



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

SISERUUMIDE JA ALLMAAKAEVEÕÕNTE RUUMIKUJU  
MÄÄRAMINE MOBIILSE LASERSKANEERIMISEGA

DETERMINING THE SHAPE AND VOLUME OF ENCLOSED SPACES AND  
UNDERGROUND MINES BY MOBILE LASER SCANNING

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaia Malberg

Üliõpilaskood: 153911 EATI

Juhendaja: Prof Artu Ellmann

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

*Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.*

*Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.*

“.....” ..... 2019 a

Autor: .....

/allkiri/

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2019 a

Juhendaja: .....

/allkiri/

Kaitsmisele lubatud

“.....” ..... 2019 a

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/nimi ja allkiri/

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kaia Malberg, üliõpilaskood 153911 EATI  
Õppekava, peeriala: EATI02/15, peeriala ehitusgeodeesia  
Juhendaja: Prof Artu Ellmann, tel 620 2602  
Konsultant: Ins Vaiko Veeleid, tel 508 9781, Hades Geodeesia OÜ

Lõputöö teema:

SISERUUMIDE JA ALLMAAKAEVEÕÕNTE RUUMIKUJU MÄÄRAMINE MOBIILSE  
LASERSKANEERIMISEGA

DETERMINING THE SHAPE AND VOLUME OF ENCLOSED SPACES AND UNDERGROUND MINES BY  
MOBILE LASER SCANNING

Töö keel: eesti keel Lõputöö esitamise tähtaeg: „.....“ ..... 2019 a

Üliõpilane: Kaia Malberg ..... „.....“ ..... 2019 a  
/allkiri/

Juhendaja: Prof Artu Ellmann ..... „.....“ ..... 2019 a  
/allkiri/

# SISUKORD

Jooniste loetelu .....	6
Tabelite loetelu .....	10
Lisade loetelu .....	11
Lühendite ja tähiste loetelu .....	12
SISSEJUHATUS .....	13
1 ALLMAAKAEVANDAMINE .....	15
1.1 Estonia kaevandus.....	16
2 LASERSKANEERIMINE .....	18
3 VARASEMATE UURIMISTÖÖDE ÜLEVAADE .....	19
3.1 Allmaamõõdistamine .....	19
3.2 Hoonete laserskaneerimine .....	21
4 TÖÖ EESMÄRK JA METOODIKA .....	23
5 KASUTATUD MÕÕTESEADMED .....	24
5.1 GeoSLAM ZEB-REVO.....	24
5.1.1 ZEB-REVO tööpõhimõte .....	25
5.1.2 GeoSLAM ZEB-REVO instrumendiga mõõtmine .....	27
5.1.3 Juhised GeoSLAM instrumendi käsitlemiseks.....	30
5.2 Faro Focus3D X330 .....	32
5.3 Riegl VZ-400 .....	33
6 MÕÕDISTUSE KATSETÖÖDE KIRJELDUS JA ALGANDMED .....	34
6.1 Estonia kaevanduse allmaa mõõdistused .....	34
6.1.1 Punktipilvede orienteerimine.....	37
6.1.2 GeoSLAM ja Faro laserskannerite punktipilvede võrdlus.....	41
6.1.3 Tervikute pindalade võrdlemine.....	43
6.1.4 Mahtude arvutamine ja võrdlemine .....	47
6.2 Täiendavad mõõteandmed.....	49
6.2.1 Trajektooride lisamine.....	51
6.2.2 Punktipilvede ühendamine ja andmebaasi loomine.....	53
6.3 Hoonete mõõdistamine .....	56
6.3.1 Algandmed .....	56
6.3.2 Tööprotsess .....	59
6.3.3 Maa-ameti hoone mõõdistamine.....	68
7 TULEMUSTE KOKKUVÕTE .....	74
KOKKUVÕTE .....	77

SUMMARY .....	79
VIIDATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	81
8 LISAD.....	84

## JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Kamberkaevandamise ristlõike põhimõtteline skeem [1] .....	15
Joonis 1.2. Põlevkivi tootluskiht, C/D kihti nimetatakse „kaksikpaas“ [23] .....	16
Joonis 1.3. Estonia kaevanduse mäeeraldus [3].....	17
Joonis 1.4 Maa-aluse tervikurea sügavuslik paiknemine maapinna (genereeritud Maa-ameti 5x5 m sammuga DEM-ist) suhtes.....	17
Joonis 5.1. Autor GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänneriga Estonia kaevanduses.....	24
Joonis 5.2. GeoSLAM Zeb-Revo osad: 1 – käeshoitav laserskänner; 2 – andmete salvestaja; 3 – põhikaabel; 4 – allalaadimiskaabel; 5 – USB mä lupulk; 6 – GeoSLAM Hub litsentsi võti; 7 – akulaadija ja adapterid; 8 – 12 V autoakulaadija; 9 – seljakott [20] .....	25
Joonis 5.3. SLAM algoritmi tööpõhimõtte sammud punktipilvede arvutamisel, modifitseeritud [34] .....	26
Joonis 5.4. Avatud käigu trajektoor (nihkes) ja käigu sulgemisega parandatud trajektoor, modifitseeritud [14] .....	27
Joonis 5.5. GeoSLAM REVO-ga mõõtmisel tekkivad nõ ringjad jooned on punktipilves eristuvad, joonisel magistritöös uuritud kaubanduskeskuse seinapind .....	29
Joonis 5.6. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kaubanduskeskuse seinast, kus sein ees oleval laual toimus instrumendi esialgne ja lõplik initsialiseerimine. ....	29
Joonis 5.7. Riegl VZ-400 skaneeritud punktipilv asukohast, kus toimus GeoSLAM REVO initsialiseerimine. ....	30
Joonis 5.8. Faro Focus <sup>3D</sup> X330 (Foto: Sander Kanter).....	32
Joonis 5.9. Riegl VZ-400 (Foto aadressil <a href="https://geo-matching.com/terrestrial-laser-scanners/vz-400">https://geo-matching.com/terrestrial-laser-scanners/vz-400</a> ) .....	33
Joonis 6.1 Kambriploki mõõdistusala skeem. Kollasega on kahe skänneriga mõõdistatud ala (kontrollala), sinisega vaid GeoSLAMiga mõõdistatud ala. Tumesiniste numbritega on tähistatud markšneidermõõdistusvõrgu punktid, mida saab kasutada ülesriputatavate skaneerimistähiste asukohtadena.....	35
Joonis 6.2. Mobiilse skaneerimise kujutis kambriploki lage läbivatest lõhedest (toestatud poolpalkidega) pealtvaates. Kõrgemad õnarused kambite lagedes tähistavad varisenud (või varisemisohhtlikuna eemaldatud) materjali .....	36
Joonis 6.3. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kollasega ja Faro punktipilv sinisega 5 cm läbilõikes, GeoSLAM pilve hajuvus on 3-5 cm, Faro punktipilve hajuvus 1-3 cm. Paremal oleval joonisel on 1 cm läbilõikes Faro pilvest üks punktirida, ZEB-REVO hajub 4,5 cm .....	36
Joonis 6.4. Laserskaneerimise orienteerimiseks kasutatud siduspunktid, mis on riputatud markšneideri käikude koordineeritud laepunktidesse.....	37
Joonis 6.5. Staatilise laserskänneri Faro punktipilv ja virtuaalne sfäär tennisepalli asukohas. ....	38
Joonis 6.6. Mobiilse laserskänneri GeoSLAM punktipilv ja virtuaalne sfäär tennisepalli asukohas. ....	38
Joonis 6.7 Staatilise laserskänneri Faro punktipilve ühildamine sfääride abil kolme punktiga. Kastides on toodud ühildamisel tekkinud veahinnangud, punktipilve joonisel näha ei ole. ....	39
Joonis 6.8 Mobiilse laserskänneri GeoSLAM punktipilve koordineerimine kuue punktiga. Tekstikastides on toodud ühildamisel tekkinud veahinnangud.....	40

