 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 999,7 m<sup>3</sup>, mis on 14,9 m<sup>3</sup> võrra vähem. Kuna droonimudeli minimaalsed ja maksimaalsed kõrgused olid kõrgemad kui GPS-mudelil, võis arvata, et droonimudeli järgi tuleb ka puistangu maht suurem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 1,5%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse ligi kaheksakordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 2 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,63...1,03 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,03 m, kusjuures droonimudeli pind on 1710-s punktis kõrgem ning 1101-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguserinevuste paiknemist kirjeldab järgnev joonis (Joonis

11). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.



Joonis 11 Puistangu 2 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

### 2.1.3 Puistang 3

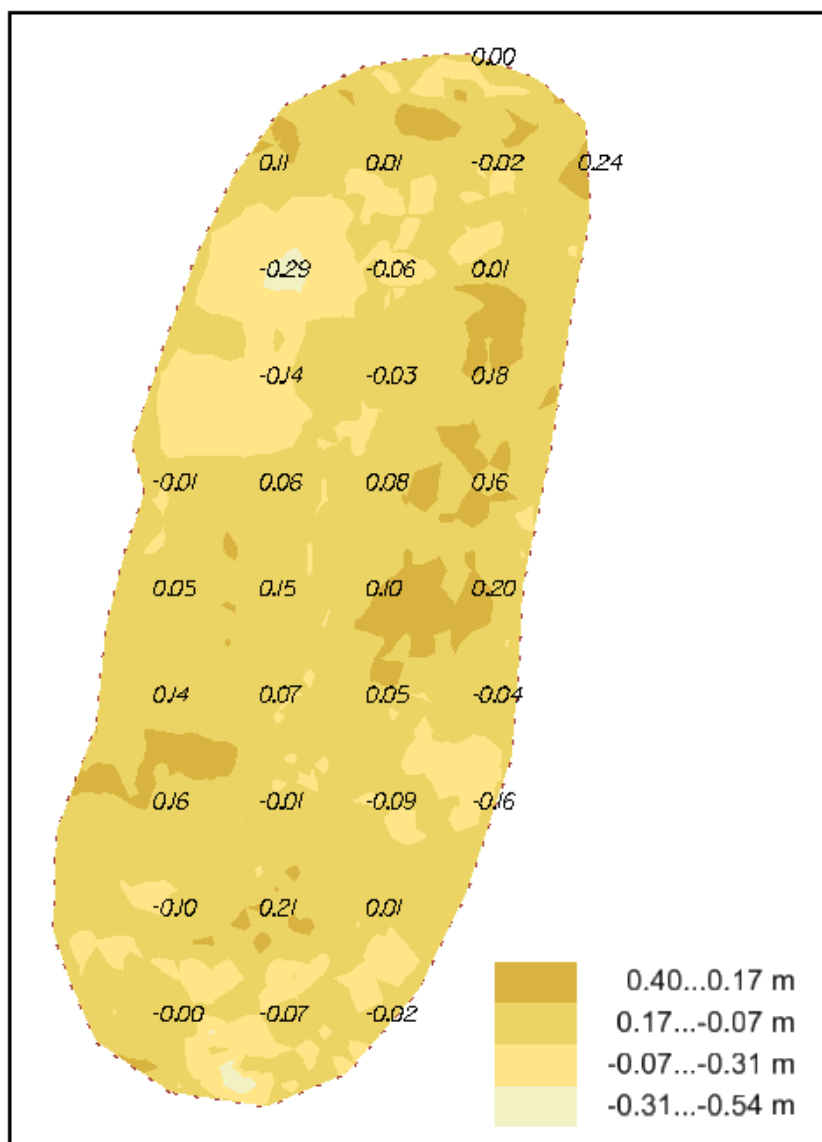
Järgnevas tabelis (Tabel 5) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,21 abs m, mis on  $-0,10$  m võrra madalam kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus kaks korda väiksem ( $-0,05$  m), kusjuures droonimudel on jällegi madalam.

Tabel 5 Puistangu 3 mudelite võrdlus

<b>Parameetrid</b>	<b>Droon</b>	<b>GPS</b>	<b>Erinevus</b>
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	309	309	0
Miinumkõrgus, m	75,21	75,31	-0,10
Maksimumkõrgus, m	79,20	79,25	-0,05
Punkte mudelis	1502	169	1333
Kolmnurki mudelis	2949	112	2837
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	518,9	513,3	5,6
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>1,1</b>		

Puistangu 3 maht droonimudeli järgi on 518,9 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 513,3 m<sup>3</sup>, mis on 5,6 m<sup>3</sup> võrra vähem. Kuna droonimudeli minimaalsed ja maksimaalsed kõrgused olid madalamad kui GPS-mudelil, võis arvata, et droonimudeli järgi tuleb ka puistangu maht väiksem, ent praegusel tuli droonimudeli järgi ikkagi maht suurem. See on tegelikult ka mõistetav, kuna mudeli miinum- ja maksimumkõrguste alusel ei saa põhjanevaid järeldusi teha. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 1,1%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse ligi kümnekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 3 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,54...0,40 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,02 m, kusjuures droonimudeli pind on 834-s punktis kõrgem ning 627-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguste erinevusi kirjeldab järgnev joonis (Joonis 12). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.



Joonis 12 Puistangu 3 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

#### 2.1.4 Puistang 4

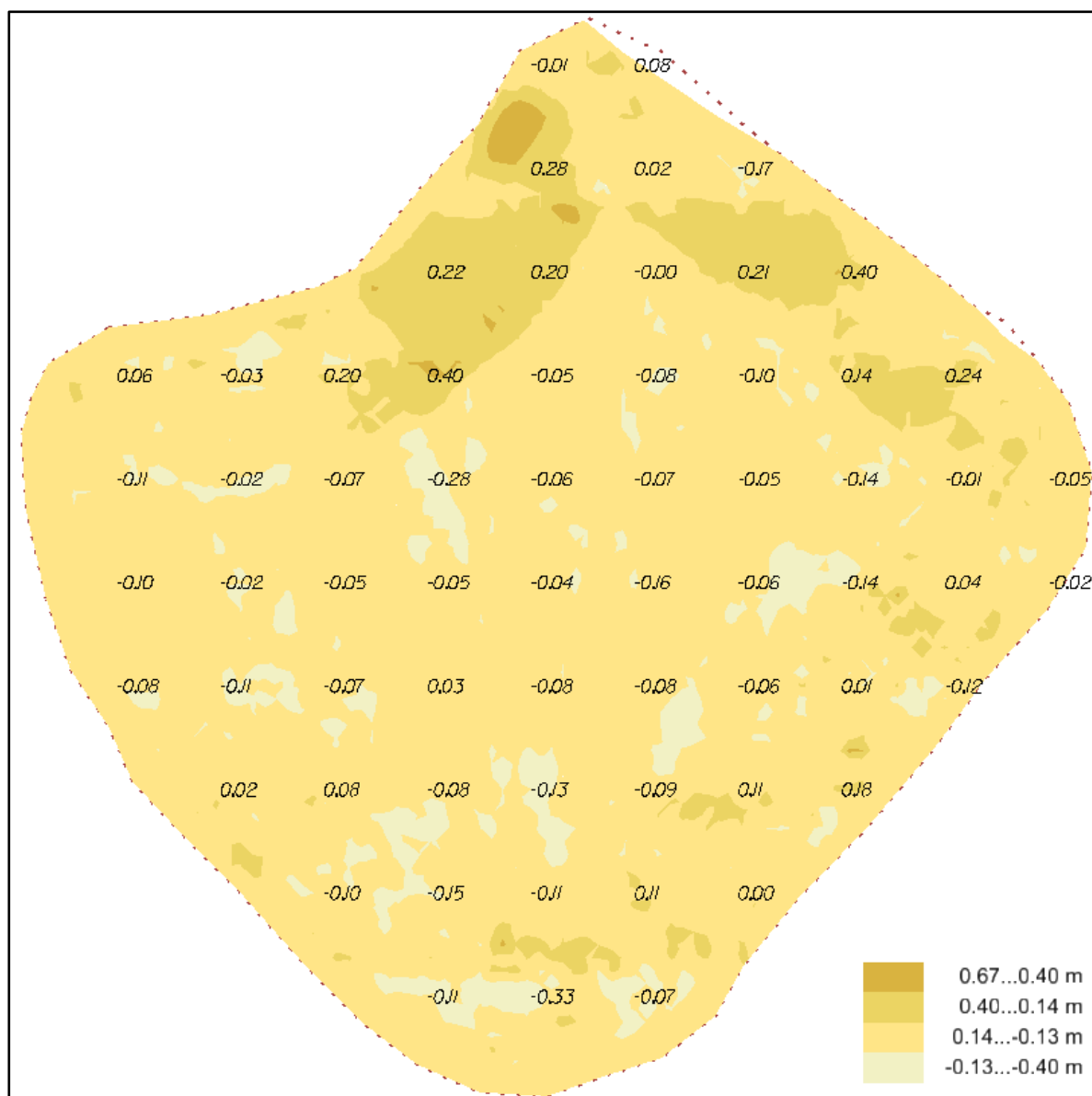
Järgnevas tabelis (Tabel 6) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,18 abs m, mis on  $-0,06$  m võrra madalam kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudelil ja GPS-mudelil erinevus puudub.

Tabel 6 Puistangu 4 mudelite võrdlus

<b>Parameetrid</b>	<b>Droon</b>	<b>GPS</b>	<b>Erinevus</b>
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	942	942	0
Miinumkõrgus, m	75,18	75,24	-0,06
Maksimumkõrgus, m	79,35	79,35	0,00
Punkte mudelis	4347	182	4165
Kolmnurki mudelis	8608	323	8285
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	2386,0	2395,3	-9,3
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>0,4</b>		

Puistangu 4 maht droonimudeli järgi on 2386,0 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 2395,3 m<sup>3</sup>, mis on 9,3 m<sup>3</sup> võrra suurem. Kuna antud juhul on droonimudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud droonimudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 0,4%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse rohkem kui kümnekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeaks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 4 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,40...0,60 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus -0,01 m, kusjuures droonimudeli pind on 2968-s punktis madalam ning 1824-s punktis kõrgem kui GPS-mudeli pind. Kõrguste erinevusi kirjeldab järgnev joonis (Joonis 13). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.



Joonis 13 Puistangu 4 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

### 2.1.5 Puistang 5

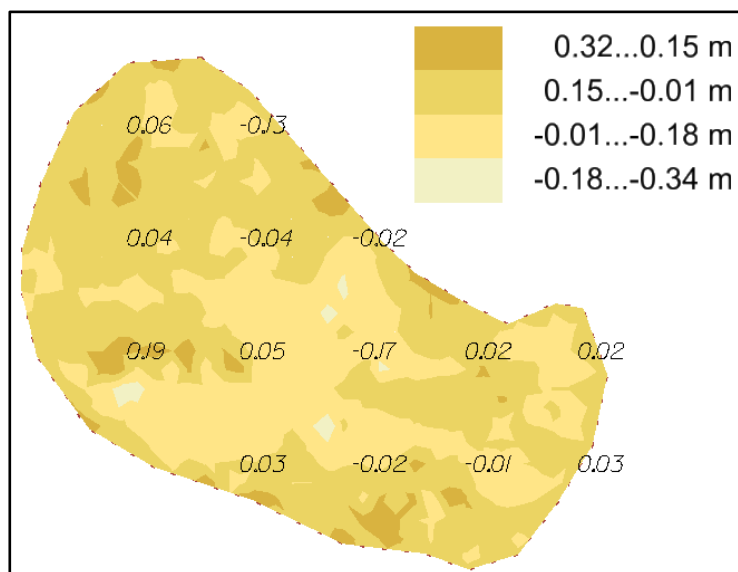
Järgnevas tabelis (Tabel 7) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,18 abs m, mis on 0,04 m võrra madalam kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus – 0,01 m, kusjuures droonimudel on madalam.

Tabel 7 Puistangu 5 mudelite võrdlus

Parameetrid	Droon	GPS	Erinevus
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	126	126	0
Miimumkõrgus, m	75,18	75,22	-0,04
Maksimumkõrgus, m	78,18	78,19	-0,01
Punkte mudelis	648	83	565
Kolmnurki mudelis	1252	108	1144
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	134,1	132,8	1,3
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>1,0</b>		

Puistangu 5 maht droonimudeli järgi on 134,1 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 132,8 m<sup>3</sup>, mis on 1,3 m<sup>3</sup> võrra väiksem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 1,0%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse rohkem kui kümnekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeaks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 5 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,34...0,31 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,01 m, kusjuures droonimudeli pind on 363-s punktis kõrgem ning 266-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguste erinevusi kirjeldab järgnev joonis (Joonis 14).



Joonis 14 Puistangu 5 mudelite kõrguserinevuste paiknemine



### 2.1.6 Puistang 6

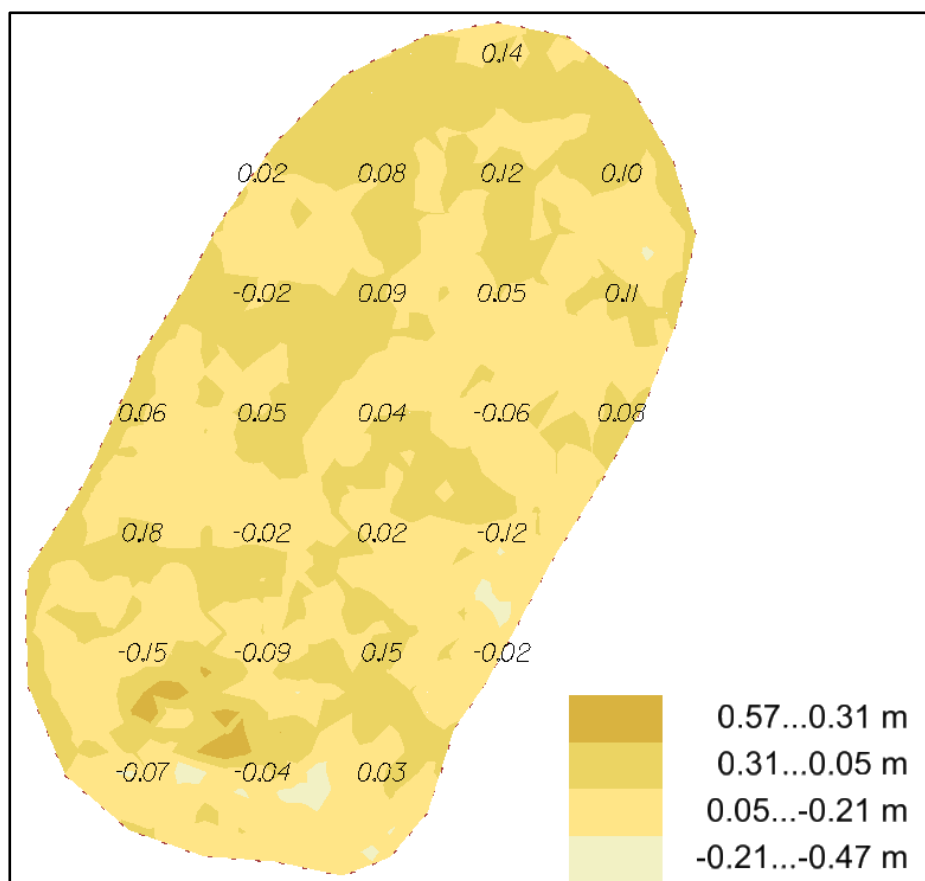
Järgnevas tabelis (Tabel 8) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 75,01 abs m, mis on 0,06 m võrra madalam kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus 0,08 m, kusjuures droonimudel on kõrgem.

Tabel 8 Puistangu 6 mudelite võrdlus

Parameetrid	Droon	GPS	Erinevus
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	227	227	0
Miinimumkõrgus, m	75,01	75,07	-0,06
Maksimumkõrgus, m	78,94	78,86	0,08
Punkte mudelis	1117	80	1037
Kolmnurki mudelis	2178	128	2050
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	392,0	384,2	7,8
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>2,0</b>		

Puistangu 6 maht droonimudeli järgi on 392 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 384,2 m<sup>3</sup>, mis on 7,8 m<sup>3</sup> võrra väiksem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 2,0%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse kuuekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangu 6 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,47...0,57 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,03 m, kusjuures droonimudeli pind on 725-s punktis kõrgem ning 344-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguste erinevusi kirjeldab järgnev joonis (Joonis 15). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.