Joonis 6.9 Koordinaatide erinevused plaaniliselt (sinisega kaevanduse andmed, punasega Faro punktipilve ja kollasega GeoSLAM punktipilve koordinaatide erinevused), väljavõtte AutoCAD keskkonnast.....	41
Joonis 6.10 Faro ja GeoSLAM 3D pindade võrdlus pealtvaates kontrollalal. Rohelised toonid näitavad, et Faro 3D pind on kõrgemal kui GeoSLAMi oma, sinised toonid näitavad, et Faro 3D pind on madalamal (enamikus vahemikus +/- 0,1 m).....	42
Joonis 6.11 Faro ja GeoSLAM 3D pindade võrdlus altvaates kontrollalal. Rohelised toonid näitavad, et Faro 3D pind on kõrgemal kui GeoSLAMi oma, sinised toonid näitavad, et Faro 3D pind on madalamal (enamikus vahemikus +/- 0,1 m). ....	43
Joonis 6.12 Staatilise skänneriga tehtud värviline punktipilv, kus selgelt eristub valge C/D vahekiht. ....	44
Joonis 6.13 Faro, GeoSLAM ja kaevanduse tervikute andmed. Punase kontuuriga Faro mõõteandmete ulatus, rohelisega GeoSLAM andmed, mustaga kaevanduse andmed.....	45
Joonis 6.14 Väljavõtte tervikust, kus punase kontuuriga on Faro andmed, rohelisega GeoSLAM andmed ja valgega kaevanduse andmed. ....	46
Joonis 6.15. GeoSLAM punktipilv, kus skanneerimisseadmele järgnenud inimfiguurid on skaneeritud pilve sisse .....	48
Joonis 6.16 GeoSLAM mõõdistuse lõige koos tervikute pindaladega (juuresoleval sildil tähistatud <i>Surf</i> ). ....	49
Joonis 6.17. Väljavõtte GeoSLAM punktipilvest koos trajektooriga, algus ja lõpuosa initsialiseerimisega (tähistatud ringiga), parem ülemine paun on kõndimine tähise ümber (tähistatud noolega).....	51
Joonis 6.18. Väljavõtte GeoSLAM punktipilvest koos trajektooriga, keskmine nõ pundar ümbritsetud ringiga tähistab kohta, kus liiguti ümber paigalseivate inimeste ringi .....	52
Joonis 6.19. GeoSLAM kolmemõõtmeline punktipilv trajektooriga .....	53
Joonis 6.20. Erinevate punktipilvede ühendamine ühte andmebaasi, erinevad mõõdistused on tähistatud erinevate värvitoonidega. Kuna antud mõõdistused asuvad üksteisest kümnete kilomeetrite kaugusel, siis joonise selguse huvides on punktipilvede kujutised toodud lähemale ja eraldatud musta joonega (mõõtkavatu) .....	54
Joonis 6.21 Laserskaneerimisega 2018 ja 2019 saadud punktipilved ühtses andmebaasis koos maapealse situatsiooniga. Must võrgustik tähistab Estonia kaevanduse kambriplokke, sõõrides punasega tähistatult käesoleva töö raames erinevatel aegadel mõõdistatud kambriplokid. Ortofoto: Maa-amet 2019.....	55
Joonis 6.22. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kaubanduskeskuse ruumidest, kõrgem osa on saali osa, madalam osa laoruumid, kontoriruumid.....	57
Joonis 6.23. Mõõdistatud ala skeem. Punane joon näitab ligikaudset liikumist GeoSLAM ZEB-REVO-ga, algus- ja lõpp-punkti tähistab punane ring all keskel, kollane pind on põrandapinnast moodustunud punktipilv. Aluseks on kaubanduskeskuse projekt.....	58
Joonis 6.24. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv lõikena lae pinnast madalamal, näha on kaubanduskeskuse sisemus, inventar, inimesed, kaubad. Seinad joonistuvad selgelt välja. ....	60
Joonis 6.25. Väljavõtte GeoSLAM REVO punktipilvest, kontori töökoht (AutoCAD tarkvaras).....	61
Joonis 6.26. Riegl VZ-400 punktipilv, kontori töökoht (AutoCAD tarkvaras) .....	62
Joonis 6.27. GeoSLAM ZEB-FARO punktipilv vaatega keskuse lae alla, lambisiinid ja ventilatsioonitorud on punktipilves tuvastatavad (AutoCAD tarkvaras) .....	62
Joonis 6.28. GeoSLAM REVO fragment seinast pealtvaates, punktipilve läbimõõt 26 mm.....	63

Joonis 6.29. Riegl VZ-400 punktipilve fragment seinast pealtvaates, punktipilve läbimõõt 8 mm.	63
Joonis 6.30. Sein pealtvaates lõige 1-2, GeoSLAM 26 mm, Riegl 5 mm.....	64
Joonis 6.31. Sein pealtvaates lõige 3-4, GeoSLAM 18 mm, Riegl 6 mm.....	64
Joonis 6.32. Ukse asukoht pealtvaates lõige 5-6, GeoSLAM 33 mm, Riegl 8 mm.....	64
Joonis 6.33. Sein pealtvaates lõige 7-8, GeoSLAM 21 mm, Riegl 4 mm.....	64
Joonis 6.34. Punktipilve hajuvuse mõõtmise asukohtade skeem pealtvaates .....	65
Joonis 6.35. Väljavõte tööprotsessist, tasandi sobitamine sein punktipilve järgi, histogrammi alusel jääb 75% punktidest (rohekad toonid) 1 cm kaugusele tekitatavast tasapinnast .....	66
Joonis 6.36. Väljavõte tööprotsessist, kus posti kujutava punktipilve alusel moodustati tasapinnad posti külgedele. Punaka tooniga on tasapind, rohelisega on GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv. Selgelt eristub, et väheste punktidega korrektset tasapinda automaatselt moodustada ei õnnestu (posti alumine ja vasak külg). .....	67
Joonis 6.37. Kahe punktipilve võrdlus 3DReshaperis. Histogrammi alusel jääb ca 40% tulemustest 5 mm piiridesse, 65% 10 mm piiridesse ja üle 80% 15 mm piiridesse.....	68
Joonis 6.38. Maa-ameti hoone puhastamata punktipilv mõõdistatud GeoSLAM ZEB-REVO-ga. Tumedam sinine toon on üks käik, heledam sinine toon kolmanda korruse osas teine käik.....	69
Joonis 6.39. Faro punktipilves seintele tasapindade moodustamine, värvilised punktid näitavad, et tasapinna arvutamiseks on kaasatud ka nõ valed punktid kõrvalasuvate seinte osas.....	70
Joonis 6.40. GeoSLAM punktipilves tasapindade moodustamine, tasapinnad arvutatakse värviliste punktide alusel, mis ei kujuta korrektseid seinapindasid .....	70
Joonis 6.41. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilve lõige Maa-ameti hoone esimesest korrusest, fragment pealtvaates. Kollased sirged jooned on autoripoolsed seinakontuurid.....	70
Joonis 6.42. Faro punktipilve lõige Maa-ameti hoone esimesest korrusest, fragment pealtvaates. Punased kontuurid on autori joonestatud seinakontuurid.....	71
Joonis 6.43. Maa-ameti hoone punktipilvede võrdlus, erinevad toonid skaalal 0-0,1 m näitavad ZEB-REVO punktipilve suuremana kui referentsandmed. ....	72
Joonis 7.1. GeoSLAM punktipilves 65 mm (ülemine) ja 90 mm sfäärilise keha genereerimine .....	75
Joonis 8.1 Mõõdistatud ala punktipilv kaevanduse andmete taustal. Oranžiga on tähistatud projekteeritud tervikud, mustaga moodustunud tervikud koos pindalaga, kollane toon on GeoSLAMiga mõõdistatud ala. Sinisega on tähistatud mõõdistusvõrgu punktide asukohad (vt Tabel 8.3).....	86
Joonis 8.2 GeoSLAM mõõdistuse lõige kaevanduse andmete taustal. Oranžiga on tähistatud projekteeritud tervikud, mustaga moodustunud tervikud koos pindalaga, roheline on GeoSLAMiga mõõdistatud ala. ....	87
Joonis 8.3. Koos trajektooriga GeoSLAM punktipilv. Toonid sinisest läbi vikerkaarevärvide punaseni näitavad liikumise suunda. Punased kastid näitavad väljavõtete asukohti. ....	88
Joonis 8.4. GeoSLAM punktipilv trajektooriga punktipilve registreerimist näitavate värvitoonidega sinisest punaseni. Sinised toonid ütlevad, et registreeringu tingimused on head, punased näitavad kehvemaid tingimusi. ....	89
Joonis 8.5 Kahe erineva GeoSLAM punktipilve ühendamine. Kollase ja sinise punktipilve segunemine näitab järjestikuste mõõdistusalade ülekattuvusi.....	90
Joonis 8.6 Maa-aluse kaevanduse kambrite ja tervikute asukohta maapealsete objektide suhtes (mustaga kaevandatud osa, punasega edasiseks kaevandamiseks planeeritud osa). Ortofoto: Maa-amet 2019. ....	92



Joonis 8.7. Mõõdistatud ala laserskänneriga Riegl VZ-400. Punased ringid on skänneri seisukohad, alal kokku 32 seisu. Aluseks osa kaubanduskeskuse plaanist. ....	93
Joonis 8.8. Skeemil plaan kolme löikejoonega ja löiked, kuhu on märgitud lagede ja põrandate löikekohad. ....	94
Joonis 8.9. Riegl VZ-400 ja GeoSLAM REVO omavaheline võrdlus pikkuste ja pindalade osas. Punasega Riegl andmed, sinisega GeoSLAM andmed.....	96
Joonis 8.10. Faro punktipilve teine ja kolmas korrus kohakuti, heledam osa kujutab kolmandat korrust, mis on teisest korrusest lühem ja nihkes .....	98
Joonis 8.11. Punaste toonidega GeoSLAM punktipilv Faro punktipilve kohal kolmandal korrusel. Nihe pilvede vahel on 2,9 m, erinevus tekib pika koridori keskosas.....	99
Joonis 8.12. Maa-ameti hoone plaanid ruumide kontuuride ja pindaladega, punasega tähistatud referentsandmed, sinisega käsiskänneri andmed.....	100

## TABELITE LOETELU

Tabel 5.1. GeoSLAM ZEB-REVO andmetöötuse tulemusel tekkivad faililaiendid ([20] tabel 8-1) ..	28
Tabel 6.1. Koordinaatide plaanilised erinevused punktipilvedes asuvatest sfääridest. ....	41
Tabel 6.2. Tervikute võrdlused Faro, GeoSLAM ja kaevanduses mõõdetud andmete vahel, tervikute nummerdamise aluseks on Joonis 6.13.....	46
Tabel 6.3. Kaevandatud mahtude võrdlemine.....	47
Tabel 6.4 Tervikute pindalade võrdlus.....	49
Tabel 6.5. Mahu võrdlused.....	50
Tabel 8.1. GeoSLAM ZEB-REVO, Faro Focus <sup>3D</sup> X330 ja Riegl VZ-400 tehnilised näitajad .....	84
Tabel 8.2. Markšeidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid kambriplokis 1214 .....	85
Tabel 8.3. Markšeidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid kambriplokis 1707 .....	85
Tabel 8.4. Koordinaatide teisendused L-Est97 süsteemi erinevate Maa-ameti kalkulaatorite abil [25]. Kaevanduse poolt edastatud tulbas on kahe punkti koordinaadid L-Est97 süsteemis, kolmel teisendusel on võrreldud koordinaatide erinevusi saadetud koordinaatidega, parima sobivusega leiti Mäetaguse kalkulaator.....	91
Tabel 8.5. Seinä lõikes punktipilve hajuvuse läbimõõt .....	95
Tabel 8.6. Põrandate ja lagede lõikes punktipilve hajuvuse läbimõõt.....	95
Tabel 8.7. Kaubanduskeskuse ruumide andmed GeoSLAM REVO ja Riegl punktipilvede põhjal ....	97
Tabel 8.8. Maa-ameti hoone ruumide pindalad kolme korruse lõikes, ruumide numbrid on Joonis 8.12 alusel .....	101