Joonis 15 Puistangu 6 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

### 2.1.7 Puistangud 7 ja 8

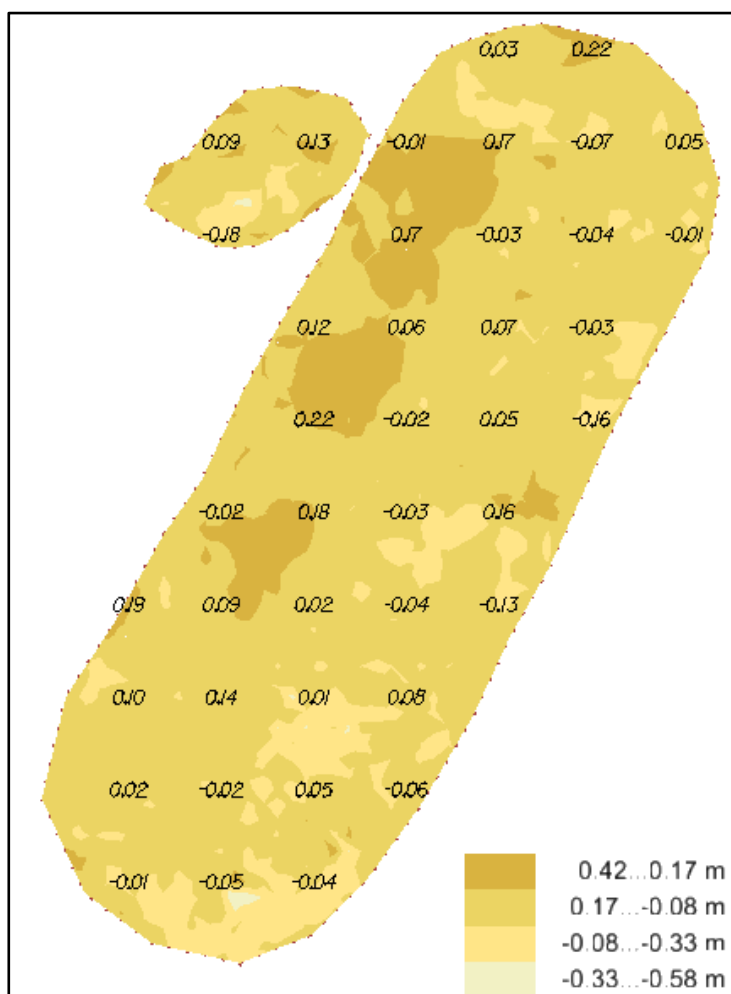
Järgnevas tabelis (Tabel 9) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on puistangu miinimumkõrgus 74,79 abs m, mis on 0,12 m võrra madalam kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus 0,01 m, kusjuures droonimudel on kõrgem.

Tabel 9 Puistangu 7 ja 8 mudelite võrdlus

Parameetrid	Droon	GPS	Erinevus
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	369	369	0
Miinimumkõrgus, m	74,79	74,91	-0,12
Maksimumkõrgus, m	78,93	78,92	0,01
Punkte mudelis	1817	136	1681
Kolmnurki mudelis	3577	237	3340
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	653	642,4	10,6
<b>Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes, %</b>	<b>1,7</b>		

Puistangute 7 ja 8 maht droonimudeli järgi on  $653 \text{ m}^3$ , GPS-mudeli järgi aga  $642,4 \text{ m}^3$ , mis on  $10,6 \text{ m}^3$  võrra väiksem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 1,7%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla  $20\,000 \text{ m}^3$  puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse seitsmekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

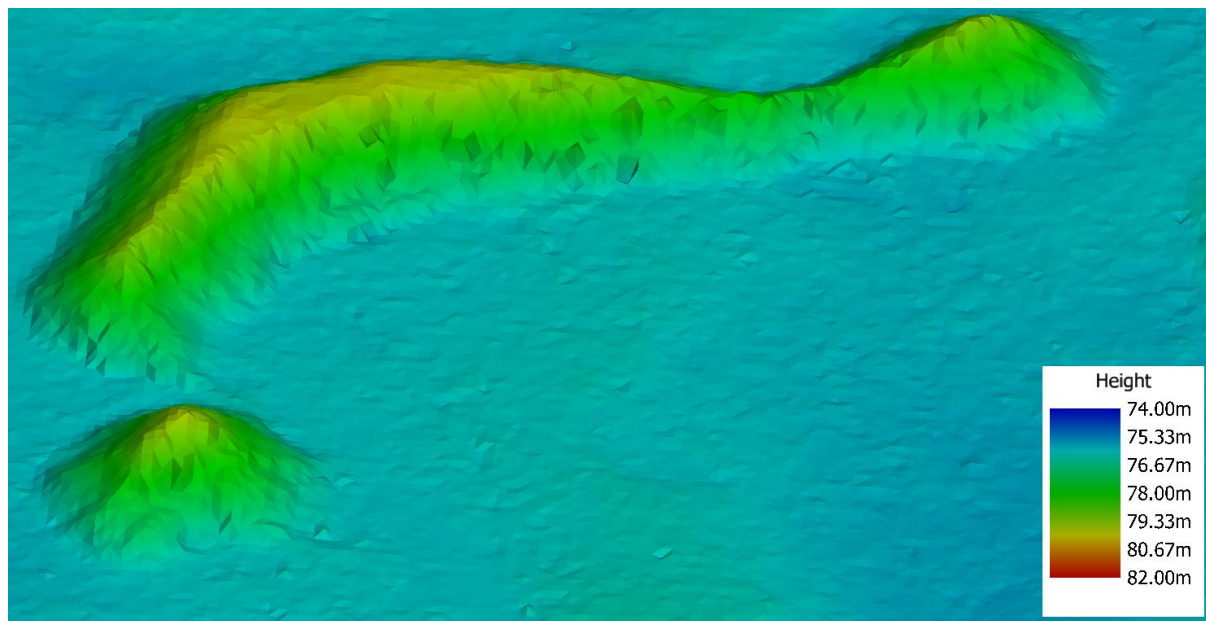
Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad puistangute 7 ja 8 droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus  $-0,58 \dots 0,42 \text{ m}$ . Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus  $0,03 \text{ m}$ , kusjuures droonimudeli pind on 1079-s punktis kõrgem ning 670-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguste erinevusi kirjeldab järgnev joonis (Joonis 16). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.



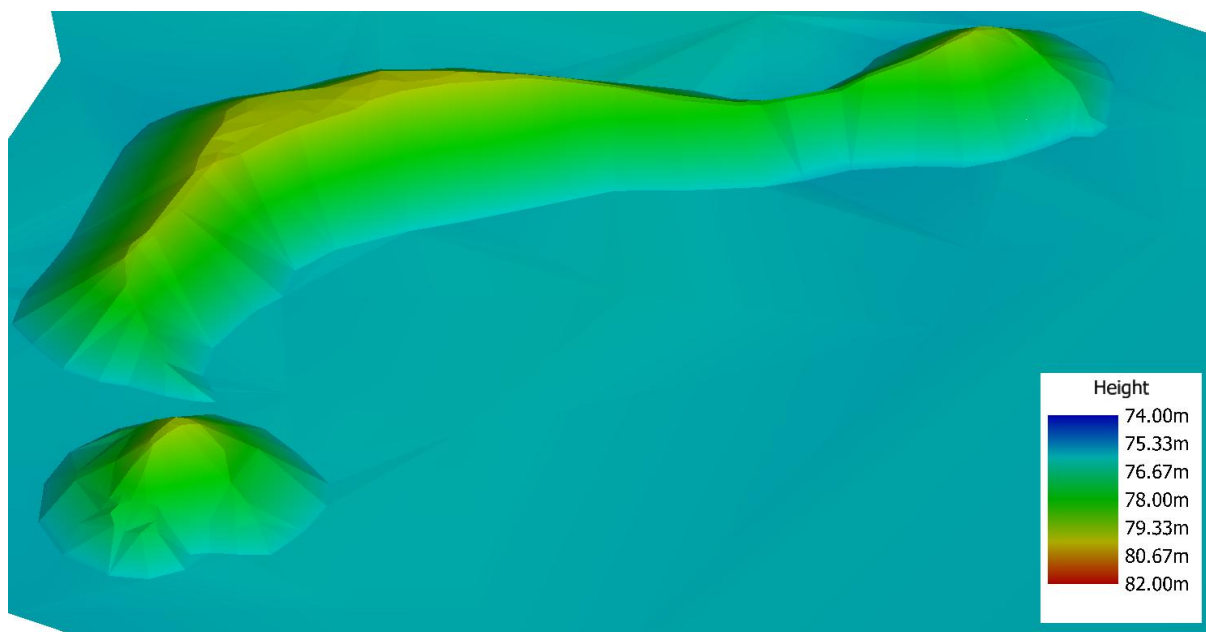
Joonis 16 Puistangute 7 ja 8 mudelite kõrguserinevuste paiknemine

### 2.1.8 Puistangute mõõdistusandmete kokkuvõte

Järgnevatel joonistel eristub droonimudeli ja GPS-mudeli detailsuse vahe väga selgelt (Joonis 17, Joonis 18).



Joonis 17 Puistangud 1 ja 2 3D vaade droonimudelile



Joonis 18 Puistangud 1 ja 2 3D vaade GPS-mudelile

Droonimudeli puhul on puistangul väga palju punkte, ent GPS-mudelis on mõõdistatud peamiselt puistangu ülemine ja alumine serv ning üksikud punktid puistangu peal ning nõlvadel.

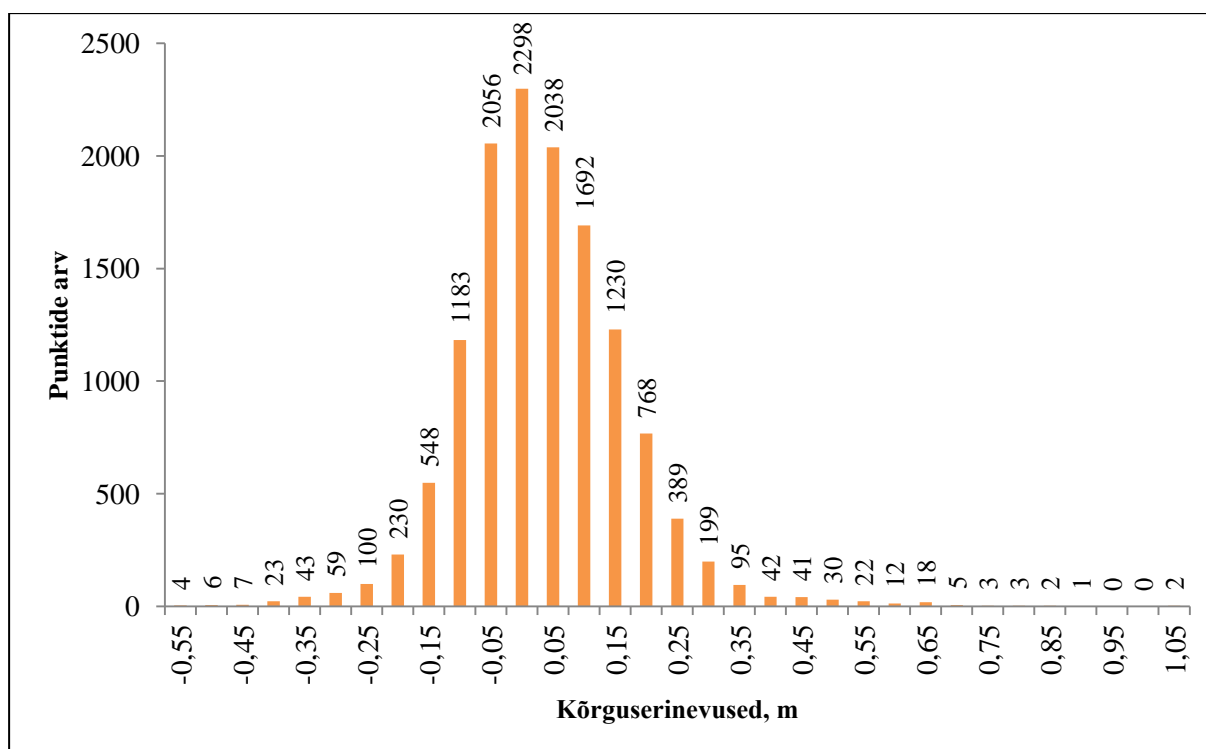
Järgnevas tabelis (Tabel 10) on toodud puistangute parameetrid droonimudeli ja GPS-mudeli erinevusi kokkuvõtavad andmed. Puistangute droonimudelites on punkte kokku 12958, samas kui GPS-mudelites on vaid 883. Puistangute maht droonimudelite korral on kokku 5267,9 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli korral aga 5229,0 m<sup>3</sup>, seega erinevus on 38,9 m<sup>3</sup>, mis teeb suhteliseks erinevuseks väiksema mahu suhtes 0,7%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse rohkem kui kümnekordse varuga, võib droonimudelite alusel määratud mahu lugeda õigeaks.

Tabel 10 Puistangute mudelite erinevusi kokkuvõttev tabel

Parameetrid	Droon	GPS	Erinevus
Puistangu pindala, m <sup>2</sup>	2695	2695	0
Punkte mudelis	12958	883	12075
Kolmnurki mudelis	25289	1270	24019
Puistangu maht, m <sup>3</sup>	5267,9	5229,0	38,9
<b>Suhteline erinevus väiksema tulemuse suhtes, %</b>	<b>0,7</b>		

Puistangute kõigi võrdlusmudelite punktide alusel on keskmine kõrguserinevus 1,5 cm ning mahtude erinevuse ja puistangute kogupindala alusel on kõrguslik erinevus 1,4 cm. Seega droonilt mõõdistatud tulemused on ligi 2 cm võrra kõrgemad GPS mõõdistatud tulemustest. Droonimudeli 2 cm kõrgemal olemine võib olla ka tingitud sellest, et GPS-mõõdistamisel vajub GPS-sau killustiku sisse ning samuti mõjutab droonilt mõõdistamise tulemusi ka killustiku tükisuurus, kuna drooni lennuandmete töötlemisel tekitatakse mõõdistuspunktid ka tühi-mikesse. Samuti tuleb arvestada ka seda, et GPS-mõõdistamisel ronib mõõdistaja puistangu otsa (ja hiljem ka sealt alla), mistõttu liigub materjal puistangus mõõdistaja raskuse tõttu ja ka sellest võivad tuleneda kõrguserinevused.

Järgneval joonisel (Joonis 19) on kujutatud kõigi kaheksa puistangu võrdlusmudelite väärtuste (mudelite kõrguserinevused) histogramm. Histogrammilt on näha erinevate kõrguserinevuste esinemise sagedused. Kõige sagedamini esinevad kõrguserinevused väärtusega -0,05...0,00 m. Samas on näha, et suuremaid erinevusi kui ±0,25 m esineb punktide kogumahtu arvestades harva.