## LISADE LOETELU

LISA 1. Töös kasutatud mõõteseadmete tehnilised andmed.....	84
LISA 2. Markšneidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid.....	85
LISA 3. Kambriploki 1707 mõõdistatud ala punktipilv kaevanduse plaaniga.....	86
LISA 4. Kambriploki 1707 punktipilvest tehtud lõige kaevanduse plaaniga.....	87
LISA 5. GeoSLAM punktipilv trajektooriga .....	88
LISA 6. GeoSLAM punktipilv registreeringu tingimusi näitava trajektooriga .....	89
LISA 7. GeoSLAM punktipilvede ühendamise näide .....	90
LISA 8. Koordinaatide teisendamised.....	91
LISA 9. Maa-alune kaevandus maapealse situatsiooniga.....	92
LISA 10. Riegl VZ-400 mõõdistatud punktipilv kaubanduskeskusest .....	93
LISA 11. Kaubanduskeskuse skeem lõigete asukohtadega .....	94
LISA 12. Kaubanduskeskuse näitel punktipilve hajuvuse analüüs .....	95
LISA 13. ZEB-REVO võrdluse skeem referentsandmetega pikkuste ja pindalade osas .....	96
LISA 14. Kaubanduskeskuses võrreldud pikkused ja pindalad .....	97
LISA 15. Faro punktipilv Maa-ameti hoone teise ja kolmanda korruse kohta .....	98
LISA 16. Maa-ameti hoone Faro ja GeoSLAM punktipilv kohakuti kolmanda korruse osas .....	99
LISA 17. Maa-ameti hoone joonestatud plaanid pindaladega .....	100
LISA 18. Maa-ameti hoone ruumide pindalad .....	101
LISA 19. Juhend 3D Reshaperis maa-aluse kaevandamise jaoks vajalike andmete saamiseks.....	102

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

BIM (*Building Information Modeling*) – mudelprojekteerimine, kus 3D mudelile on lisatud ehitise elu ja korraldust sisaldav informatsioon

CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) – Austraalia rahvuslik teadusagentuur

DEM (*Digital Elevation Model*) – digitaalne kõrgusmudel

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) – globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem

IMU (*Inertial Measurement Unit*) – inertsiaalmõõteseade, mis mõõdab kolme telje (x, y, z) suhtes liikumise kiirendust ja pöördenurkasid

LIDAR (*Light Detection And Ranging*) – laserskaneerimisseade

MLS (*Mobile Laser Scanning*) – mobiilne ehk liikuvalt platvormilt tehtav laserskaneerimine

SLAM (*Simultaneous Location And Mapping*) algoritm – samaaegne asukohamääramise ja kaardistamise algoritm

TIMMS (*Trimble Indoor Mobile Mapping Solution*) – Trimble toodetud kaardistamissüsteem sisetingimustes mõõdistamiseks

TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) – terrestiline ehk maa peal tehtav laserskaneerimine

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) – mehitamata õhusõiduk ehk droon

UNIX ajatempel (*timestamp*) – sekundite arv alates 1. jaanuar 1970

3D – kolmemõõtmeline

## SISSEJUHATUS

Ruumiandmete hõive tehnoloogia areng on tänapäeval väga kiire, jätkuvalt töötatakse välja uusi ning paremaid seadmeid ja meetodeid ülesannete lihtsamaks, kiiremaks, ohutumaks ja täpsemaks lahendamiseks. Geodeesia valdkonnas kasutatakse erinevate mõõdistuste teostamiseks laserskaneerimise meetodit, mille tulemusena saadakse ülevaatlikud kolmemõõtmelised punktipilved, nendest omakorda konstrueeritakse 3D mudeleid ja BIM (*Building Information Modeling*) tehnoloogial põhinevaid projekte. Mobiilne laserskaneerimine liikuvale platvormile kinnitatud instrumendiga, kus igal liikumise hetkel määratakse sõiduki asukoht GNSS (*Global Navigation Satellite System*) signaali ja IMU (*Inertial Measurement Unit*) seadme abil trajektooriarvutusteks, on välitingimustes üsna levinud, küll aga on alles algstaadiumis mobiilne laserskaneerimine sisetingimustes. Magistritöös käsitletakse kahte sisuliselt sarnast juhtumit, mobiilne laserskaneerimine maa all ja hoonete siseruumides, st oludes, kus liikumistrajektoori määramiseks ei saa kasutada GNSS signaali.

Käesolev magistritöö võrdleb Eestis Estonia allmaakaevanduses kasutusel olevaid meetodeid uute väljapakutud meetoditega. Markšeiderite ülesannete hulka kuuluvad maa-aluses kaevanduses lae toestamiseks allesjäävate tugitervikute mõõtmine, nende pindalade põhjal hinnatakse, kas toetus on tööohutuseks ja varingute vältimiseks piisav. Markšeiderid peavad välja arvutama maa alt väljaveetava maavara mahu. Estonia kaevanduses tehakse mõõtmistöid hetkel Disto-laadsete laserkaugusmõõtjatega, plaanid joonestatakse CAD-tüüpi CREDO arvutiprogrammis ja mahud arvutatakse lihtsustatult  $\text{pikkus} \cdot \text{laius} \cdot \text{kõrgus}$  valemitega. Senine meetod on kiire ja antud töös leitud tulemuste põhjal piisava täpsusega, ent tegelikkuses ei arvesta see konarustega kaevanduse tugitervikutel, lagedes ja põrandatel. Arenenud tööstusriikides kasutatakse sarnasteks mõõdistustöödeks laserskaneerimist, mis võimaldab täpsemat mõõtmist, ülevaatlikku hetkeolukorda, tulemuste järelevaatamist ja analüüsimist. Magistritöös uuritakse võimalust allmaakaevanduste mõõdistamiseks mobiilse käeshoitava laserskänneriga GeoSLAM ZEB-REVO, millega mõõtmine on kiire, punktipilve genereerimine ei võta kaua aega ning vajalikud tulemused saadakse mõne tunniga. Autor pakub välja lihtsalt jälgitavad sammud mõõtmisest tervikute pindalade ja kaevemahu saamiseks.

Töös analüüsitakse allmaakaevanduses katsetatud seadme sobivust ka hoonete inventariseerimiseks. Plaanide joonestamiseks kasutatakse siseruumide mõõdistamiseks laserkaugusmõõtjaid, detailide ja täpsemate tulemuste saavutamiseks terrestilist laserskaneerimist. Statiivile asetatud skänner võib olla tülikas, sest kogu ruumi „nägemiseks“ peab

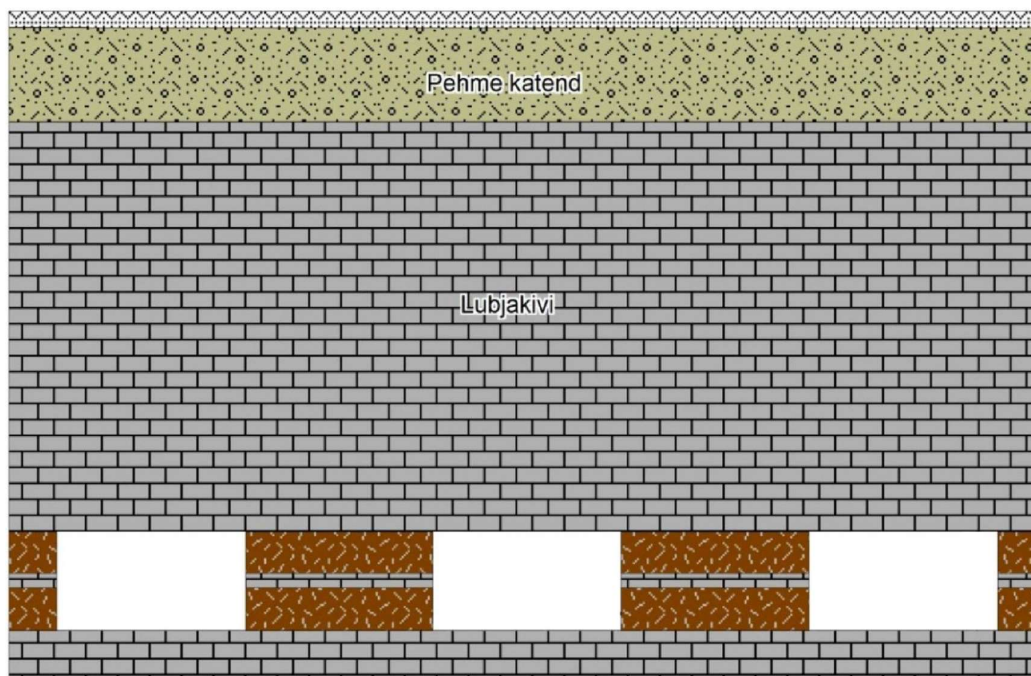
seada ruumis ümber paigutama, ühe seisu mõõtmine võib võtta 5 minutit ja kogu hoone skaneerimine mitmeid tunde, suurte hoonete puhul päevi ning kitsastes ruumides on statiivi ja instrumendi liigutamine raskendatud. Käsiskänneriga mõõdistatakse ehitis kiirelt ja saadav punktipilv on informatiivne materjal hoone ruumide analüüsimiseks.

GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänner on Eestis uudne, ent mujal maailmas on seda aastaid katsetatud ja kasutatud. SLAM (*Simultaneous Location And Mapping*) tehnoloogial põhinev seade loodi algselt maa-aluse kaevanduse mõõdistamiseks, kus GNSS signaal ei levi ja tavapäraseid mobiilseid laserskannereid, mis positsioneerivad ennast satelliitide signaalide järgi, kasutada ei saa. SLAM algoritm võimaldab instrumendi kasutada raskesti ligipääsetavates kohtades ja paikades nagu kaevandused, käigud, kitsad ruumid või koridorid ja tihedad metsad. Seadme töökindlust, kasutustingimusi ja tulemusi on kirjanduses põhjalikult analüüsitud, autor esitab väljavõtteid erinevatest uurimistöödest.

Magistritöö esimene peatükk tutvustab allmaakaevandamist ja annab ülevaate Estonia kaevandusest. Teine peatükk kirjeldab laserskaneerimist üldisemalt, sellele järgneb ülevaade laserskännerite kasutamisest mujal maailmas. Neljas ja viies peatükk tutvustavad antud töö eesmärki ja mõõteseadmeid, GeoSLAM ZEB-REVO-ga töötamist. Kuues peatükk esitab katsetöid ja nende põhjal läbi viidud analüüsi, millele järgneb tulemuste kokkuvõte. Eesti- ja inglisekeelse resümee järel on toodud lisad suuremate jooniste ning tabelitega. Töö lõpus on esitatud juhis uurimistöös peamiselt kasutatud 3D Reshaper tarkvaraga töötamisel maa-aluste kaevanduste markšneideritöödeks vajalike tulemuste saavutamiseks.

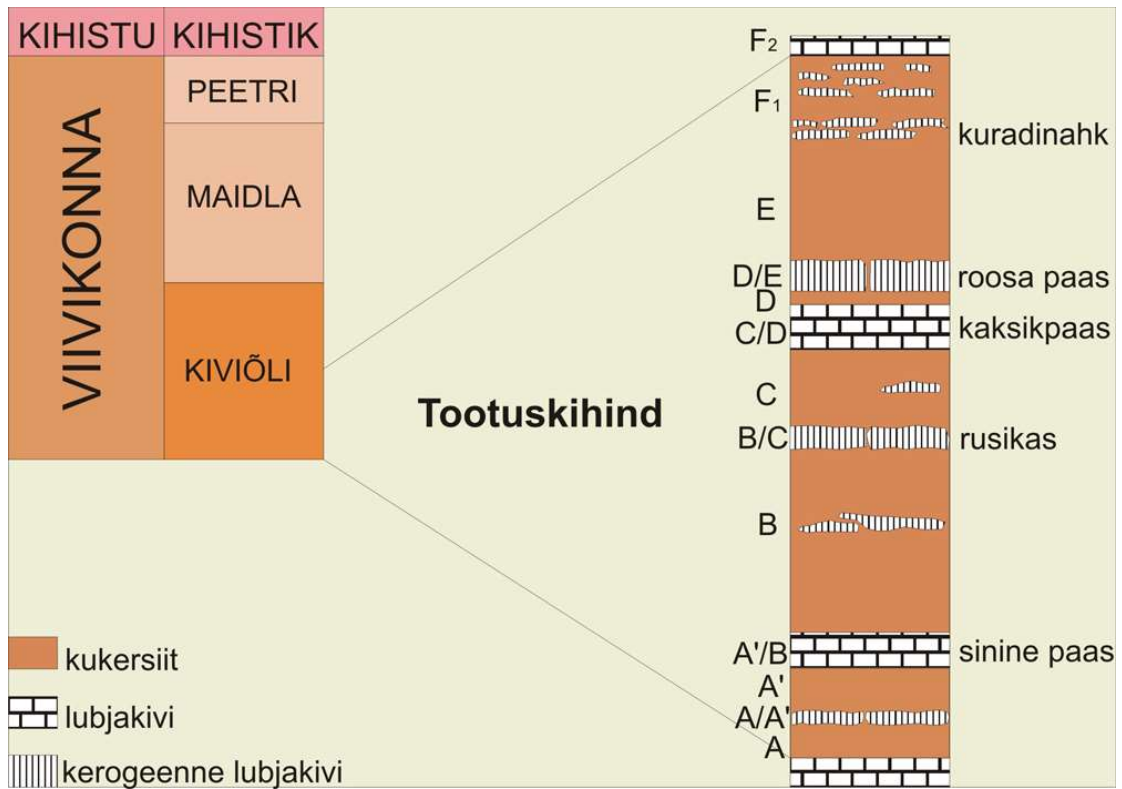
# 1 ALLMAAKAEVANDAMINE

Põlevkivi allmaakaevandamiseks on mitu erinevat tehnoloogiat, Eestis on põhiliseks kasutusel olevaks meetodiks kamberkaevandamine puur-lõhketöödega. Kaevandamisel jäetakse põhilae püsivuse tagamiseks alles sambakujulised tugitervikud ja põhilagi ei vaja lisatoestust. Lähislagi kinnitatakse akrutega põhilae külge, peale kaevandamist ankrud eemaldatakse ja ankurdamata ala muutub ohtlikuks, tervikud võivad laguneda või kokku variseda, maapinnal võivad tekkida iseeneslikud varingud või langatused. Skeem kamberkaevandamise ristlõikest on toodud Joonis 1.1. Kamberkaevandamine toimub Eestis keskmiselt 20 – 70 m sügavusel ja tootuskihindi väljamispaksuseks on ca 2,8 m. [1]



Joonis 1.1. Kamberkaevandamise ristlõike põhimõtteline skeem [1]

Kukersiit on Eesti põlevkivi nimetus, seitse kukersiidikihti koos neid eraldava kuue lubjakivikihiga moodustavad Eesti põlevkivi tootuskihindi. Joonis 1.2 on erineva paksuse, kihi sisemise ehituse ja koostise alusel kukersiididkihid alt üles tähistatud tähtedega A kuni F<sub>2</sub>. Tootuskihindi keskosas on nõrgalt savikas lubjakivikiht C/D paksusega 20 – 25 cm, keskelt pooleksminemisega on kiht saanud erialaspetsialistidelt nimetuse „kaksikpaas“. See on hästi eristuv ja jälgitav kiht (vt Joonis 6.12 valge kiht pildi keskel) ning seda kasutatakse maa-alusel kaevandamisel markeeringuna. [25]



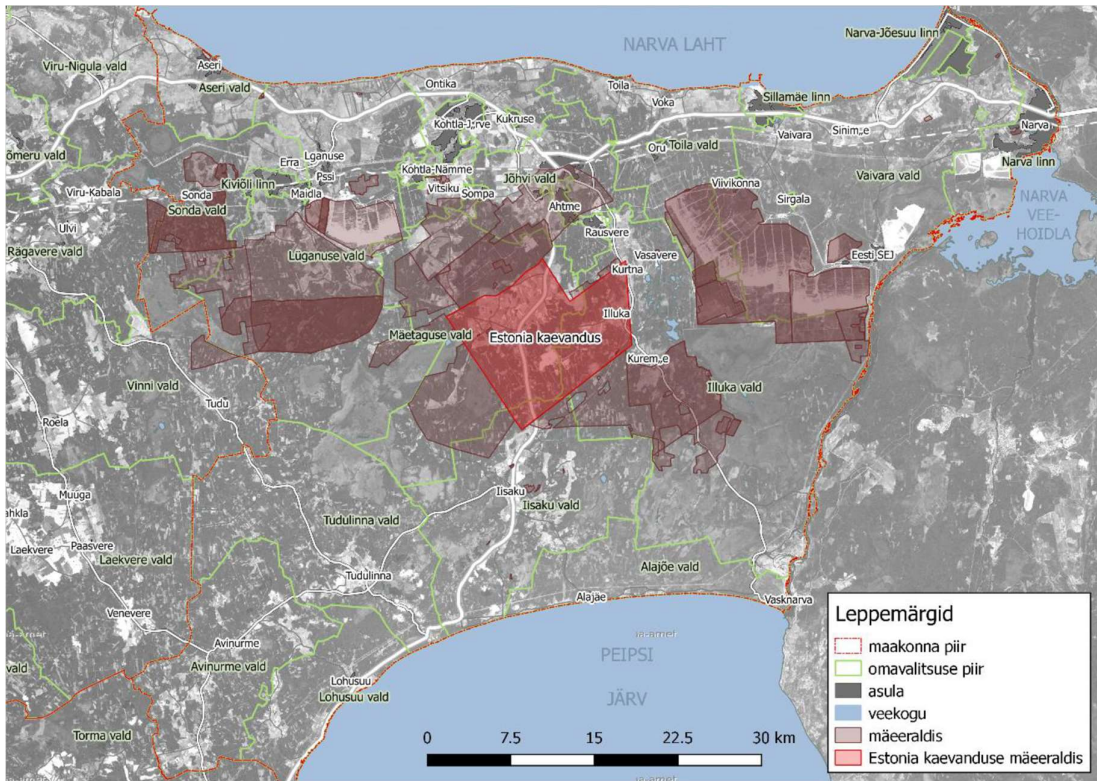
Joonis 1.2. Põlevkivi tootuskihind, C/D kihti nimetatakse „kaksikpaas“ [24]

Markšeiderite jaoks on hele kiht tugitervikute läbilõike määramise aluseks, kaevanduse põrandast asub see ca 1,6 m kõrgusel.