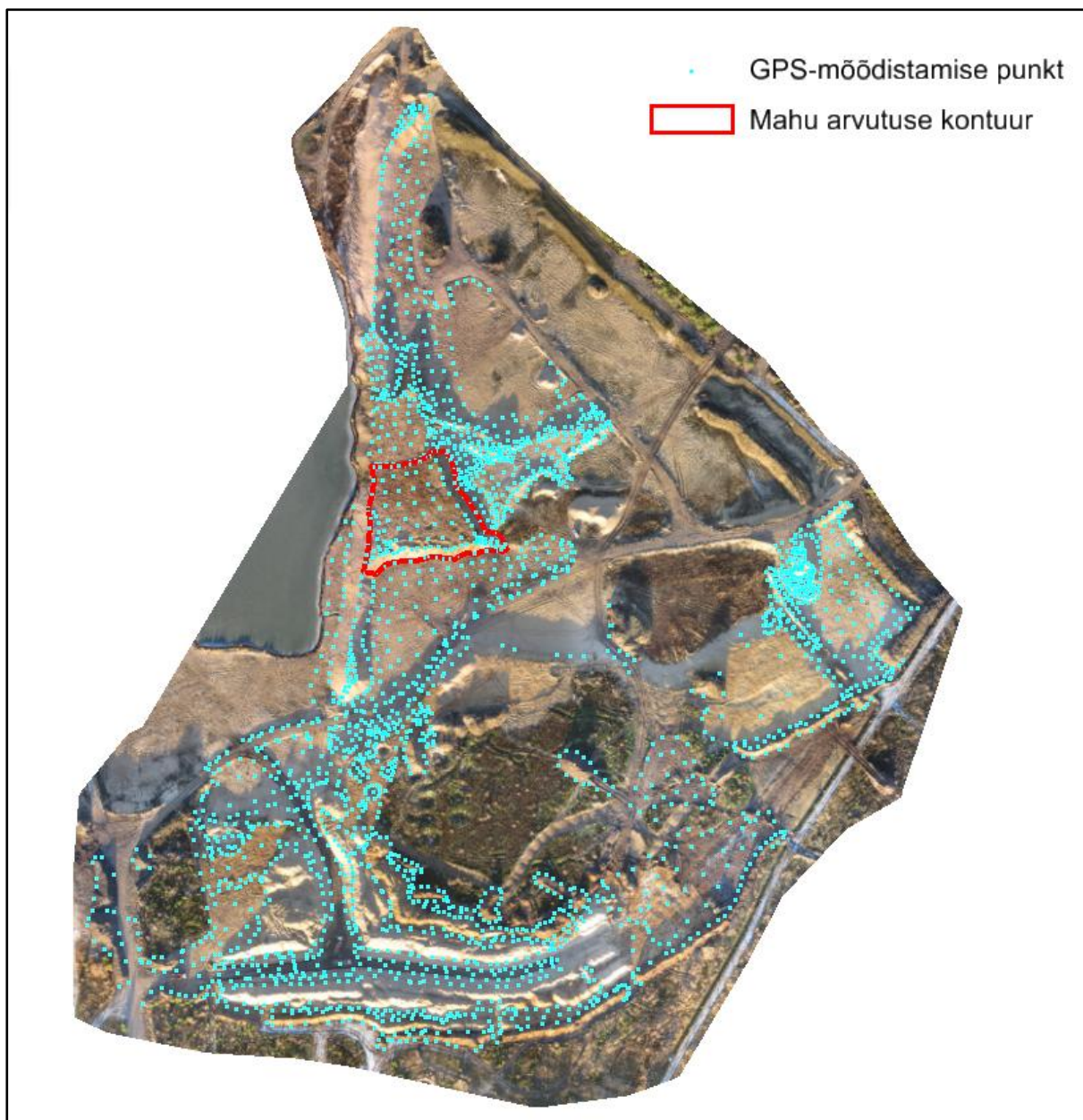
Joonis 19 Puistangute võrdlusmodelite väärtuste histogramm

Kuigi võrdlusmodelite alusel kõiguvad droonimudeli ja GPS-mudeli punktide kõrguserinevused vahemikus  $-0,63 \dots 1,03$  m, on siiski määratud mahtude erinevused lubatud piires, jäädes lubatud suhtelise erinevuse piiresse isegi rohkem kui kümnekordse varuga. Samuti tuleb arvestada sellega, et GPS-mõõdistamine oli teostatud tavapärase mõõdistuspunktide tihedusega ning droonimudeli puhul on tegemist toormudeliga, mida on vähe töödeldud ning mille detailisust on ligi kümme korda vähendatud.

## 2.2 Liivakarjääri mõõdistus

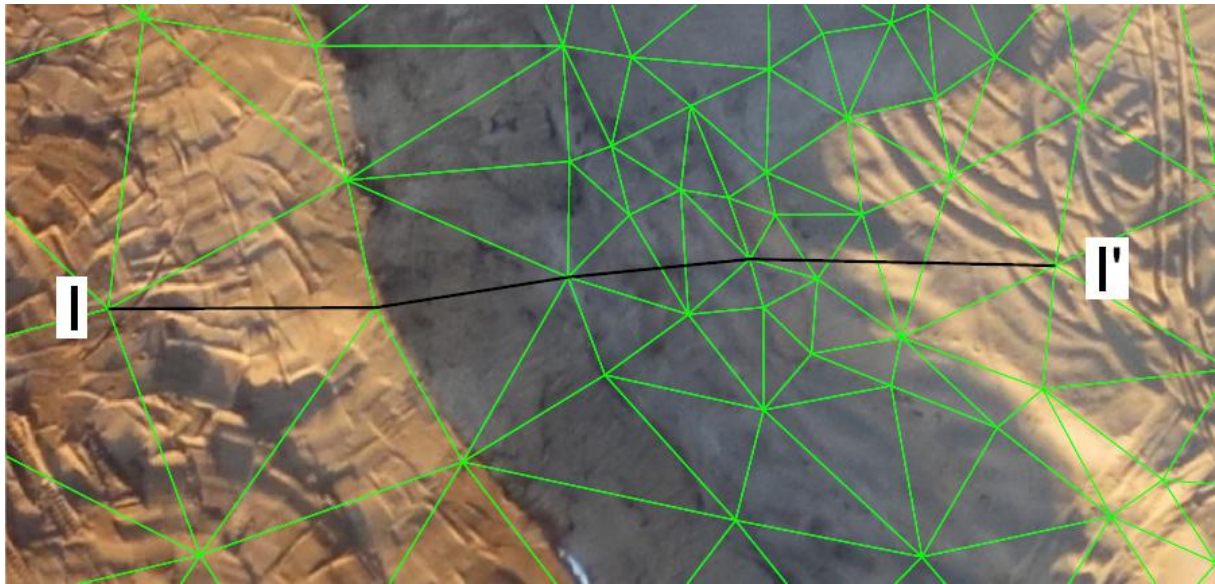
Liivakarjääri mõõdistamine on teostatud 09.12.2014 [28]. GPS-mõõdistamise teel on mõõdistatud vaid võrreldes eelmise mõõdistusega muutunud alade situatsioon. Droonilt mõõdistamine on teostatud piksli suurusega 5,21 cm ning maapinna kontrollpunktide arv alal oli kaheksa [28]. GPS-mõõdistamise teel ei ole mõõdistatud ladude alal puistanguid, mistõttu on käesolevas töös valitud mahu arvutuse kontuur selliselt, et see asuks alal, kus on olemas nii droonilt mõõdistamise andmed kui ka GPS-mõõdistamise andmed. Kasutatud droonimudelis paiknevad kõrguspunktid  $0,50 \times 0,56$  m võrgustikuna (X×Y). Järgmisel joonisel on kujutatud droonilt mõõdistatud ala ning GPS-mõõdistamise punktid (Joonis 20).



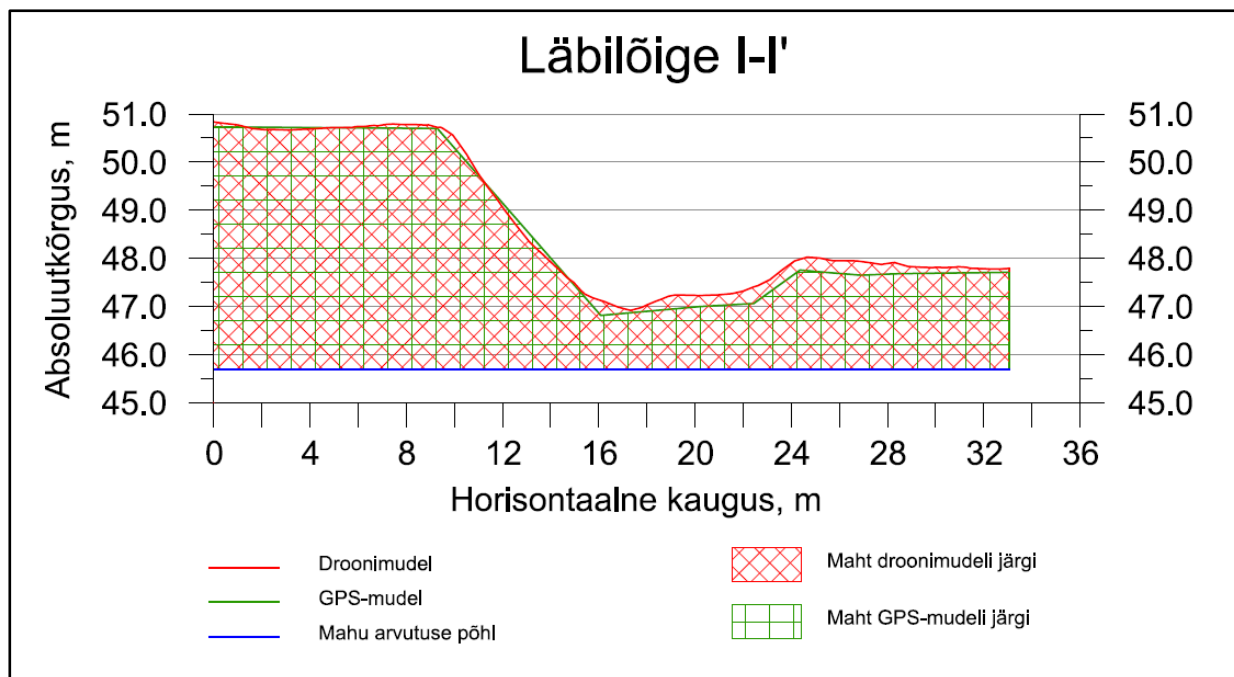


Joonis 20 Liivakarjäari mõõdistus

Sarnaselt puistangute läbilõigete konstrueerimisele on ka liivakarjäari läbilõike konstrueerimisel valitud läbilõike joone murdepunktideks GPS-mõõdistuse punktid (Joonis 21).



Joonis 21 Liivakarjääri läbilõike asukoht



Joonis 22 Liivakarjääri läbilõige I-I'

Läbilõikelt on näha, et valdavalt on droonimudel kõrgemal kui GPS-mudel, maapinnajooned on suhteliselt sarnased ning droonimudeli reljeefijoonel on palju murdepunkte.

Järgnevas tabelis (Tabel 11) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on mahuarvutuse alal miinimumkõrgus 45,41 abs m, mis on 0,05 m võrra



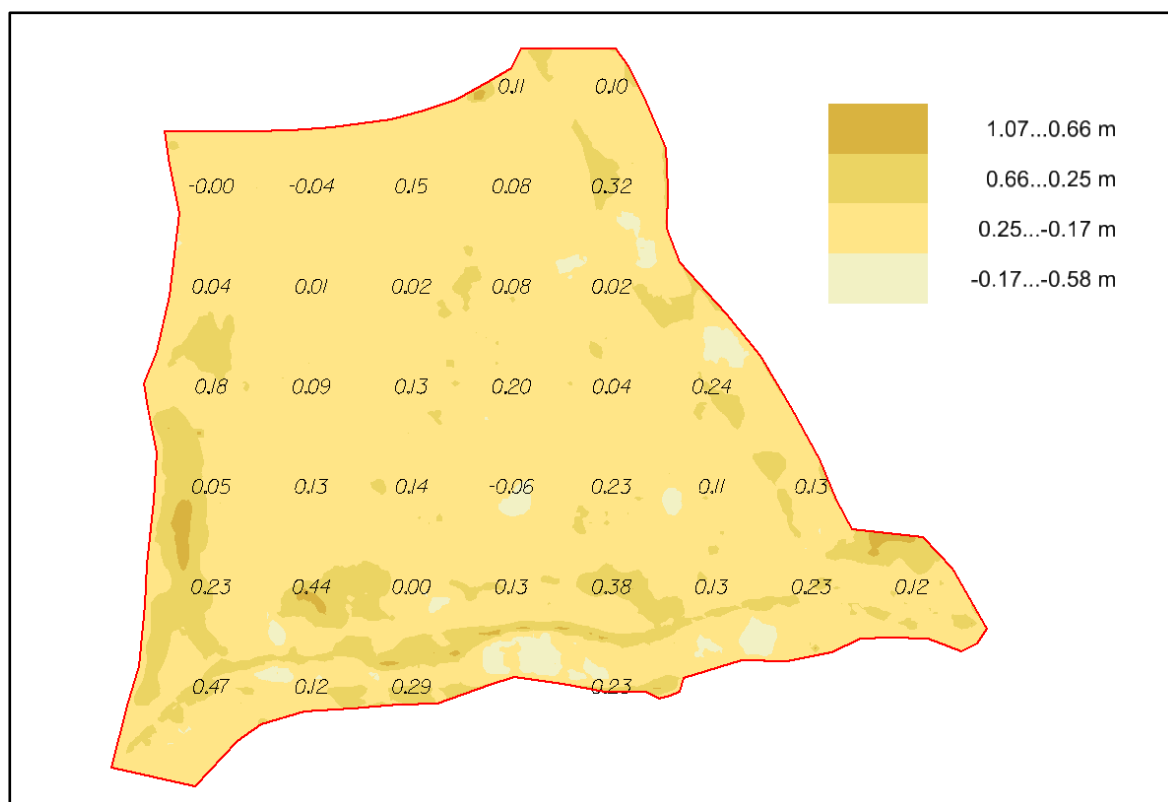
kõrgem kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus 0,13 m, kusjuures droonimudel on endiselt kõrgem.

Tabel 11 Liivakarjääri mudelite võrdlus

Parameetrid	Droon	GPS	Erinevus
Pindala, m <sup>2</sup>	3796	3796	0
Miimumkõrgus, m	45,41	45,36	0,05
Maksimumkõrgus, m	52,42	52,29	0,13
Punkte mudelis	14549	232	14317
Kolmnurki mudelis	28999	253	28746
Maht, m <sup>3</sup>	19534,5	19090,9	443,6
<b>Suhteline erinevus väiksema tulemuse suhtes, %</b>	<b>2,3</b>		

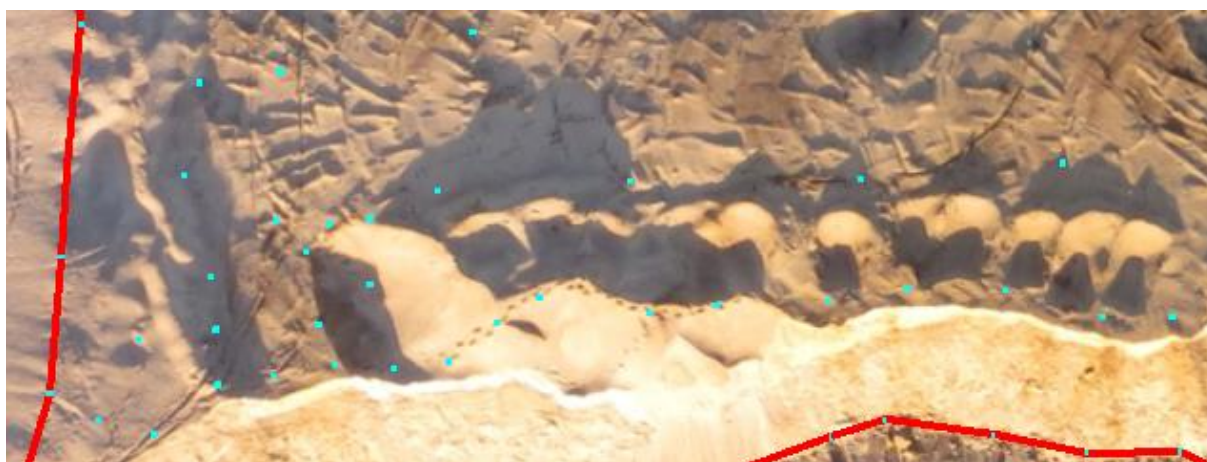
Mahu arvutusel on alumiseks tasapinnaks võetud tasapind kõrgusel 45 abs m, kuna sellisel juhul on nii GPS-mudel kui droonimudel kõrgemal. Mahu arvutuse kontuuris on maht droonimudeli järgi on 19534,5 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 19090,9 m<sup>3</sup>, mis on 443,6 m<sup>3</sup> võrra väiksem. Kuna antud juhul on GPS-mudeli puhul puistangu maht väiksem, on suhteline erinevus arvatud GPS-mudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 2,3%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse ligi kuuekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad mahud droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguste erinevused vahemikus -0,58...1,07 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,12 m, kusjuures droonimudeli pind on 12136-s punktis kõrgem ning 2076-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguserinevuste paiknemist kirjeldab järgnev joonis (Joonis 23).



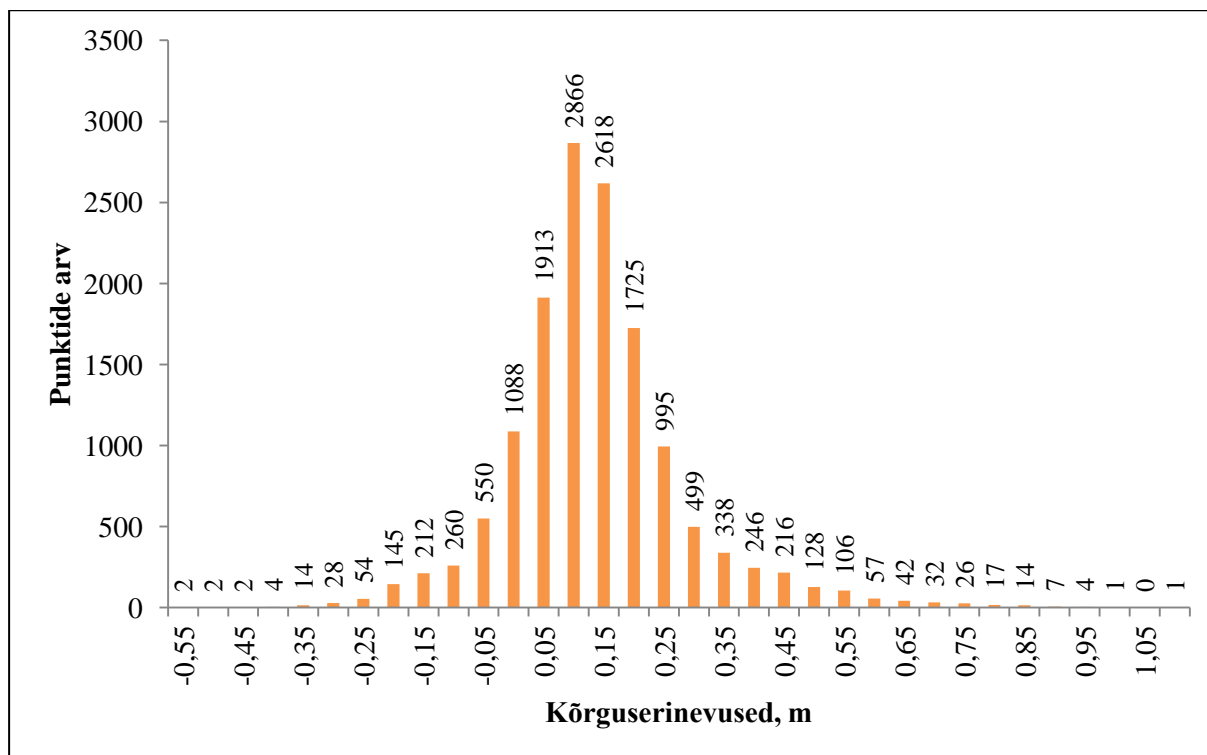
Joonis 23 Liivakarjäri mudelite kõrguserinevuste paiknemine

Eeltoodud jooniselt on näha, et suuremad kõrguste erinevused paiknevad ala lõunaosas. Järgneval joonisel (Joonis 24) on väljavõtte ala lõunaosast, kus on näha ortofoto ning GPS-mõõdistuspunktid, ortofoto järgi asub mahuarvutuse kontuuri lõunaosas palju väikeseid lohukesi, ent GPS-mõõdistamisel pole neid lohukesi mõõdetud. GPS-mõõdistamisel on punktide vahekaugus ca 10 m.



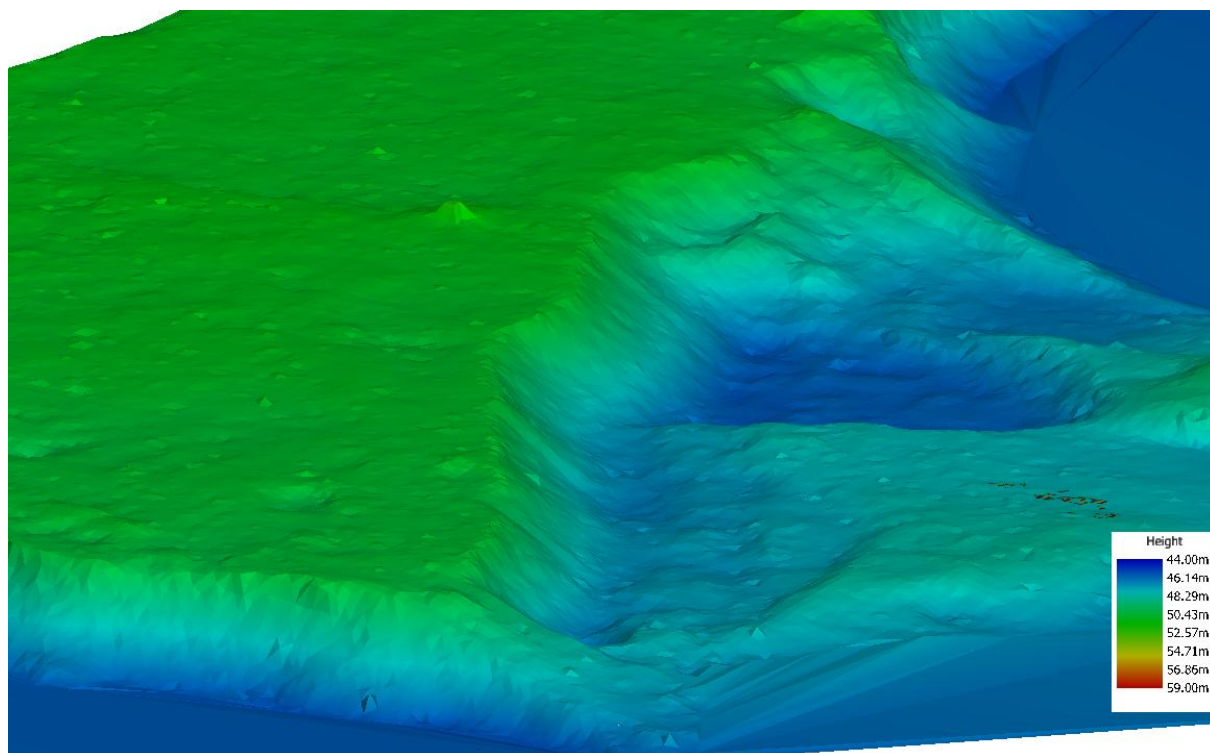
Joonis 24 Liivakarjäri mahuarvutuse ala lõunakülg

Järgneval joonisel (Joonis 25) on esitatud võrdlusmudeli väärtuste histogramm, millelt on näha erinevate kõrguserinevuste esinemise sagedus. Kõige sagedamini esinevad kõrguserinevused väärtusega 0,05...0,10 m. Droonimudel on harvadel juhtudel GPS-mudelist madalam rohkem kui 0,25 m võrra, aga 1734-l korral on droonimudel rohkem kui 0,25 m võrra kõrgemal kui GPS-mudel.

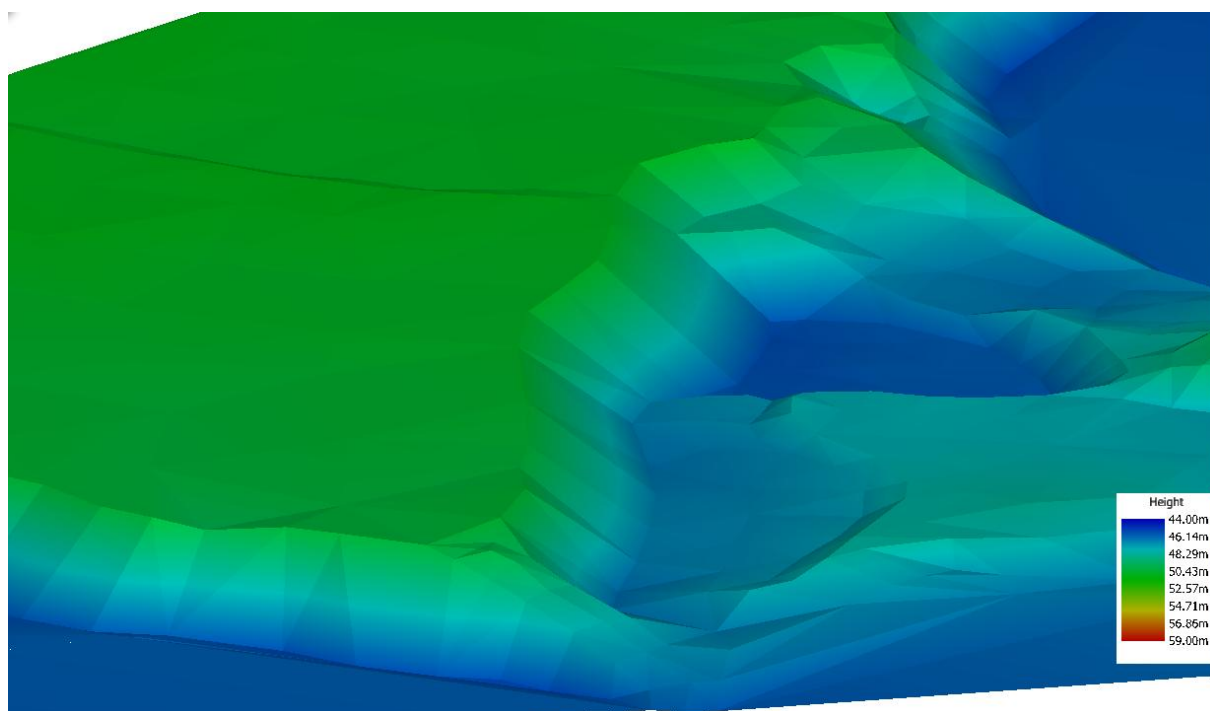


Joonis 25 Liivakarjääri võrdlusmudeli väärtuste histogramm

Droonimudeli ja GPS-mudeli detailsust illustreerivad järgnevad joonised (Joonis 26, Joonis 27).



Joonis 26 Liivakarjääri 3D vaade droonimudelile



Joonis 27 Liivakarjääri 3D vaade GPS-mudelile

Droonimudeli 3D vaatel on näha, et kaevandamata maavara peal on mõõdistatud üks kõrgem positiivne pinnavorm, mida GPS-mudelil ei ole ning samuti mõned suuremad lohud, mida

GPS-mudeli vaatel näha ei ole. Kuigi GPS-mõõdistamisel on maapinna reljeef väga üldistatud, on üksikute eranditega siiski droonimudeli ja GPS-mudeli reljeef suhteliselt sarnane.

## 2.3 Lubjakivikarjääri mõõdistus

Lubjakivikarjääri mõõdistamine on teostatud 02.10.2013 [29]. GPS-mõõdistamise teel on mõõdistatud vaid võrreldes eelmise mõõdistusega muutunud alade situatsioon. Lubjakivikarjääri eripära võrreldes liivakarjääriga on see, et esmalt kobestatakse maavara ning seejärel transportitakse kobestatud kivim purustisse. Liivakarjääris aga reeglina maavara väljamise käigus (ehk maavara looduslikust seisundist eemaldamise käigus) toimub koheselt ka maavara laadimine. See tähendab, et liivakarjääri puhul on kaeve-ees maavara looduslikus olekus, ent lubjakivikarjääri puhul on kaeve-ees juba looduslikust seisundist eemaldatud maavara ehk kobestatud kivim. Järgmisel joonisel on kujutatud droonilt mõõdistatud ala ning GPS-mõõdistamise punktid (Joonis 28).



Joonis 28 Lubjakivikarjääri mõõdistus



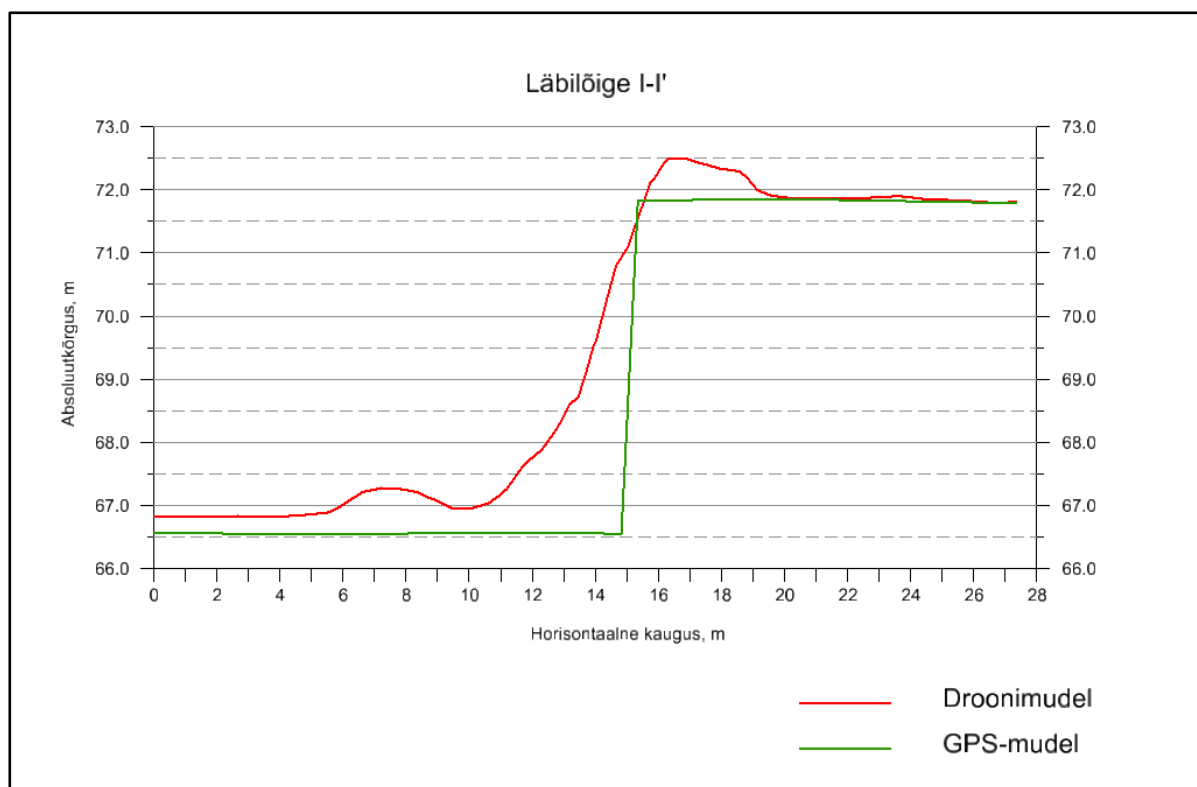
Droonilt mõõdistamine on teostatud piksli suurusega 5,1 cm ning maapinna kontrollpunkte oli alale paigutatud kümme [29]. Kasutatud droonimudelis paiknevad kõrguspunktid 0,50×0,50 m võrgustikuna (X×Y).

Lubjakivikarjääri puhul on läbilõige tehtud kaeve-est (Joonis 29).



Joonis 29 Lubjakivikarjääri läbilõike asukoht

Läbilõikelt (Joonis 30) on näha, et droonimudeli ja GPS-mudeli maapinnajooned on vägagi erinevad, GPS-mudeli puhul on astangu kalle sisuliselt 90 kraadi, ent droonimudeli puhul on nõlv oluliselt laugem, samuti asub astangu lael poole meetri kõrgune puistang ning astangu põhjal on samuti droonimudeli maapinnajoon kõrgemal kui GPS-mudeli maapinnajoon. Vaadates ortofotot läbilõike asukohas (Joonis 29), on näha, et nii astangu lael kui põhjal on koostatud kivim. Seega droonimudelis kajastub nn maakate ehk kõik lennu ajal esinevad pinnavormid, ent GPS-mudelis on kajastatud ainult looduslikust olekust eemaldamata maavara.