## 1.1 Estonia kaevandus

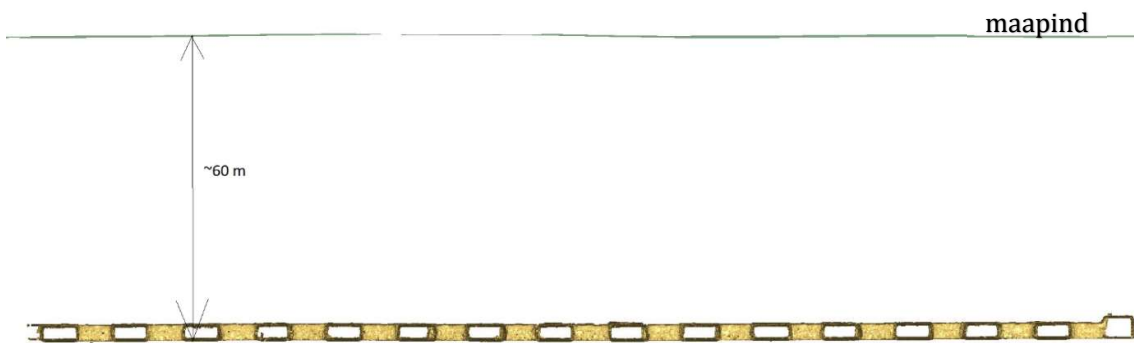
Estonia allmaakaevandus asub Ida-Virumaal Alutaguse valla territooriumil, kaevandus avati 1972. aastal (vt Joonis 1.3). [2]





Joonis 1.3. Estonia kaevanduse mäeeraldis [4]

Eesti allmaakaevanduses toimub töö kamberkaevandamise meetodil erinevatel sügavustel (20-70 m, vt Joonis 1.4) olenevalt tootluskihti katva katendi paksusest. Kaevandusel on kaks kehtivat kaevandamisluba: Estonia kaevandus KMIN-054 ja Ahtme II kaevandus KMIN-119, viimane luba kehtib kuni 2026. aastani. [2]



Joonis 1.4 Maa-aluse tervikurea sügavuslik paiknemine maapinna (genereeritud Maa-ameti 5x5 m sammuga DEM-ist) suhtes.

## 2 LASERSKANEERIMINE

Laserskaneerimise meetod mõõdab lasertehnoloogia abil meid ümbritsevad objekte, kogutud andmeid (x-, y- ja z-koordinaadid) kasutatakse kahemõõtmeliste jooniste või kolmemõõtmeliste mudelite konstrueerimiseks. [5]

Maapealse laserskaneerimise võib jagada kaheks, staatiline ja dünaamiline. Staatilisel laserskaneerimisel on mõõteseade paigal ühel kindlal punktil, dünaamilisel skaneerimisel kinnitatakse instrument mobiilsele platvormile ja mõõtmine toimub liikudes. [6] Mobiilne laserskaneerimine toimub *stop-and-go* meetodil (möödistuse hetkel on skanner staatilises asendis, seejärel liigub edasi järgmisele punktile) või võimalikult ühtlase tempoga pideva skaneerimisena. Liikumisel on oluline mõõteseadme asukoha määramine, mistõttu peaks skannerile lisaks töötama GNSS vastuvõtja ja IMU (*Inertial Measurement Unit* – inertsiaal mõõteseade). [7]

GeoSLAM ZEB-REVO on käeshoitav (või liikuvale platvormile kinnitav) mobiilne laserskanner, mis töötab ilma GNSS seadmeta (aga koos IMU seadmega) ja kasutab andmetöötluseks SLAM (*Simultaneous Location And Mapping*) algoritmi (seadme täpsem tööpõhimõte vt ptk 5.1.1 ).

Terrestilist laserskaneerimist kasutatakse erinevatel geodeetilistel töödel kontrollmeetodina, kuna saadavad andmed on täpsed ja detailsed. Magistritöös käsitletakse referentsandmetena terrestilist staatilist laserskaneerimist ja uuritakse mobiilset laserskaneerimist käsiskänneri GeoSLAM ZEB-REVO näitel.

### 3 VARASEMATE UURIMISTÖÖDE ÜLEVAADE

#### 3.1 Allmaamöödistamine

Kaevanduste möödistanemise ja nendeks kasutatava tehnoloogia areng on viimastel aastatel mitmetes tööstusriikides olnud kiire luues uusi meetodeid, mis võimaldaksid objektide möödistanemist väiksema ajakulu ning suurema täpsusega ohutumalt, majanduslikult vähemkulukamalt ja mida suudaksid teostada ka ilma kõrgete tehniliste teadmisteta töötajad. Kasutusele on võetud laserskaneerimine ja mobiilne laserskaneerimine, samuti katsetatakse ja kasutatakse UAV-sid (*Unmanned Aerial Vehicle*) koos skaneerimisseadmega.

Indias on kaevanduses kasutatavatest geodeetilistest instrumentidest ühe kaare-sekundi täpsusega teodoliidi, digitaalnivelliiri, GNSS seadme ja tahhümeetri kõrval üles loetud meetodid 3D laserskaneerimine ja fotogrammeetria. Laserskaneerimine võimaldab mööta korraga palju punkte ohutust kaugusest, sellega saab täpsema pildi ja mudeli, mida kasutatakse mahtude arvutamisel, kaevanduse käikude projekteerimiseks, kvaliteedi kontrollimiseks ja edasisteks analüüsideks. [8][9] Tšehhis on laserskaneerimine aastaid kasutusel, lisaks tavapärastele mahumöötmistele saab kontrollida lagede stabiilsust ja deformatsioone. [10] Hollandis on terrestiline laserskaneerimine, aerolaserskaneerimine, aerofotogrammeetria ja UAV kaevandustehnoloogiate nimekirjas. Maa-alustes käikudes kasutatakse mobiilseid laserskännereid, mis on kerged, mõistliku hinnaga ja annavad ülevaatliku pildi maa all toimuvast, mõned skännerid kasutavad punktipilve arvutamiseks SLAM tehnoloogiat, mida antud magistritöös kirjeldatakse. [11]

Maailmas on terrestilised laserskännerid kaevandustes aastaid kasutusel olnud võimaldades möödetavast objektist kõrge kvaliteedilist 3D punktipilve, ent nende edasiliigutamine ja paikaseadmine on tülikas, mis teeb statiivile kinnitavate skänneritega möödistanemise aeganõudvaks. Mobiilsed laserskännerid on kerged, kompaktsed ja kiired. Instrumendi saab paigaldada liikuvale sõidukile, see on ohutu ja turvaline. uGPS Rapid Mapper on auto külge kinnitatud mobiilne laserskanner, millega möödistanemiseks kasutatakse maa-aluseid kaevandusi. [12] Instrumendist annab põhjaliku ülevaate Julian Simela doktoritöö [13], kus lisaks uGPS Rapid Mapperile on kaevanduses kasutatavate seadmetena loetletud ka SLAM tehnoloogial põhinev käsiskanner ZEB1 (vanem generatsioon seadmest ZEB-REVO), Trimble Indoor Mobile Mapping Solution (TIMMS) ja MineFly (droonilaadne süsteem). [13] Arendatakse droone, mis suudaksid kanda laserskännereid, eraldi on välja töötatud nii maa peal liikuv kui ka lendav droon TILT Ranger

spetsiaalselt kaevandustööde tarvis. Robot sõidab ja vajadusel lendab, külge kinnitatud SLAM tehnoloogial põhinev skanner mõõdistab maa-aluseid käike ohutult ja kiirelt. [14] Droonide kasutamine kõrgete ja laiade kaevanduskäikude puhul on realistlik mõõdistusviis, Eesti Estonia madalates allmaakaevetöötes ei oleks see mõeldav.

2011. aastal sooviti Austraalias asuvast Northparkes kaevandusest täpset 3D mudelit eesmärgiga uurida, kas ja kuidas mahuksid suuregabriidilised kaevemasinad seal liikuma. Varem kasutati laserskannereid *stop-and-go* meetodil, kus skaneerimiseks peab aeg-ajalt seisma jääma, mistõttu töö oli väga ajamahukas. Mobiilsed laserskannerid tuginevad GNSS signaalile positsioneerides asukoha ja võimaldades liikudes mõõdistada, ent maa all satelliitsignaale ei tööta ja seadet kasutada ei saa. Austraalia CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) teadlased ehitasid SLAM algoritmil põhineva laserskanneri, millega sõideti läbi ja mõõdistati 17,1 km pikkune tunnel alla kahe tunniga. Keerlev 2D laserskanner ja IMU koos arvuti ja akudega asusid autos eraldi, kaevanduse mõõdistuse järel analüüsiti tulemusi ja seadme funktsionaalsust, mistõttu instrumenti täiendati ja täiustati, et see oleks edaspidisteks töödeks lihtne ja kompaktne mõõtesead. [15] Arendustööna valmis esimene mobiilne käeshoitav laserkanner ZEB 1, mis ei vajanud asukoha positsioneerimiseks GNSS vastuvõtjat. [16]

lirimaal skaneeriti ZEB 1 käsiskänneriga 17,7 km 200 m sügavusel Lisheeni kaevandust. Varem mõõdistati tunnelis elektrontahhümeetritega, 15 m 3D mudeli koostamiseks kulus 45 minutit mõõdistamist, käsiskänneriga kulus vaid kolmandik sellest ajast. Kinnitati, et punktipilv annab usaldusväärsemad profiilid kui elektrontahhümeetritega mõõdetud üksikud punktid. [17]

Eestis ei ole kaevanduses UAV ega laserskaneerimine geodeetiliste instrumentidena kasutusel olnud, teataval määral on põhjused seadusandluses, mis nimetatud seadmeid mõõteinstrumentidena siiani kasutada ei ole lubanud. Markšeidermõõdistusele annavad juhised Maapõueseadus [18], kus on märgitud, et „markšeidermõõdistusega tuleb tagada kaeveõõne projektikohane suunamine, tehtud tööde tulemuste mõõdistamine ja dokumenteerimine, maavara koguse määramine“, lisaks tuleb tööd läbi viia kontrollitaval meetodil. [18] Eraldi on mõõdistustele kehtivad nõuded välja toodud 03.05.2019 vastu võetud majandus- ja taristuministri määruses Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord [34]. Maa-aluse mõõdistuse jaoks võiks Eesti kaevandustes kasutada laserskaneerimise tehnoloogiat, mis on täpne, detailne ja kontrollitav, meetodi sobivust geodeetilisteks töödeks on varasemalt uuritud ja analüüsitud nt artiklis [31]. Käesolev magistr töö uurib Eestis uudse SLAM tehnoloogial põhineva mobiilse laserskanneri GeoSLAM ZEB-REVO kasutusvõimalusi kaeveõõnte mõõdistamiseks Estonia

kaevanduse näitel ja toob välja sammudena jälgitava juhendi punktipilvest vajalike mõõteandmete saamiseks 3D Reshaper tarvara abil.