Joonis 30 Lubjakivikarjääri läbilõige

Eeltoodust tulenevalt on mahu arvutuse kontuur valitud kaevandatud alas selliselt, et ta asuks kaeve-eest mõnevõrra kaugemal. Mahu arvutamisel on ülemise tasapinnana kasutatud kõrgusel 72 abs m asuvat tasapinda. Nimetatud kõrgusel asub kõrvalolev astangu lagi enne kaevandamist.

Järgnevas tabelis (Tabel 12) on toodud drooni- ja GPS-mudeli võrdlus. Tabelist on näha, et droonimudeli korral on miinimumkõrgus 66,59 abs m, mis on 0,20 m võrra kõrgem kui GPS-mudelil. Maksimumkõrguse puhul on droonimudeli ja GPS-mudeli erinevus aga 1,05 m, kusjuures droonimudel on endiselt kõrgem.

Tabel 12 Lubjakivikarjääri mudelite võrdlus

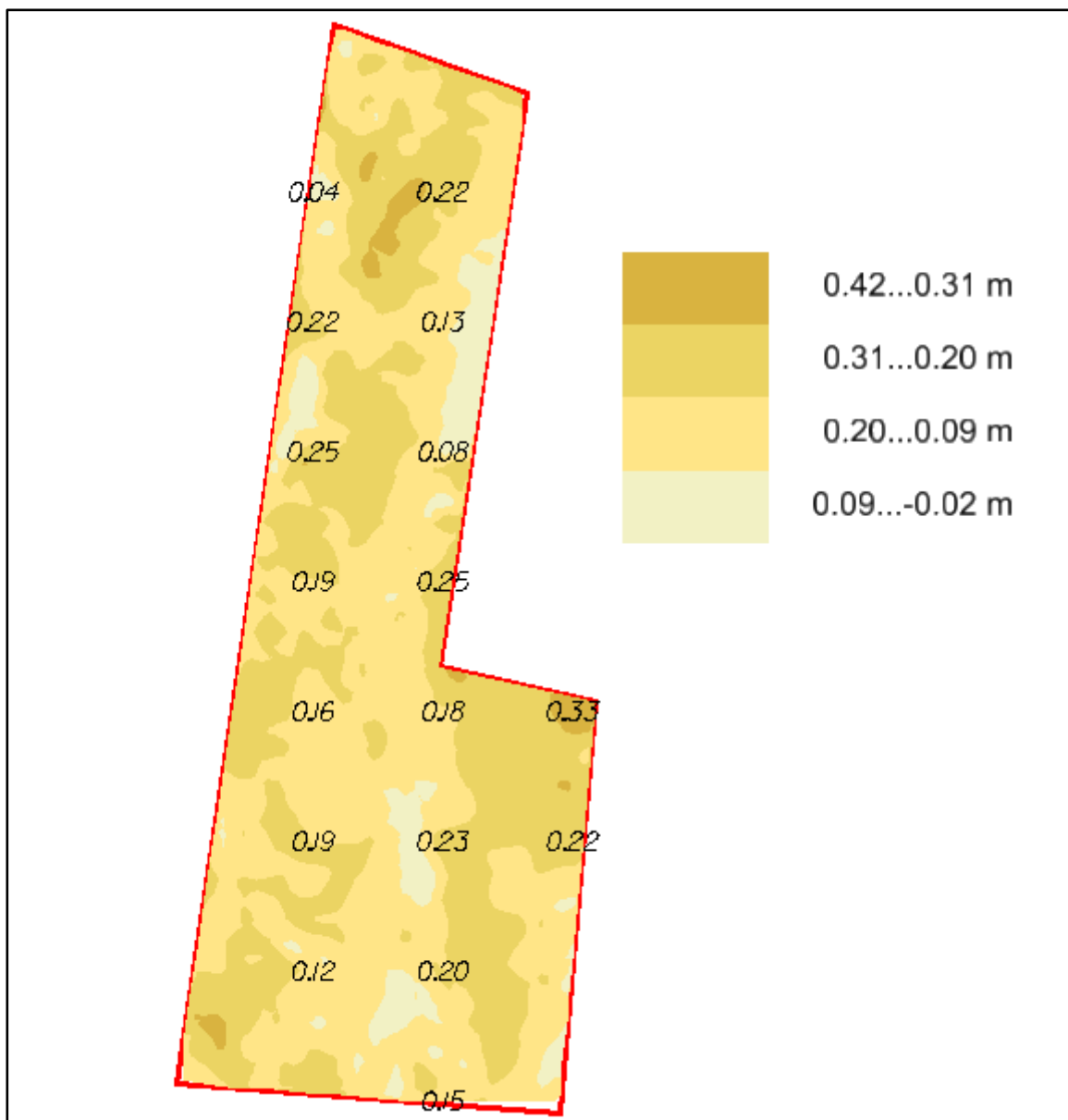
<b>Parameetrid</b>	<b>Droon</b>	<b>GPS</b>	<b>Erinevus</b>
Pindala, m <sup>2</sup>	1671	1671	0
Miinumkõrgus, m	66,59	66,39	0,20
Maksimumkõrgus, m	72,93	71,88	1,05
Punkte mudelis	9920	96	9824
Kolmnurki mudelis	19720	159	19561
Maht, m <sup>3</sup>	8738,9	9053,4	-314,5
<b>Suhteline erinevus väiksema tulemuse suhtes, %</b>	<b>3,6</b>		

Arvutatud maht droonimudeli järgi on 8738,9 m<sup>3</sup>, GPS-mudeli järgi aga 9053,4 m<sup>3</sup>, mis on 314,5 m<sup>3</sup> võrra suurem. Kuna antud juhul on droonimudeli puhul maht väiksem, on suhteline erinevus arvutatud droonimudeli mahu suhtes. Suhteline erinevus väiksema mahu suhtes on 3,6%. Lähtudes markšeideritöö korrast, on lubatud suhteline erinevus alla 20 000 m<sup>3</sup> puhul 12% (Tabel 2). Arvestades, et antud tulemus jääb lubatud suhtelise erinevuse piiresse kolmekordse varuga, võib droonimudeli alusel määratud mahu lugeda õigeaks.

Võrdlusmudeli andmetel varieeruvad droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguserinevused vahemikus -0,02...0,42 m. Võrdlusmudeli punktide järgi on keskmine kõrguste erinevus 0,18 m, kusjuures droonimudeli pind on 6415-s punktis kõrgem ning 11-s punktis madalam kui GPS-mudeli pind. Kõrguserinevuste paiknemist kirjeldab järgnev joonis (Joonis 31). Positiivsed arvud näitavad, kus droonimudeli pind on kõrgemal kui GPS-mudeli pind, negatiivsed numbrid näitavad vastupidist olukorda.

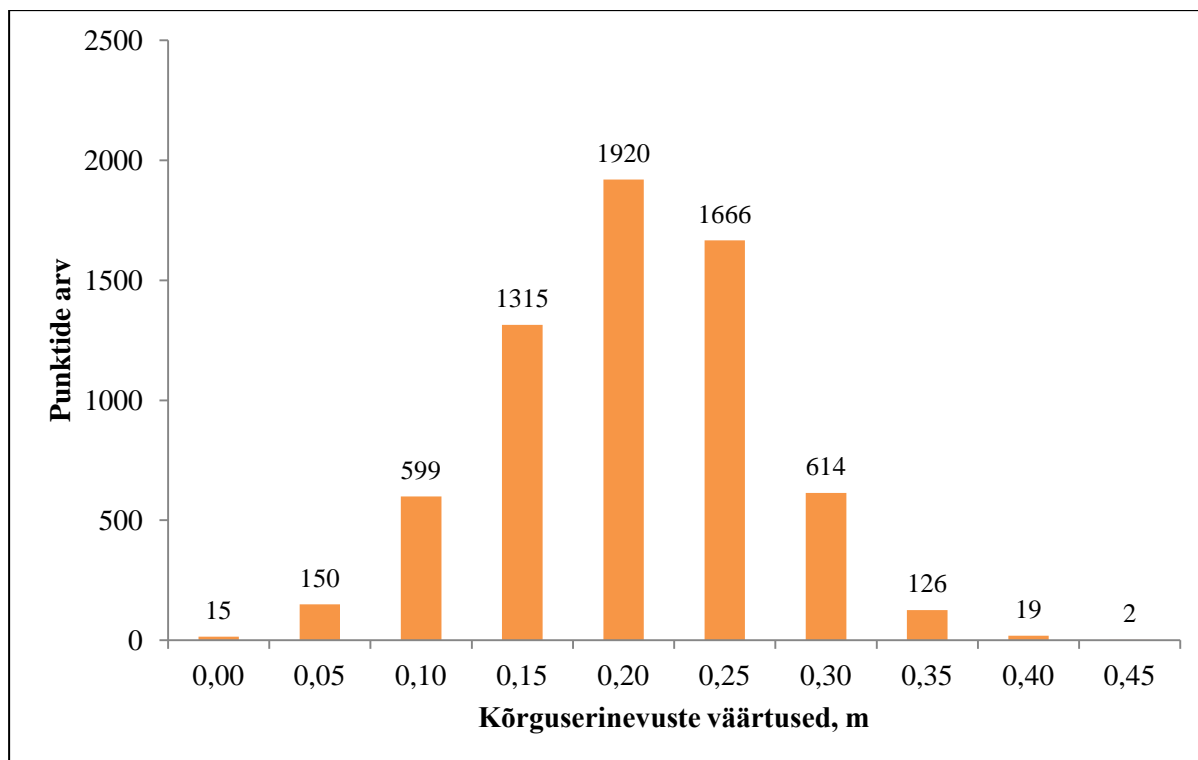
Oluline on tähele panna, et antud juhul on arvutatud maht selliselt, nagu arvutatakse markšeiderimõõdistamise käigus kaevandatud mahtu, ehk siis on lahutatud eelmise mõõdistuse maapinnast käesoleva mõõdistuse maapind (kõrgemast madalam). Kuna droonimudel on reeglina kõrgem, siis tuleb ka mahtude arvutamisel droonimudeli korral kaevandatud maht väiksem.





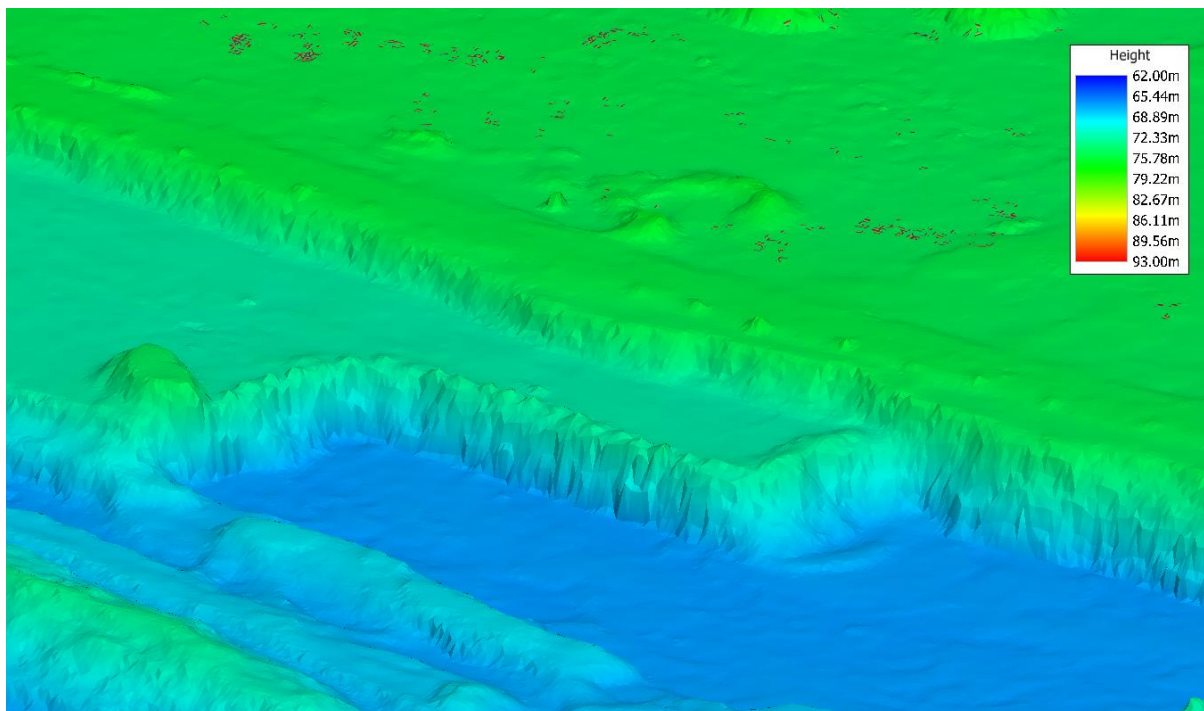
Joonis 31 Lubjakivikarjääri mudelite kõrguserinevuste paiknemine

Järgneval joonisel (Joonis 32) on toodud lubjakivikarjääri võrdlusmudeli väärtuste histogramm, millelt on näha kõrguserinevuste esinemise sagedus. Kõige sagedamini esinevad kõrguserinevused on vahemikus 0,16...0,20 m.

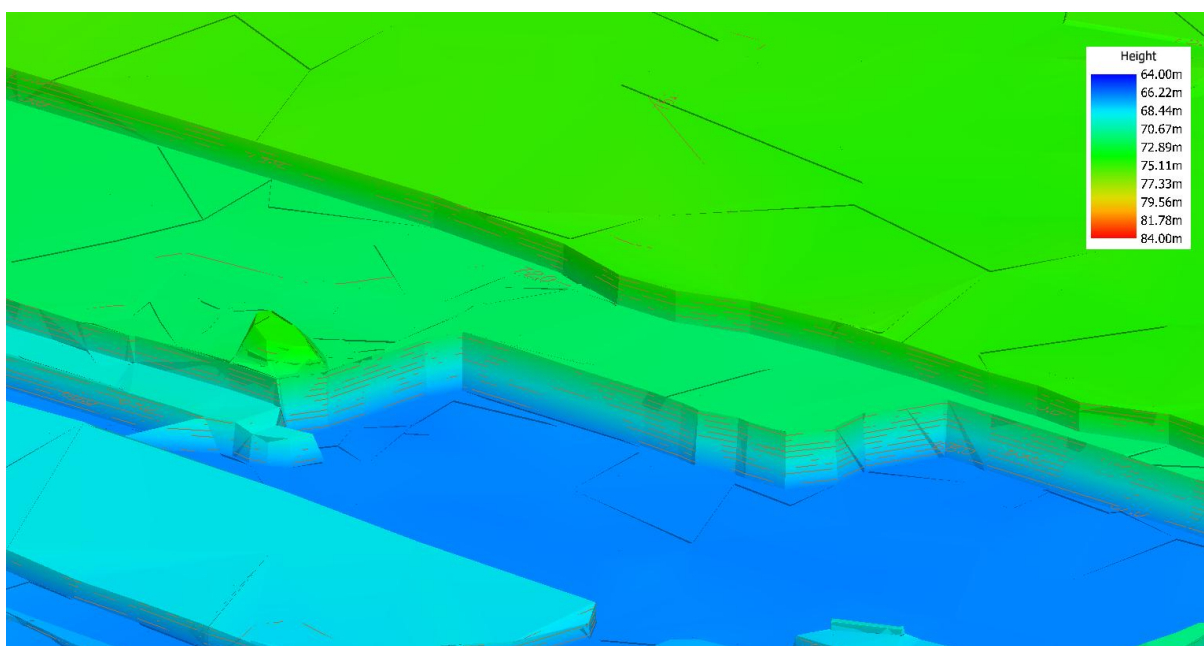


Joonis 32 Lubjakivikarjääri võrdlusmodeli väärtuste histogramm

Järgnevad joonised (Joonis 33, Joonis 34) kirjeldavad droonimudeli ja GPS-mudeli pinnamudelite detailsuse erinevust. Esimeselt jooniselt on näha, et droonimudeli puhul on astangu joonel palju murdepunkte ning astangu nõlval paiknevad samuti mõõdistuspunktid. Teisel joonisel on aga astang suhteliselt lihtsa ehitusega, astangu joonel on üksikud murdepunktid ning astangu keskele pole punkte võetud. Samuti on näha, et GPS-mudeli puhul ei kajastu mudelis looduslikust seisundist eemaldatud maavara puistangud, droonimudelis on aga nii astangu lael kui põhjal puistangud kobestatud maavaraga. Samal põhjusel on GPS-mudelis astangud järsud, droonimudelis aga laugemad.



Joonis 33 Lubjakivikarjääri ee 3D vaade droonimudelile



Joonis 34 Lubjakivikarjääri ee 3D vaade GPS-mudelile

## 2.4 Andmete manipuleeritavus

Lähtudes käesolevas töös kasutatud droonimudelite punktide tihedast paiknemist (ca iga 0,5 m tagant) on droonimudel is kõrguste muutmine suhteliselt keeruline, kuna punkte on väga

palju. Iga GPS-mõõdistamise punkti kohta peaks muutma 9...100 droonimudeli punkti. Juhul, kui andmed on juba mudelisse eksporditud, on mõlema tehnoloogia korral võimalik andmeid muuta, kuid droonimudeli muutmiseks tuleb teha oluliselt rohkem tööd. Lisaks pole droonilt mõõdistamise korral võimalik varjata pindalalist piiri ületamist, kuna fotolt paistab kõik välja ning fotot nihutada pole ka mõtet, kuna sel juhul nihkub kaevandamispiir vastaspiiri suhtes.

## **2.5 Drooni eelised ja puudused**

Droonilt mõõdistamise peamiseks eeliseks on võimalus lühikese aja jooksul kaardistada suure pindalaga alad ning saada alade kohta detailsed ortofotomosaiigid, kõrgusandmed jne. Samuti võib drooni eelisena tuua välja andmete keerulise manipuleeritavuse ning ka mõõdistamise objektiivsuse, kuna mõõdistuspunktide asukoht ja arv ei sõltu inimese hinnangust ega mõõdistamiskogemusest, vaid punktid paiknevad võrgustikuna.

Droonilt mõõdistamise puudusena tuleb välja tuua selle sõltuvus ilmastikutingimustest, kuna vihma ja tugeva tuulega lennata ei saa. Samuti on lennu kõrgusest ja kaardistatava ala asukohast sõltuvalt vajalik taotleda lennuluba, kusjuures kõrgemal kui 150 m lendamise korral tuleb lennuloa taotlus esitada vähemalt seitse tööpäeva enne lendu ning kontrollitavas õhuruumis ja piirangutega alal lendamiseks madalamal kui 150 m, tuleb lennuluba taotleda vähemalt kolm tööpäeva enne lendu [30]. Reeglina jääb drooni lennukõrgus alla 150 m, kuna suurema täpsuse saavutamiseks tuleb lennata madalamal. Arvestades ilmaennustuste täidminekut, on aga kolm tööpäeva tegelikult suhteliselt raske ette prognoosida, kas ilmastikutingimused lendamiseks on sobivad. Lisaks tuleb puudusena välja tuua see, et drooni lennukordade arv on limiteeritud (eBee'1 nt 200 lendu [26]).

Seoses ametiasutustes kehtiva nulltolerantsiga mäeeraldise piiri sügavuti ületamise suhtes on viimasel ajal markšeiderid hakanud järjest rohkem välja märkima ka mäeeraldise põhja ehk lubatud sügavust, kuhumaani tohib kaevandada, seda aga droonitehnoloogiat kasutades teha ei saa. Droonilt mõõdistamist ei saa kasutada ka veealuse kaevandamise mõõdistamiseks ega allmaamõõdistustel.

Viimasest maapõuealase riigikohtu lahendist kaevandatud mahtude määramise suhtes tuleb ka see, et GPS-mõõdistamise tulemusi ei saa kasutada kaevandatud koguste tõendamisel [31], kuna mõõteseadusest tulenevalt peaks mõõtevahend olema jälgitavalt kalibreeritud [32]. GPS-seadet pole aga võimalik taadelda ega kalibreerida, samuti pole võimalik drooni kalib-

reerida. Lisaks pärsib drooni kasutamist ka kehtiv ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise kord, millest tulenevalt tuleb mõõdistamisvõrk siduda kahe lähtepunktiga, droonilt mõõdistamise korral seda aga teha ei saa. Kuna uut geodeetiliste uurimistööde tegemise korra redaktiooni pole avalikustatud, pole teada, kas uue korra kohaselt võib drooni mõõdistamisel kasutada või mitte.

### **2.6 Tulemused**

Valmistoodangu puistangute puhul varieerus mahtude erinevus vahemikus 0,4...5,0%, kusjuures liites kõikide puistangute mahud kokku, tuli erinevuseks kõigest 0,7%. Kõige suurem oli mahtude erinevus puistangu 1 korral, tõenäoliselt on suur erinevus tingitud sellest, et puistangu reljeef oli väga ebakorrapärane ning GPS-mõõdistamisel on reljeef üldistatud. Droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguserinevused kõiguvad vahemikus  $-0,63 \dots 1,03$  m, keskmiselt on droonimudel 0,02 m võrra GPS-mudelist kõrgem. Puistangu 1 puhul oli keskmine kõrguserinevus kõige suurem  $-0,06$  m, kuid seegi jääb lubatud 0,10 m piiresse. Kuigi mahtude ja ka keskmise kõrguserinevuse suhtes jäävad tulemused lubatud piiridesse, on siiski kõrguserinevuste varieeruvus suhteliselt suur ning selliselt saadud mõõdistamisandmeid mäeeraldisel plaani koostamisel kasutada ei tohiks. Samas arvestades mahtude väikest erinevust ja kiiret tulemuste saamist võiks droonilt mõõdistamist kasutada puistangute mahtude määramisel, kui kaevandaja kasutab tulemusi enda otstarbeks (nt tootmise planeerimisel jms). Lisaks tulemuste hindamisel arvestada ka seda, et GPS-mõõdistamine oli teostatud tavapärase mõõdistuse tihedusega, mistõttu on reljeef väga üldistatud ning samuti ka seda, et droonimudeli koostamisel ei ole punktide filtreerimisel kasutatud tarkvara kõiki võimalusi, seega võib tihedama GPS-mõõdistamise punktide võrgu ja drooniantmete suurema töötlemisega saavutada täpsemaid tulemusi. Samuti tuleb arvestada ka seda, et esialgset droonilt mõõdistamise detailsust on vähendatud umbes kümme korda, mis omakorda mõjutab saadud tulemuste täpsust.

Liivakarjääri puhul tuli mahu arvutuse kontuuris mahtude suhteliseks erinevuseks 2,3%, mis jääb markšeideritöö korras lubatud erinevuse piiresse rohkem kui neljakordse varuga. Mudelite kõrguserinevused varieerusid vahemikus  $-0,58 \dots 1,07$  m, keskmiselt on droonimudel 0,12 m võrra kõrgem kui GPS-mudel. Liivakarjääri puhul kõiguvad kõrguserinevused enam-vähem samas vahemikus kui puistangute puhul, aga mudelite keskmine kõrguserinevus on ligi kuus korda kõrgem kui puistangute mudelite keskmine kõrguserinevus. Keskmine kõrguserinevus ei jää lubatud 0,10 m piiresse. Kuigi mahtude erinevus jääb lubatud piiridesse, on siiski

kõrguserinevuste varieeruvus suhteliselt suur ning selliselt saadud mõõdistamisandmeid mäeeraldise plaani koostamisel kasutada ei tohiks. Eriti arvestades seda, et mäeeraldise piiri sügavuti ületamisel kehtib nulltolerants, ei ole tolereeritav see, et tegelik karjääri põhi osades punktides võib olla 0,58 m allpool või 1,07 m ülalpool. Kuid nagu joonistelt (Joonis 26, Joonis 27) näha oli, paiknesid GPS-mõõdistamisel mõõdistuspunktid hõredalt ning osasid pinnavorme polnud üldse mõõdistatud. Kindlasti mängib antud juhul rolli ka see, et droonimudeli puhul on tegemist toormudeliga ning kõiki andmete töötlemisvõimalusi pole kasutatud, ent droonimudeli 3D vaates näha olevad väikesed pinnavormid (suuremad muhud ja lohud) ei koosne üksikutest punktidest, seega ei saa tegemist olla nn müraga. Tõenäoliselt mõjutas liivakarjääri droonimudeli täpsust ka see, et lennatud oli vaid ühtepidi.

Lubjakivikarjääri puhul tuli mahu arvutuse kontuuris mahtude suhteliseks erinevuseks 3,6%, mis jääb markšeideritöö korra alusel lubatud erinevuse piiridesse rohkem kui kolmekordse varuga. Mudelite kõrguserinevused mahu arvutuse kontuuris varieerusid vahemikus -0,02...0,42 m, kusjuures keskmiselt oli droonimudel 0,18 m võrra kõrgem. Lubjakivikarjääri puhul on küll keskmine üle lubatava piiri (0,10 m), ent mudelite kõrguserinevuste varieeruvus on võrreldes liivakarjääri ja puistangutega umbes neli korda väiksem. Lubjakivikarjääri puhul tuleb arvestada seda, et GPS-mõõdistamisel mõõdab markšeider looduslikust seisundist eemaldamata maavara, ent droonilt mõõdistamise korral on mõõdetud ka kobestatud maavara.

Olenemata objektist on mõõdistustulemustes nähtav teatav seaduspära – droonimudel on keskmiselt mõnevõrra kõrgem GPS-mudelist, kuigi mõningates punktides on ka droonimudel madalam kui GPS-mudel. See erinevus tuleb peamiselt välja nõlvadel, kus GPS-mõõdistamise käigus on mõõdetud nõlv ainult alt ja pealt, mitte keskelt ning ka sellistes kohtades, kus markšeider lihtsalt lohkusid mõõtnud ei ole. Kuna keskmiselt on droonimudel siiski natuke kõrgem, on kaevandatud mahtude arvutamisel droonimudeli järgi kaevandatud maht mõnevõrra väiksem ning puistangute maht mõnevõrra suurem kui GPS-mudeli järgi arvutades.

### 3. Diskussioon

Teostatud analüüs kolme erineva iseloomuga objekti kohta näitas, et droonilt mõõdistatud andmeid kasutades jäävad määratud mahtude erinevused lubatud erinevuse piiresse päris suure varuga. Küll aga kõiguvad kõrguserinevused suhteliselt suurtes piirides ning analüüsitud kolme objekti puhul kahel ületas keskmine kõrguserinevus lubatud erinevust (0,10 m). Samas droonimudeli puhul tegemist täielikult töötlemata andmetega ning ka GPS-mõõdistamine oli tehtud tavapärase tihedusega, mistõttu ei kajasta GPS-mudel terviklikku pilti objektidest ning droonimudelis on tõenäoliselt sees mõningast müra (ümbritsevatest kõrguspunktidest oluliselt erinevad üksikud punktid).

Kuigi esmaspilgul tundub drooni kasutamine mõõdistamiseks väga lihtne, tuleb tegelikult teha päris palju kameraaltööd, et droonimudel oleks kasutatav jooniste vormistamiseks. Kuna droon mõõdistab ära nii tee serva ohutuse tagamiseks paigaldatud kivid, kui ka kobestatud kivimi ülemise pinna ja ka näiteks sõidukid, tuleb hilisemalt need punktid mudelist eemaldada. Samas ei saa märkimata jätta droonilt mõõdistamise detailsust ning näiteks projekteerijale korrastamisprojektide koostamiseks või Keskkonnaametile ja Tehnilise Järelevalve Ametile objekti seisukorra tõendamiseks äärmiselt vajalikud.

Üldjuhul mõõdistatakse aja kokkuhoiu mõttes karjääris vaid need alad, kus on toimunud mingid muutused võrreldes varasema mõõdistusega. Aga kuna markšneidermõõdistamiste vahe võib olla kuni kolm aastat (vahel tuleb ette ka pikemaid vahesid), siis võib markšneideril olla raske tuvastada, kus on toimunud muutused. Samuti võib ette tulla asjaolusid, kus kaevandajal võib ununeda kus on kaevandatud (nt vastutava spetsialisti vahetus, ettevõtte omanike vahetus jne), mistõttu võib juhtuda, et GPS-mõõdistamisel ei mõõdistata kogu muutunud ala, küll aga võimaldab drooni kasutamine lühikese ajaga mõõta kogu karjääri maapinna (ja võimalikud muutused) ning hiljem kameraaltööd tehes pakub droonilt mõõdistatu väga detailset infot.

Käesoleval ajal ei saa droonilt mõõdistatud andmeid kasutada kaevandatud mahtude määramisel, kuna pole tagatud seadusandluselt tulenev lähtepunktidega sidumise nõue. Samas on hea drooni kasutada tugiteenusena näiteks puistangute mõõdistamisel, kui valmistoodangu puistangute mõõdistamine on kaevandaja erisoov. Lähtudes määratud mahtude erinevusest oleks droonilt mõõdistamist hea kasutada ka karjääride mõõdistamisel, kus looduslikust olekust eemaldatud maavara on kaevefrondilt täielikult teisaldatud. Sellistes karjäärides, kus

maavara esmalt kobestatakse (paekarjäärid ja põlevkivikarjäärid) ning seejärel transporditakse, saaks droonilt mõõdistamise andmeid kasutada sellisel juhul, kui kogu kaevandatud alast on kobestatud kivim täielikult teisaldatud. Vastasel juhul tuleks hakata droonimudelit muutma GPS-mõõdistamise tulemuste alusel ning selle asemel oleks otstarbekas kohe kasutada GPS-mõõdistamist.

Kuna käesolevas töös kasutatud droonimudelid olid toormudelid, siis oleks soovitav uurida, kui suured kõrguslikud (ja ka mahtude) erinevused on toormudelil ja täielikult töödeldud mudelil. Samuti tuleks uurida droonilt mõõdistamise täpsust erinevate droonidega ning leida optimaalne pildi resolutsioon ja ka kõrgusmudeli punktide vahe, mille korral on võimalik saavutada nõutav täpsus markšeideritööde korrast lähtuvalt. Samuti oleks huvitav teada saada, kui suur erinevus tuleb kahe lennu andmetel, kui lennata mingi ajavahe tagant/pilves või päikese-  
paistelise ilmaga/ erineva tuulekiiruse korral. Samuti tasuks uurida, kui palju sõltuvad tulemused kasutatavast töötlustarkvarast. Tõenäoliselt on droonilt mõõdistamise uurimine lähiajal plaanis Tallinna Tehnikaülikooli Teedeinstituudil, kuna hiljuti on kuulutatud välja hanke mõõdistavate mehitanamata õhusõidukite soetamiseks [33].



## Kokkuvõte

Käesolevas töös on analüüsitud GPS-mõõdistamise ja droonilt mõõdistamise kõrgusandmete erinevust kolme erineva iseloomuga objekti näitel – valmistoodangu puistangud, liivakarjäär ja lubjakivikarjäär. Töö käigus on koostatud digitaalsed pinnamudelid GPS-mõõdistuse andmete alusel ja kasutatud varem koostatud droonimudeleid, arvatud valitud kontuurides mahud nii GPS-mudeli kui droonimudeli alusel, saadud mahtude erinevusi on võrreldud kehtivate õigusaktidega. Lisaks on koostatud droonilt mõõdistamise ja GPS-mõõdistamise võrdlusmudelid, et hinnata mudelite kõrguserinevuste esinemise sageduse visualiseerimiseks on koostatud histogrammid kõrguserinevuse vahega 0,05 m.

Valmistoodangu puistangute puhul varieerus mahtude erinevus vahemikus 0,4...5,0%, kusjuures liites kõikide puistangute mahud kokku, tuli erinevuseks kõigest 0,7%. Droonimudeli ja GPS-mudeli kõrguserinevused kõiguvad vahemikus -0,63...1,03 m, keskmiselt on droonimudel 0,02 m võrra GPS-mudelist kõrgem.