### 3.2 Hoonete laserskaneerimine

Hoonete puhul on laserskaneerimine levinud meetod, sest üha rohkem tegeletakse BIM projekteerimisega, mis nõuab täpseid ja kõikehõlmavaid mudeleid. Mudelite konstrueerimiseks on laserskaneerimine eelistatuim, see mõõdab kõik detailid suure täpsusega punktipilveks. Keeruliste hoonete puhul on inventariseerimisjooniste koostamine punktipilve abil lihtsam kui laserkaugusmõõtjatega mõõtmine, veatekkeallikaid on vähem ja kokkuvõttes töö kiirem. Hoonete mõõdistamisel on laserkaugusmõõtja kõrval põhiline meetod terrestiline laserskaneerimine, kus skänneri asukohta tuleb takistuse taha nägemiseks vahetada ja ruumide mõõtmine toimub erinevatest seisudest. Kuna töö on aeganõudev ja tülikas, siis otsitakse uusi lihtsamaid lahendusi. Üheks meetodiks võiks olla hoonete mõõdistamine SLAM tehnoloogial põhineva GeoSLAM seadmega ZEB-REVO.

2019. aastal Russhakim jt koostatud uurimistöös [28] võrreldi hoonete mõõdistamisel kasutatavaid erinevaid mõõtmismeetodeid, GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänner (MLS), staatiline laserskänner Leica C10 (TLS) ja laserkaugusmõõtja Agatec Distometer. Skaneerimisandmete alusel koostati mõõdistusalast 3D mudelid, mida võrreldi laserkaugusmõõtja (kolmekordse mõõtmise keskmine) andmetega. Mõõdistusalas leiti kõigi meetoditega samades asukohtades 8 erinevat pikkusmõõtu võrdluse jaoks ja vastavad andmed koondati tabelisse. Maksimaalne erinevus oli MLS ja kaugusmõõtja vahel, 0,233 m, vähim erinevus oli TLS ja kaugusmõõtja vahel, 0,002 m. Keskmine ruutviga kaugusmõõtja ja TLS vahel oli 0,001 m, samas kaugusmõõtja ja MLS vahel 0,007 m, mistõttu staatiline skänner andis mõõdistamisel laserkaugusmõõtjale lähedasemaid tulemusi võrrelduna käsiskänneriga. Kokkuvõtvalt leiti, et TLS andmeid võib kasutada hoonete mõõdistamisel ja mudelite koostamisel suure täpsuse ja detailsuse saavutamiseks, mobiilse laserskaneerimise meetod on ehitiste plaanide koostamiseks sobilik, sest tekkinud erinevused instrumentide võrdlusel on väikesed ja kaotavad ümardamisel tähtsuse. [28]

Nocerino jt [19] uurisid kahte mobiilset laserskännerit, Leica Pegasus: Backpack seljakott ja GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänner. Kahekorruselise hoone sisemõõdistusteks kasutati alusandmestikuna terrestilise laserskänneri Leica HDS7000 (TLS) tulemusi. Punktipilvedes

kujutatud lagedele ja põrandatele mudeldati horisontaalsed ning seintele vertikaalsed pinnad, sambad kujutati silindritena, see võimaldas hinnata tekkinud müra, punktipilve hajuvust. TLS-iga mõõdetud keskmised ruutvead jäid 0,1 ja 0,2 cm juurde, ZEB-REVO andis tulemusteks 0,9 cm horisontaalsetel ja silindrilistel ning 1,1 cm vertikaalsetel pindadel, Pegasuse keskmised ruutvead olid suurimad, 1,2 cm horisontaalsetel pindadel, teistel 1,8 ja 1,9 cm. Teoreetiliste pikkuse mõõtmise vigade põhjal on terrestiline laserskänner täpsuse poolest parem instrument ja vahemaa kasvades täpsus teistega võrreldes suureneb (teoreetiline pikkuse mõõtmise viga 0,6 kuni 2,3 cm, MLS puhul 12,7-127,3 cm ja Pegasus 21,2 – 212,1 cm). Uurimistöö tulemused andsid suhteliseks pikkuse mõõtmise veaks (TLS suhtes) ZEB-REVO seadmel 0,001% kuni 0,115%, mis oli parem kui nõutav teoreetiline täpsus. Pegasusega saadud tulemuste erinevused olid 0,047% ja 2,416% vahel. [19]

Täpsemalt käsitleb SLAM tehnoloogial põhineva mobiilse skänneriga mõõtmist erinevat tüüpi hoonete näitel Sammartaro ja Spano artikkel [20]. GeoSLAM ZEB-REVO skänneriga mõõdistatakse erinevaid olukordi ja analüüsitakse tulemusi, kokkuvõttena leitakse mitmeid eeliseid käsiskänneri kasutamiseks nagu mõõdistusalad, kus GNSS signaal ei levi, kiire skaneerimine ja punktipilve genereerimine ning kompaktsus. [20] Eeltoodud artiklid ja uurimistööd annavad põhjaliku ülevaate ZEB-REVO kasutamisest hoonete mõõdistustöödel, mistõttu käesolevas magistris keskendutakse eelkõige Estonia kaevanduses läbiviidud katsetöödele ja nende tulemuste esitamisele ning põgusamalt ehitiste skaneerimisele. Eestis ei ole palju ettevõtteid, kes peale Hades Geodeesia OÜ SLAM tehnoloogial põhinevat käeshoitavat laserskännerit omaks või kasutaks, seega on asjakohane uue tehnoloogia puhul anda lühiülevaade instrumendi töövõimalustest ka väljaspool kaevandusi, ent valdkond vajab edasist põhjalikumalt uurimist ja analüüsi.

## 4 TÖÖ EESMÄRK JA METOODIKA

Magistritöö eesmärgiks on analüüsida käsiskänneri GeoSLAM ZEB-REVO sobivust maa-alusteks mõõdistustöödeks laserkaugusmõõtjate asemel tootmise efektiivistamise ja täpsuse suurendamise eesmärgil.

GeoSLAM ZEB-REVO on mugav instrument sisemõõdistustöödeks, lühikese ajaga tekib punktipilv, mis on täpsem ja informatiivsem kui laserkaugusmõõtjaga üksikute mõõtude võtmine. Seetõttu uuritakse seadme sobivust ka inventariseerimisjooniste koostamiseks, kuna instrumendiga töötamine on lihtne, kiire ja asendaks kaugusmõõtjaid hoonete mõõdistamisel.

Maa-alustes kaevandustes saadud mõõdistusandmeid võrreldakse terrestilise laserskänneri andmetega nii visuaalselt kui ka statistiliste näitajate alusel nagu mõõtmiste keskmine, mediaan, standardhälve, suhteline erinevus referentsandmetest. Samamoodi on hoonetel saadud punktipilvede võrdlemiseks välja toodud visuaalne pilt ja erinevad statistilised näitajad.

## 5 KASUTATUD MÕÕTESEADMED

### 5.1 GeoSLAM ZEB-REVO

GeoSLAM ettevõtte poolt toodetud ZEB-REVO (Joonis 5.1) on mobiilne laserskanner, kus 3D punktipilve kogumine soovitud alast toimub jalutaja kõnnikiirusel. Seade ei vaja töötamiseks GNSS signaali ega liikuvale platvormile paigutamist.



Joonis 5.1. Autor GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänneriga Estonia kaevanduses

Inglismaal paiknev GeoSLAM ettevõtte alustas 2012. aastal koos CSIRO (Austraalia rahvusliku teadusagentuuri) ja 3D Laser Mapping ettevõttega. Järgmisel aastal tutvustati ZEB 1 seadet, maailma esimest SLAM tehnoloogial põhinevat instrumenti. Aastal 2015 toodi välja uus versioon ZEB-REVO ja 2017 liideti sellele kaamera, mis võimaldab reaajas oma liikumist jälgida, instrumendi nimeks sai ZEB-REVO RT (*Real Time*). Kõige hilisem SLAM tehnoloogial põhinev seade on ZEB Horizon, mida saab kasutada välitingimustes ja paigaldada UAV-le. [16]

ZEB-REVO erinevad osad on toodud Joonis 5.2.





Joonis 5.2. GeoSLAM Zeb-Revo osad: 1 – käeshoitav laserskänner; 2 – andmete salvestaja; 3 – põhikaabel; 4 – allalaadimiskaabel; 5 – USB mälupekk; 6 – GeoSLAM Hub litsentsi võti; 7 – akulaadija ja adapterid; 8 – 12 V autoakulaadija; 9 – seljakott [21]

GeoSLAM ZEB-REVO tähtsamad tehnilised andmed on koondatud LISA 1 Tabel 8.1.