Liivakarjääri puhul tuli mahu arvutuse kontuuris mahtude suhteliseks erinevuseks 2,3%, mis jääb markšeideritöö korras lubatud erinevuse piiresse rohkem kui neljakordse varuga. Mudelite kõrguserinevused varieerusid vahemikus -0,58...1,07 m, keskmiselt on droonimudel 0,12 m võrra kõrgem kui GPS-mudel. Liivakarjääri puhul kõiguvad kõrguserinevused enam-vähem samas vahemikus kui puistangute puhul, aga mudelite keskmine kõrguserinevus on ligi kuus korda kõrgem kui puistangute mudelite keskmine kõrguserinevus.

Lubjakivikarjääri puhul tuli mahu arvutuse kontuuris mahtude suhteliseks erinevuseks 3,6%, mis jääb markšeideritöö korra alusel lubatud erinevuse piiridesse rohkem kui kolmekordse varuga. Mudelite kõrguserinevused mahu arvutuse kontuuris varieerusid vahemikus -0,02...0,42 m, kusjuures keskmiselt oli droonimudel 0,18 m võrra kõrgem. Lubjakivikarjääri puhul on küll keskmine üle lubatava piiri (0,10 m), ent mudelite kõrguserinevuste varieeruvus on võrreldes liivakarjääri ja puistangutega umbes neli korda väiksem. Lubjakivikarjääri puhul tuleb arvestada seda, et GPS-mõõdistamisel mõõdab markšeider looduslikust seisundist eemaldamata maavara, ent droonilt mõõdistamise korral on mõõdetud ka kobestatud kivim.

Kuigi mahtude ja ka keskmise kõrguserinevuse suhtes jäävad tulemused lubatud piiridesse, on siiski kõrguserinevuste varieeruvus suhteliselt suur ning selliselt saadud mõõdistamisandmeid

mäeeraldise plaani koostamisel kasutada ei tohiks. Eriti arvestades seda, et mäeeraldise piiri sügavuti ületamisel kehtib nulltolerants, ei ole tolereeritav see, et tegelik karjääri põhi osades punktides võib olla 0,63 m allpool või 1,07 m ülalpool. Samas tuleks arvestada ka seda, et GPS-mõõdistamine oli teostatud tavapärase mõõdistuse tihedusega, mistõttu on reljeef väga üldistatud ning samuti ka seda, et droonimudeli koostamisel ei ole punktide filtreerimisel kasutatud tarkvara kõiki võimalusi, seega võib tihedama GPS-mõõdistamise punktide võrgu ja drooniandmete suurema töötlemisega saavutada täpsemaid tulemusi. Lisaks tuleb arvestada ka seda, et esialgset droonilt mõõdistamise detailsust on vähendatud umbes kümme korda, mis omakorda mõjutab saadud tulemuste täpsust.

Olenemata objektist on mõõdistustulemustes nähtav teatav seaduspära – droonimudel on keskmiselt mõnevõrra kõrgem GPS-mudelist, kuigi mõningates punktides on ka droonimudel madalam kui GPS-mudel. See erinevus tuleb peamiselt välja nõlvadel, kus GPS-mõõdistamise käigus on mõõdetud nõlv ainult alt ja pealt, mitte keskelt ning ka sellistes kohtades, kus markšneider lihtsalt lohkusid mõõtnud ei ole. Lisaks võib GPS-mõõdistamisel sau vajuda materjali sisse (liiv, kruus jm puistematerjal). Kuna keskmiselt on droonimudel siiski natuke kõrgem, on kaevandatud mahtude arvutamisel droonimudeli järgi kaevandatud maht mõnevõrra väiksem ning puistangute maht mõnevõrra suurem kui GPS-mudeli järgi arvutades.

Droonilt mõõdistamise eelisteks on suurte alade kiire mõõdistamine, saadud andmete detailsus ning andmete keeruline manipuleeritavus, samas on drooni suureks puuduseks sõltuvus ilmastikutingimustest, piiratud lennukordade arv ning ka see, et hetkel kehtiva seadusandluse järgi droonilt mõõdistamise andmete alusel kaevandatud mahtu määrata ei tohi. Lisaks on droonilt mõõdistamise puuduseks ka see, et mõõdetud saab kõik, mis väljas on (autod, kivid tee ääres, kobestatud maavara jms), mistõttu tuleks droonimudel enne kasutamist kriitilise pilguga üle vaadata.

Eeltoodust tulenevalt saaks droonilt mõõdistamist kasutada karjäärade mõõdistamisel, kus looduslikust olekust eemaldatud maavara on kaevefrondilt täielikult teisaldatud. Sellistes karjäärades, kus maavara esmalt kobestatakse (paekarjäärid ja põlevkivikarjäärid) ning seejärel transporditakse, saaks droonilt mõõdistamise andmeid kasutada sellisel juhul, kui kogu kaevandatud alast on kobestatud kivim täielikult teisaldatud. Vastasel juhul tuleks hakata droonimudelit muutma GPS-mõõdistamise tulemuste alusel ning selle asemel oleks otstarbekas kohe kasutada GPS-mõõdistamist.

Arvestades käesolevas töös saadud tulemusi droonilt mõõdistamise toormudeli kohta, jäävad arvutatud mahud lubatud piiresse, ent kõrguserinevuste vahemikud on liiga suured, et kasutada toormudelit mäeeraldise plaani koostamisel. Samas arvestades droonilt mõõdistamise kiirust ja teostatud toormudeli analüüsi tulemusi, on droonilt mõõdistamise kasutamine kõrgema andmete töötlusastme korral väga perspektiivikas. Enne droonilt mõõdistamise kasutusele võtmise üle otsustamist tuleks teha põhjalikumaid uuringuid ja määrata parameetrid (piksli suurus, andmete töötlusaste jms) ja ka andmete töötlemiseks kasutatavad tarkvarad, mille korral on droonilt mõõdistamise täpsus piisav.

## Kasutatud allikad

1. Wikipedia. Unmanned aerial vehicle. [WWW]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_aerial\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle) (28.04.2015).
2. Kaevandamiseadus. (Vastu võetud 29.01.2003, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2015). - Elektrooniline Riigi Teataja [WWW]  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/112072014055> (17.04.2015).
3. Kaevandamiseadus. (Vastu võetud 29.01.2003, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2015). - Elektrooniline Riigi Teataja. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. aprill 2015. a.]  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/112072014055>.
4. Keskkonnatasu deklaratsiooni vormid ja nende täitmise ning maavaravaru kaevandamise mahu aruande esitamise kord. (Vastu võetud 05.04.2011, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 08.08.2014). - Elektrooniline Riigi Teataja [WWW]  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/105082014011> (17.04.2015).
5. Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord. (Vastu võetud 26.05.2005, jõustunud 10.06.2005). - Elektrooniline Riigi Teataja [WWW]  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/905848> (17.04.2015).
6. Markšeideritöö kord. (Vastu võetud 23.01.2012, jõustunud 28.01.2012). - Elektrooniline Riigi Teataja. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/125012012004> (17.04.2015).
7. Ehitusgeodeetiliste uurimistöo tegemise kord. (Vastu võetud 27.08.2007, jõustunud 01.10.2007). - Elektrooniline Riigi Teataja [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/12861144> (17.04.2015).
8. Kolõganova, A. Pinnasetööde mahuarvutused erinevate GIS tarkvarapakettidega Kohtla-Järve poolkoksi ladestu sulgemistöo näitel : magistristöo. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2014. [WWW]  
[http://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Teedeinstituut/Geodeesia\\_oppetool/Loputood/Kologanova\\_magistritoo\\_Pinnasetoode\\_mahuarvutused.pdf](http://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Teedeinstituut/Geodeesia_oppetool/Loputood/Kologanova_magistritoo_Pinnasetoode_mahuarvutused.pdf) (01.04.2015).
9. Randjärv, J., Ilves, E., Jürgenson, H. Geodeesia. II osa. Tartu : OÜ Vali Press, 1998.
10. Ellmann, A. (2011) Globaalne navigatsioonisatelliitide süsteem GNSS. [WWW]  
<http://www.gece.ttu.ee/~artu/LOENGUD/HYDRO/GNSS.pdf> (17.04.2015).
11. SA Innove. Satelliit-asukohamääramine. [WWW]  
<http://www.innove.ee/UserFiles/Kutseharidus/%C3%95ppekava/Satelliit-asukoham%C3%A4%C3%A4ramine%204.pdf> (12.05.2015).

12. SA Innove. GNSS-mõõtmised. [WWW]  
<http://www.innove.ee/UserFiles/Kutseharidus/%C3%95ppekava/GNSS%20m%C3%B5%C3%B5tmised%206.pdf> (28.04.2015).
13. Toompark, A. (2008). Taevased abimehed. [WWW] [http://www.ivaleon.ee/wp-content/pildid/Taevased\\_abimehed.pdf](http://www.ivaleon.ee/wp-content/pildid/Taevased_abimehed.pdf) (4.05.2015).
14. OÜ I.V.A. Leon. (2009). Sissejuhatus RTK võrkudesse. [WWW]  
<http://www.ivaleon.ee/wp-content/pildid/sissejuhatus-rtk-vorkudesse.pdf> (19.04.2015).
15. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW]  
[http://www.maaamet.ee/rr/geo/?mitu=10&hnr=&snr=&lbn=&x=&y=&r=&nimi=\\*trimble\\*&o\\_nimi=Otsi&jrk=11](http://www.maaamet.ee/rr/geo/?mitu=10&hnr=&snr=&lbn=&x=&y=&r=&nimi=*trimble*&o_nimi=Otsi&jrk=11) (17.04.2015).
16. Geosoft OÜ. Trimble VRS Now. [WWW] <http://www.geosoft.ee/vrs-now-eeesti/> (27.04.2015).
17. Maa-amet. Geoportaal. [WWW] <http://geoportaal.maaamet.ee/> (26.04.2015).
18. Vikipeedia. LIDAR. [WWW] <http://et.wikipedia.org/wiki/LIDAR> (27.04.2015).
19. Kuurberg, K. Maapealse laserskaneerimise mudeldamise täpsuse määramine : lõputöö. Tallinn, Tallinna Tehnikakõrgkool, 2014. [WWW]  
<http://eprints.tktk.ee/738/1/L%C3%B5put%C3%B6%C3%B6%20K.%20Kuurberg.pdf> (27.04.2015).
20. Gruno, A. Üks pilt ütleb rohkem kui tuhat sõna ehk aerolaserskaneerimine Eestimaal. - Horisont, 2012, 4. [WWW] <http://www.horisont.ee/node/1893> (17.04.2015).
21. Liba, N. Fotogramm-meetria olemus ja areng. Tartu : OÜ Halo Kirjastus, 2005.
22. Potter, H., Treikelder, I. Geodeesia ja kartograafia läbi aegade : maamõõtmise ning kaardistamiskultuuri ajalugu sõnas ja pildis. Tallinn : Maa-amet, 2011.
23. Reality Measurements Inc. Low Altitude Photogrammetry. [WWW]  
<http://www.realitymeasurements.com/crdp-low-altitude.htm> (12.05.2015).
24. CAD-süsteemide OÜ kodulehekülg. [WWW] <http://cadsys.ee/> (17.04.2015).
25. Bentley Systems Home Page. MicroStation. [WWW] <http://www.bentley.com/en-US/Products/MicroStation/> (20.04.2015).
26. Aluoja, J. (2015). Autori intervjuu. Tallinn, 18. mai.
27. Aluoja, J. (2014) 09.06.2014 teostatud drooni lennu raport.
28. Aluoja, J. (2014) 09.12.2014 teostatud drooni lennu raport.
29. Aluoja, J. (2013) 02.10.2013 teostatud drooni lennu raport.

30. Lennuamet. Mehitamata õhusõidukite käitamise juhend. [WWW]  
[http://www.ecaa.ee/public/Juhend\\_mehitamata\\_ohusoidukite\\_kaitamiseks.pdf](http://www.ecaa.ee/public/Juhend_mehitamata_ohusoidukite_kaitamiseks.pdf) (10.05.2015).
31. Riigikohtu otsus asjas 3-1-1-67-14. [WWW]  
<http://www.riigikohus.ee/?id=11&tekst=RK%2F3-1-1-67-14> (20.04.2015).
32. Mõõteseadus. (Vastu võetud 10.03.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2015). - Elektrooniline Riigi Teataja [WWW]  
<https://www.riigiteataja.ee/akt/112072014101> (27.04.2015).
33. Riigihangete register. Mehitamata lennumasinat komplekti soetamine fotogramm-meetrilise mõõdistuse läbiviimiseks. [WWW]  
<https://riigihanked.riik.ee/register/hange/162518> (12.05.2015).
34. AlphaGIS OÜ kodulehekülg. [WWW] <http://www.alphagis.ee/> (17.04.2015).
35. Coxworth, B. (2013). senseFly set to release eBee industrial UAV. [WWW]  
<http://www.gizmag.com/sensefly-eebe-uav/25851/pictures#3> (20.04.2015).
36. senseFly Ltd. (2013). eBee: User Manual.
37. senseFly Ltd. eBee technical specifications. [WWW]  
[https://www.sensefly.com/fileadmin/user\\_upload/images/web2014/eebe/tech-spec-eBee.pdf](https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/images/web2014/eebe/tech-spec-eBee.pdf) (18.04.2015).
38. senseFly Ltd. Knowledge Base. [WWW] <https://sensefly.zendesk.com/hc/en-us> (28.04.2015).

## LISA 1. Droon eBee

Droon eBee on Šveitsi ettevõtte senseFly toodang, firma tegeleb kaardistamiseks mõeldud ülikergete autonoomsete droonide arendamise ja tootmisega [34]. Kokku on ettevõtte sortimendis viis drooni: eXom, eBee, eBee Ag, eBee RTK ja swinglet CAM [35]. Eestis on senseFly droonide edasimüüjaks OÜ AlphaGIS, kodulehe andmetel on valikus kaks erinevat mudelit: swinglet CAM ja eBee [34]. Käesolevas töös on lähemalt käsitletud drooni eBee, kuna töös kasutatud droonimudelid on saadud antud drooni lennuandmeid kasutades.

Droon eBee kujutab endast täislahendust, mis tähendab, et drooniga on kaasas kõik vajalikud tarkvarad ja lisatarvikud kaardistamis- ja mõõdistamistöö läbiviimiseks. Drooniga on kaasas tarkvara eMotion 2, millega saab planeerida, simuleerida ja kontrollida lendu ning tarkvara Postflight Terra 3D, millega töödeldakse pärast lendu pilte. [34]



LISA 1 Joonis 1 Droon eBee [35]

Droon eBee (LISA 1 Joonis 1) on tehtud painduvast vastupidavast vahtplastist ning ta ülikerge – droon kaalub vähem kui 700 g, droon suudab lennata kuni 12 m/s puhuva tuulega (LISA 1 Tabel 1) [34].

LISA 1 Tabel 1 Dron eBee tehnilised andmed [36] [37]

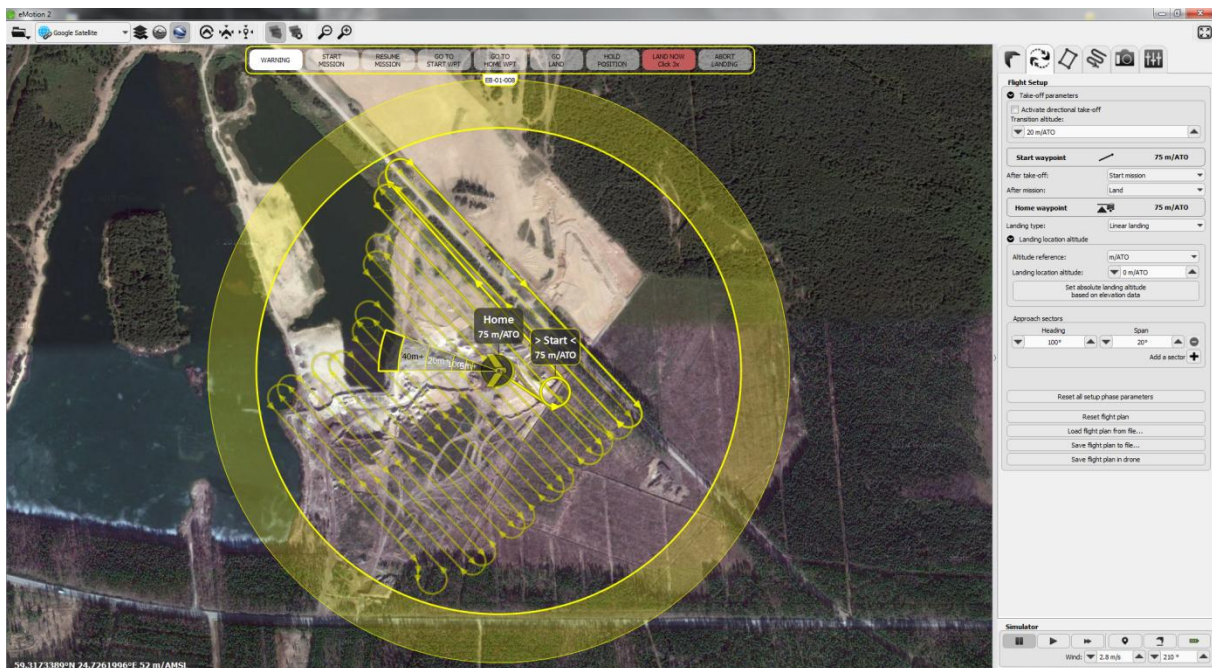
Parameeter	Arvväärtus
Tiivaulatus, cm	96
Mass, g	670
Lennukiirus, km/h (m/s)	40...65 (11...18)
Maksimaalne lubatud tuulekiirus, km/h (m/s)	45 (12)
Ühe lennuga kaardistatav ala, km <sup>2</sup>	kuni 10
Piksli suurus, cm	1,5...30
Lennuaeg, min	45*
Raadioside maksimaalne ulatus, km	3

\*lennuaeg sõltub välitingimustest – tuule kiirusest, temperatuurist jne.

## 1. Lennu planeerimine

Lennu planeerimisel luuakse lennuplaan kasutades drooniga eBee kaasatulevat tarkvara eMotion 2. Lennuplaan on marsruut, mis on defineeritud vahepunktide (*waypoint*) ja tegevustega vahepunktides või vahepunktide vahel (nt pildistamine, järgmisesse vahepunkti lendamine või maandumine). Lennuplaani (LISA 1 Joonis 2) kuvatakse tarkvaras eMotion 2 kaardiosas, kus ringid tähistavad vahepunkte, jooned lennu marsruuti ning nooled näitavad lendamise suunda. Suur ring viirutatud piirjoonega illustreerib nn tööala, mille sees droon alati püsima peab. Juhul, kui droon mingil põhjusel peaks ringist väljuma, katkestab ta missiooni ning suundub lennuplaani maandumispunkti lähedusse ning alustab maandumist. [36]





LISA 1 Joonis 2 Lennuplaan tarkvaras eMotion 2

Lennuplaan koosneb kahest faasist: häälestusfaas (*setup phase*) ja missioonifaas (*mission phase*). Missioonifaas hõlmab endas kaardistamise ja pildistamisega seonduvad kontrollpunktid ning tegevused. Häälestusfaas hõlmab endas õhku tõusmise ja maandumisega seonduvad kontrollpunktid ja tegevused. [36]

Kõige lihtsam viis missioonifaasi planeerimiseks on kasutada tarkvara eMotion 2 automaatse missiooni planeerimise funktsiooni. Selleks tuleb avada vaheleht „*Mission Planning*“, mille tulemusel luuakse hall tsoon kaardiosas, mis tähistab hõlmavat missiooniala ning arvutatakse ja kuvatakse missiooniplaan (sh vahepunktid). Seejärel tuleb korrigeerida missiooniala (ehk ala, mida soovitakse mõõdistada) asukohta ja pindala ning vajadusel ka missiooniparameetreid (soovitud maapinna resolutsioon, külgmiline ülekate (*lateral overlap*) jne). Enne välja minemist on võimalik simuleerida planeeritud lennu, et saada aimu lennu ajal tehtavate piltide asendist ning suuruselt. [36] Järgneval joonisel (LISA 1 Joonis 3) on näidatud lennu simuleerimise etapp tarkvaras eMotion 2.



LISA 1 Joonis 3 Lennu simuleerimine

Häälestusfaasis määratakse:

1. Õhikutõusu asukoht – punkt, kus eBee õhku tõuseb, automaatselt seatud asukohta, kus eBee tööle pannakse ja kus ta GPS-signaali leiab. Õhikutõusu asukoha kõrguseks on määratud 0 m ning kõikide teiste vahepunktide kõrgused määratakse selle punkti suhtes;
2. Vahepunkt Start (*Start Waypoint*) on esimene vahepunkt, kuhu eBee lendab, kui on saavutanud õhikutõusust ülemineamise kõrguse, milleks on vaikimisi 20 m;
3. Vahepunkt Kodu (*Home Waypoint*) on ohutu punkt, kus eBee saab hädaolukorra korral keerutades maanduda ning samuti ka maandumispunkt lennu lõpul ringja maandumise korral;
4. Lineaarse maandumise vahepunkt (*Linear Landing Waypoint*) on punkt, mida kasutatakse lineaarse maandumise korral. [36]

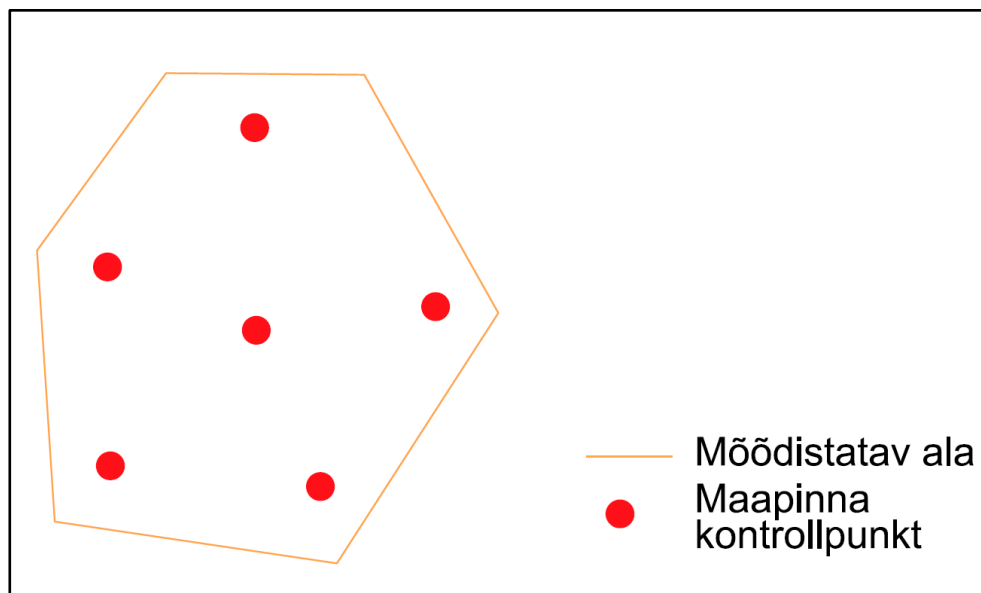
## 2. Lennu läbiviimine

Enne lennu läbiviimist tuleb viia end kurssi ilmastikutingimustega, kuna eBee on väike droon, mis ei suuda lennata vihmast või tugeva tuulega. Enne lendu tuleb tutvuda tuule kiiruse ennustusega lennualas ja arvestada tuleb ka sellega, et kõrgemal on tuul sageli tugevam, seega pole maapinnal mõõdetud tuulekiirus eriti hea alus, et hinnata tuule kiirust lennukõrgusel. Drooni

eBee ei tohi lennutada, kui tuule kiirus ületab 12 m/s (43,2 km/h). Lisaks pole droon eBee mõeldud lendama kõrgemal temperatuuril kui 35°C.[36]

Enne lendu tuleb mõõdistatavale alale paigutada maapinna kontrollpunktid (*Ground Control Points*, lühend *GCP*). Maapinna kontrollpunktid on punktid mõõdistataval alal, mille koordinaadid on teada. Nende koordinaadid on mõõdistatud traditsioonilisel viisil või saadud muudest allikatest (LiDAR, vanemad kaardid alast jne). Maapinna kontrollpunktid pole kohustuslikud andmete töötlemisel tarkvaras Postflight Terra 3D, kuid nende kasutamine tõstab tulemuste absoluutset täpsust märkimisväärselt. [38]

Maapinna kontrollpunktid tuleb paigutada ühtlaselt mõõdistatava ala sisse. Üks maapinna kontrollpunkt on soovitatav panna ala keskele, et tõsta rekonstruktsiooni kvaliteeti. Maapinna kontrollpunktide minimaalne arv on kolm, kuid soovitatav on kasutada vähemalt viit maapinna kontrollpunkti. SenseFly andmetel on 5...10 maapinna kontrollpunkti enamasti piisav ning suurema arvu maapinnakontrollpunktide kasutamine ei paranda enam täpsust märkimisväärselt. Iga maapinna kontrollpunkt peaks kajastuma vähemalt kahel fotol, kuid optimaalse tulemuse saamiseks peaks kontrollpunkt kajastuma vähemalt viiel fotol. [38] Järgneval joonisel (LISA 1 Joonis 4) on näidatud soovitatav maapinnakontrollpunktide paigutus.



LISA 1 Joonis 4 Maapinna kontrollpunktide soovitatav paigutus



Maapinna kontrollpunktideks võivad olla nii looduslikud objektid maastikul, mille asukoht on hiljem pildil näha või spetsiaalsed tähised (LISA 1 Joonis 5). Drooni eBee edasiarendus eBee RTK toimib GNSS vastuvõtjana ning eraldi maapinna kontrollpunkte ei vaja.



LISA 1 Joonis 5 Maapinna kontrollpunkti tähis. Autor: Jürgen Aluoja

Droon eBee on kujundatud selliselt, et see on lennuvalmis karbist välja võttes üksnes minuti-tega. Enne lendu tuleb visuaalselt kontrollida eBee korrasolekut:

1. Vahtplastist kere ja tiibade kontrollimine mõrade ja muu kahjustuse suhtes;
2. Rõhuindikaator peab olema karkassile õigesti kinnitatud ja indikaatori avad peavad olema takistustest vabad;
3. Maapinnaandur peab olema takistustest vaba ning anduri objektiiv puhas;
4. Tiibade vardad ei tohi olla kahjustatud.
5. Keres olevad avaused, millesse kinnituvad tiibade vardad, ei tohi olla kahjustatud.
6. Elektrijuhtmed aku sektsioonis peavad olema korralikult isoleeritud ja ei tohi olla kahjustatud.

Pärast visuaalset kontrolli tuleb kinnitada propeller mootori teljele. Propeller kinnitatakse kahe kummipaelaga, kummipaelades ei tohi olla mõrasid. Pärast propelleri paigaldamist tuleb paigaldada drooni kaamera. Enne kaamera paigaldamist on otstarbekas veenduda, et kaameras on tühi mälukaart ning kaamera aku on laetud. Kaamera tuleb ühendada juhtme abil eBee'ga. Pärast kaamera paigaldamist kinnitatakse kere külge tiivad. [36]

Aku paigaldamiseks asetatakse droon maapinnale horisontaalselt, ühendatakse aku juhtmed ning asetatakse aku oma kohale. Ohutuse huvides on arukas hoida eemale propellerist, juhaks kui see peaks aku ühendamisel pöörlema hakkama. Kohe kui aku on ühendatud, viib eBee läbi enesetesti oma andurite kohta ning otsib GPS-signaali. Test võib kesta mõnest sekundist mitmete minutiteni olenevalt GPS-signaali tugevusest. Kuna GPS-signaalita ei ole võimalik testi lõpule viia, tuleks eBee asetada kohta, kus on selge taevalaotus ja puuduvad takistused (nt kõrged puud). [36]

Testi ajal vilgub sinine märgutuli, testi lõpule jõudmise korral jääb põlema roheline märgutuli. Juhul, kui testi käigus tuvastatakse probleem, hakkab vilkuma punane märgutuli. Et saada testi staatuse kohta rohkem infot, võib testi ajal ühendada eBee eMotion 2 tarkvaraga. [36]

Drooni eBee ühendamiseks eMotion 2 tarkvaraga tuleb ühendada arvuti drooniga kaasas olnud USB raadiomoodul (antenn) ja käivitada eMotion 2. Kui eBee on tuvastanud GPS-signaali, kuvatakse tema asukohta eMotion 2 tarkvaras. Kui ühendus drooni ja arvuti vahel on loodud, saab laadida drooni lennuplaani. [36]

Drooni lennutamiseks tuleb end orienteerida vastusuunas tuulega ja kontrollida, et õhkutõusmise suund eestvaates on takistustevaba. Drooni tiibadest tuleb eestpoolt kahe käega kinni võtta ning raputada drooni edasi-tagasi kolm korda, et drooni mootor hakkaks võimsust koguma. Sinine märgutuli vilgub senikaua kuni mootor on täisvõimsusel ning droon on valmis õhku tõusma (mootori väljalülitamiseks tuleb teda samamoodi kolm korda edasi-tagasi raputada). Kui mootor on täisvõimsusel, vilgub roheline märgutuli. Seejärel tuleb drooni nina tõsta 10 kraadi võrra üles, kui on saavutatud õige kalle, lõpetab märgutuli vilkumise ja jääb põlema. Drooni lennutamiseks tuleb seejärel astuda 1...2 sammu edasi ning samal ajal mõlema käega lahti lasta. [36]

Pärast õhkutõusu proovib eBee säilitada oma esialgset direktsiooni, hoides tiibasid rõhtsalt täiskiirusel kuni õhkutõusust ülemineku kõrguse saavutamiseni. Sel hetkel lülitab ta end üm-

ber vahepunktide navigeerimisrežiimile ning lendab vahepunkti Start. Vahepunktis Start teeb eBee 1-2 tiiru ümber vahepunkti, et hinnata tuulekiirust ning kalibreerida oma andurid enne kaardistamissiooni alustamist. [36]

Lennu ajal on võimalik jälgida ja juhtida eBee'd kasutades tarkvara eMotion 2. Tarkvaras on näha drooni asukoht, tuule kiirus ja suund, aku kestvus, lennuaeg ja -kõrgus (kõrgus õhukütõusmispunkti suhtes). Autonoomse lennu korral juhib eBee oma lendu vastavalt lennuplaanile õhukütõusmisest maandumiseni ning käitaja midagi tegema ei pea. Küll aga on soovi korral võimalik siiski eBee'd ise juhtida, andes talle käskluse positsiooni hoida, lennata vahepunkti Start või vahepunkti Kodu. [36]

Pärast kaardistamissiooni lõpetamist lendab eBee kas lineaarse maandumise vahepunkti või vahepunkti Kodu ning alustab maandumist. Pärast maandumist tuleb enne eBee maast tõstmist eemaldada aku ning soovitatav on enne drooni kasti tagasipanemist importida pildid ja lennuandmed. [36]

### **3. Lennuandmete töötlemine**

Pärast lennuandmete laadimist arvutisse tuleb näidata tarkvaras kontrollpunktide asukohad piltidel ning sisestada kontrollpunktide koordinaadid, et programm saaks vastavalt täpsustada oma andmeid. Seejärel tuleb jätta programm andmeid töötleva, olenevalt mõõdistatud ala suurusest ning mõõdistamise detailsusest on töötlemise aeg erinev. 10...20 ha suuruse ala piksli suuruse 4 cm korral on töötlemisele kuluv aeg keskmiselt kaheksa tundi. Töötlemiskiirus oleneb ka arvuti parameetritest ning kuigi eBee spetsifikatsioonis on kirjas arvuti minimaalsed ja soovituslikud nõuded, kulub ligi kaks korda soovituslikest parameetritest kõrgemate näitajatega arvutil lennuandmete töötlemiseks märkimisväärne aeg. Seetõttu on otstarbekas panna arvuti lennuandmeid töötleva ööseks.

Pärast andmete töötlemist on võimalik saada ortofotomosaiike, 3D punktipilvi, kolmnurkmudeleid ja eksportida andmeid erinevatesse fotogramm-meetria tarkvaradesse edasiseks töötluks.