### 5.1.1 ZEB-REVO tööpõhimõte

ZEB-REVO seadmel on 2D laserkiirguse skänner (LIDAR), mis on ühendatud IMU-ga, ühes tasandis pöörlev laseripea annab edasiliikumisega kolmemõõtmelise informatsiooni jaoks vajaliku kolmanda mõõtme. SLAM ehk samaaegne asukohamäärang ja kaardistamine on algoritm, mis ühendab 2D laserskaneerimisandmed IMU andmetega, et luua 3D punktipilv. Andmete töötlemiseks on loodud tarkvaraline rakendus GeoSLAM Hub, mille abil saab kasutaja tervikliku 3D punktipilve. [21]

SLAM algoritm hõlmab kahte omavahel sõltuvuses olevat osa, ühelt poolt on asukohta määraval robotil vaja kaarti, et oma paiknemine kindlaks teha, teiselt poolt on vajalik määrata asukoht, et ümbritsevat kaardistada. Lahendusena on välja töötatud mitmeid erinevaid algoritme sama eesmärgiga. SLAM põhimõttel liigub robot ruumis ja samaaegselt loob ümbritsevast kaardi (või punktipilve) järg-järguliste lahenduste abil. Algasukohta ei ole vaja määrata, robot hindab enda ja

ümbritseva asukoha pidevate mõõtmiste abil samaaegselt asukohta ja ümbritsevat järgmise mõõtmisega parandades ja täiendades. [29]

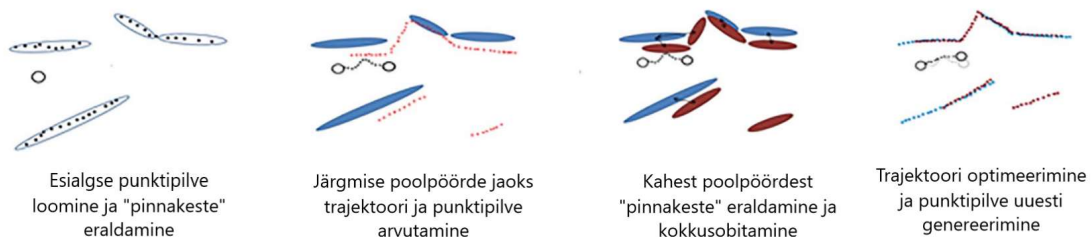
Publikatsioonid [15] ja [32] selgitavad üksikasjalikult ZEB 1 instrumendi eelkäija 2D LIDAR SICK LMS291 töötamise põhiprintsiipi ja SLAM algoritmi tööprotsessi, paremate tulemuste saavutamiseks on algoritmi aastate jooksul täiendatud ja parandatud ning ZEB-REVO seadme algoritm on selle võrra muutunud.

Instrumendi LIDAR sensor väljastab igas sekundis 43 200 punkti silmale nähtamatu laserkiirgusena. Kiir peegeldub ümbritsevatelt pindadelt sensorile tagasi ja tagasipeegeldunud laserkiire kulgemisaja kaudu arvutatakse objekti ja sensori vaheline vahemaa [30]

$$D = \frac{ct}{2} , \quad [5]$$

kus  $D$  on vahemaa (m),  $c$  on valguse kiirus õhus ( $m/s^2$ ) ja  $t$  on sensorist sihtmärgini ja tagasi leviva kiire kulgemisaeg (s).

Joonis 5.3 on esitatud SLAM algoritmi tööpõhimõtte sammude kaupa. Seadmes kasutatav IMU määrab mõõdetava ruumi ja seadme esialgse asukoha (mõõdistab põikikalde, pikikalde ja suuna (*roll, pitch, yaw*)), koos sensori andmetega genereerib SLAM algoritm liikumise esialgse trajektoori. Vahemaa iga ruumipunkti ja sensori vahel on teada, IMU ja LIDARi andmete põhjal arvutab algoritm kokku punktidest koosneva ruumiosa. Kuna esmane trajektoor on ebatäpne, siis ka tekivad punktipilv on suurte moonutustega, ent väikeses ruumiosas lühikese intervalli jooksul võib seda lugeda ligikaudu korrektseks. Punktidest eraldatakse asukohta ja pinnanormaali sisaldavad väikesed ruumiosad ehk „pinnakesed“ („*surfels*“ [15][35]) vokselite (vähim 3D element, millele saab omistada tunnuseid) võrgustiku abil (uuritakse punkte, mis erinevatesse vokselistesse satuvad ja seeläbi leitakse vokseli kuju ehk „pinnakese“ parameetrid). [15] [30]

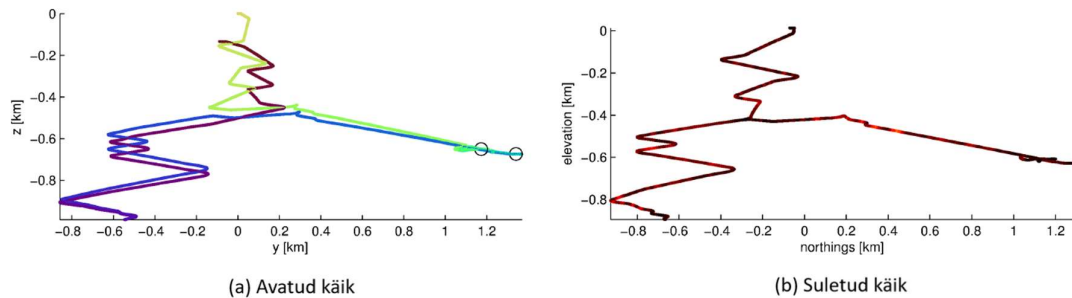


Joonis 5.3. SLAM algoritmi tööpõhimõtte sammud punktipilvede arvutamisel, modifitseeritud [35]

Pöörleva 2D sensori sümmeetriast tulenevalt piisab kogu vaatevälja skaneerimiseks poolest pöördest („*sweep*“ [30]), seega esialgne trajektoori lõik ja punktipilve osa arvutatakse ühe

poolpöörde andmete alusel. Järgmise poolpöörde jaoks leitakse liikumise trajektoor ja punktipilv eelkirjeldatud meetodil. Seejärel sobitatakse omavahel kahest poolpöördest eraldatud „pinnakesed“ ja korrigeeritakse ning tasandatakse esialgset trajektoori. Igal sekundil tehakse läbi sama skeem, uue iteratsiooniga täiendab instrument andmeid oma asukohast ja ümbitsevast ning punktipilv suureneb. [15] [30]

Käigu sulgedes saab algoritm kogu võimaliku informatsiooni ümbritsevast ja korrigeerib tekkinud trajektoori ning sellega ka punktipilve vastavalt lõplikele andmetele (vt Joonis 5.4). Suletud käik annab geodeesias tuttava sulgemisvea, mis käigu peale ära jagatakse, põhimõtteliselt töötab algoritm samadel alustel viies käigu alguse ja lõpu omavahel kokku. [15] [30]



Joonis 5.4. Avatud käigu trajektoor (nihkes) ja käigu sulgemisega parandatud trajektoor, modifitseeritud [15]

### 5.1.2 GeoSLAM ZEB-REVO instrumendiga mõõtmine

Käsiskänneriga mõõtmisel on kindlad nõuded ja ettekirjutused, mida jälgida. Seadmel puudub ekraan, operatsioonid käivad ühe nupu abil, vastavalt situatsioonile põleb või vilgub instrumendi teavitustuli erinevates värvides, värvide tähendused ja põlemisrežiimid on kirjeldatud ZEB-REVO juhendis [21]. Andmete allalaadimine toimub mälu pulga abil. Loodavad failid sisaldavad kindlat failinime vastavalt mõõdistamisajale: andmete salvestusseadme kuupäev ja kellaeg (näiteks 2019-02-21\_08-27-47.zip). Andmefailid on laienditega *.params* ja *.bag* (tekib 5 faili). [21]

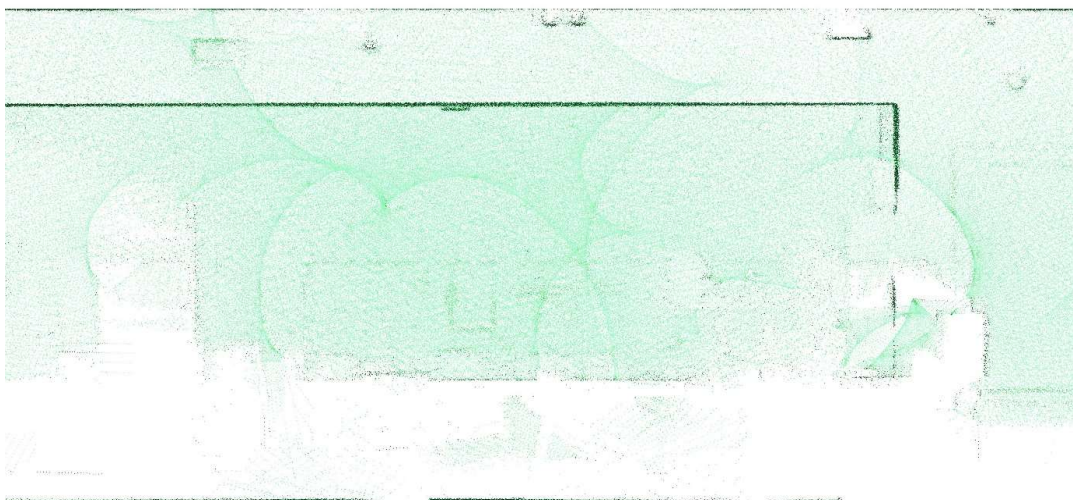
Punktipilve tekitamiseks kasutatakse GeoSLAM Hub tarkvara, failid laetakse tarkvarasse ja SLAM algoritmi abil genereeritakse automaatselt 3D punktipilv. Väljastatavad failiformaadid on *.e57*, *.las*, *.laz*, *.ply*, *.txt(ascii)*. Genereerimisel saab valida väljastatavate punktide arvu (100% puhul väljastatakse kõik punktid), punktide vahemiku, värvid (ühevärviline, punasest siniseni, hallskaala, vastavalt mõõdistusolukorrale punasest siniseni (sinine hea, punane halb), vastavalt kujule on

siledad pinnad roosad ja mittedaled sinisest roheliseni, kaamera olemasolul reaalse värvi võimalus), lisada ajatempli ja igale punktile normaali (va *.las* ja *.laz* failiformaatides). Punkt pilve genereerimine võtab ligikaudu sama kaua aega kui ühe mõõdistuskäigu tegemine, ent kui lisada videomaterjalid (punktidele värvi omistamiseks), siis on andmetöötlus kaks korda pikem. Töötuse järel väljastatakse erinevaid faile, faili lõpp kirjeldab faili sisu (vt Tabel 5.1). [21]

Tabel 5.1. GeoSLAM ZEB-REVO andmetöötluse tulemusel tekkivad faililaiendid ([21] tabel 8-1)

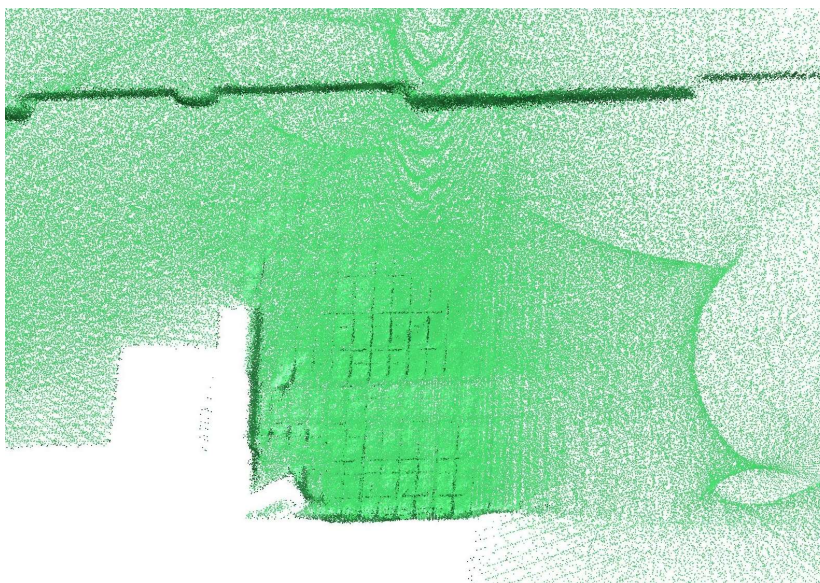
Valik	Laiend	Selgitus
Punktide %	_%X	X näitab väljastatavate punktide protsentväärtust, 100 % puhul jäetakse ära
Punktide vahemaa	_XXmm	XX näitab valitud punktide vahemaad, valimata juhul jäetakse ära
Punkti värv	_height _time _shade _cond _shape _zebcam _zebcamsh	Kõrguse järgi Aja järgi Halliskaala SLAM algoritmi arvutustulemuste põhjal mõõdistusolukorra järgi Kuju järgi Kaamera järgi Kaamera järgi ja halliskaala Valimata juhul jäetakse ära
Ajatempel	_ts _tss	UNIX ( <i>timestamp</i> ) ajatempel Skaneerimisaeg Valimata juhul jäetakse ära
Normals	_norm	Lisatud normaalid Valimata juhul jäetakse ära

GeoSLAM ZEB-REVO instrumendiga mõõtes liigutatakse seadet käes üles-alla-paremale-vasakule, mistõttu punkte skaneeritakse erineva tihedusega, ühes kohas rohkem, teises vähem, punkt pilve „seintele“ tekivad 2D sensori pöörlemisest kaarjad jooned (vt Joonis 5.5).



Joonis 5.5. GeoSLAM REVO-ga mõõtmisel tekkivad nõ ringjad jooned on punktipilves eristuvad, joonisel magistritöös uuritud kaubanduskeskuse seinapind

Käsiskänneriga mõõdistatud punktipilves tekivad tihedamad ja hõredamad kohad sõltuvalt sellest, kas asukohta on skaneeritud pikalt ja/või korduvalt. Näide punktipilve seinast, kus toimus instrumendi esialgne ja lõplik initsialiseerimine (käigu algus ja lõpp) on esitatud Joonis 5.6. Initsialiseerimisel mõõdistab ühe koha peal pöörlev skänneri pea ümbruse mitmekordselt ja tekib joonise keskel näha olev tihe punktipilv. Siin võiks arvata, et seinä peal asuvad väikesed piklikud plaadid, samas tiheda skaneeringu „kõrval“ selliseid plaate enam ei erista.



Joonis 5.6. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kaubanduskeskuse seinast, kus seinä ees oleval laual toimus instrumendi esialgne ja lõplik initsialiseerimine.

Kui võtta eelnev asukoht staatilise laserskänneri Riegl VZ-400 punktipilves, siis selgub, et seinal asuvad ristipidi piklikud telliskivid (vt Joonis 5.7). Kui punktipilv ei ole ühtlaselt selge nagu nt Riegl skänner seda võimaldab, siis detailide osas võib ZEB-REVO punktipilvest jääda ekslikud arvamused. Väikesed plaadid GeoSLAM punktipilves võivad olla tingitud initsialiseerimise lõpu ja alguse kokkusaamise asukohast, kus SLAM algoritm ei ole suutnud punktipilve kõikide detailideni kokku arvutada, suuremad ja selgemad detailid on arvutusalgoritmi kaasatud, ent väiksemad ja detailsemad jooned, mida on korduvalt skaneeritud, on arvutustest eemaldatud ja punktipilve kokkupanemisel jäävad jooned mitmekordselt nähtavale.



Joonis 5.7. Riegl VZ-400 skaneeritud punktipilv asukohast, kus toimus GeoSLAM REVO initsialiseerimine.

ZEB-REVO punktipilvest väljaloetava informatsiooni ja pilve täpsuse analüüs on toodud järgnevates peatükkides.

### 5.1.3 Juhised GeoSLAM instrumendi käsitlemiseks

GeoSLAM ZEB- REVO jaoks on alljärgnevalt esitatud juhised mõõtmisel parima tulemuse saavutamiseks [21]:

- Mõõdistatav ala tuleks läbi käia, et tuvastada keerulisemad situatsioonid või problemaatilised asukohad nagu avatud ruumid, sileda seinaga läbikäigud, ukseavad, trepid. Läbi mõelda käigu sulgemise võimalikkus.
- Objekti geomeetria paremaks hõivamiseks peaks objekti suuruse ja mõõtmiskauguse suhe olema 1:10, st 5 m kauguselt mõõtes peaksid objektid olema suuremad kui 0,5 m.

- Problemaatilistes asukohtades peaks võimalusel lisama ruumi eristavaid elemente nagu kastid koridori või pargitud auto välitingimustes. Ala tuleks korduvalt skaneerida, et saada võimalikult palju ühiseid punkte SLAM algoritmi paremaks toimimiseks. Vältida tuleks liikuvaid objekte, mida algoritm võib tõlgendada fikseeritud objektidena ja seeläbi ümbritseva valesti kokku arvutada.
- Kuna SLAM algoritm töötab põhimõttel, kus järgmine asukoht arvutatakse eelmise suhtes, siis pika käigu puhul võib lõplik punkt pilv „ujuma“ hakata. Vigade vähendamiseks või vältimiseks on nõutud vähemalt ühe käigu sulgemine mõõdistataval alal, paremal juhul võiksid kõik käigud suletud olla, sest käigu sulgemine nagu tavageodeesias võimaldab tekkinud nihke jagada käigu peale laiali. Ringjad käigud on paremad kui edasi-tagasi liikumised, horisontaalsed ja vertikaalsed käigud läbi avauste ja korruste vahel liikudes annavad paremaid tulemusi. Käigu lõppedes on oluline skaneerida samu elemente, mida käigu alguses, et skaneeringusse jääksid samad punktid käigu kokkuviimiseks.
- Erinevate keskkondade üleminekul peaks olema tähelepanelik (ukseava läbimine), sest äkilisest keskkonnamuutusest ei pruugi algoritm aru saada. Tuleks liikuda rahulikult läbi ava nii, et hetkeks skaneeriks seade mõlemat ruumi korraga. Uste avamisi tuleks vältida, võimalusel need varasemalt lahti teha või avada ukсед oma selja taga ja liikuda avaustest selg ees. Avadest läbiminekuks vältida liikuvate objektide skaneerimist.
- Käimise kiirus peaks olema aeglane, sest liiga kiire liikumisega ei pruugi olla piisavalt ruumiandmeid käigu kokkuarvutamiseks.
- Maksimaalne skänneri mõõteulatus on 30 m, ent seda sisetingimustes ja hästi peegelduvate objektide suhtes. Tavaline mõõtekaugus on 15 – 20 m, parima tulemuse saavutamiseks soovitatakse mõõdistada kuni 10 m kaugusel olevaid esemeid. Skaneerija punktipleve jäämise vältimiseks väga lähedasi objekte ei skaneerita, mistõttu ei soovitata seinu või lagesid liiga lähedalt mõõta.
- Väga suurte objektide puhul on soovitatav need väiksemateks osadeks jagada, maksimaalne käigupikkus peaks olema 30 minutit rahuliku kõnniga (1 – 3 km), et failide maht liiga suureks ei läheks ja käigu viga ei suureneks.
- Keerulistesse kohtadesse sisenedes võib skänneri vahepeal statsionaarsesse asendisse panna või käes üles-alla liigutada.
- Enamikel juhtudel saab SLAM algoritm liikuvate objektide skaneerimisega hakkama, ent mõnikord võib ta liikuvat objekti käsitleda kui liikumatut ja arvutused valesti teha. Seega soovitatakse eelkõige keerulised olukorrad nagu avaustest läbiminekuks, pikad koridorid või avatud ruumid skaneerida ilma saatjaskonnata või jätta nad vähemalt 20 m kaugusele mõõdistajast. [21]

## 5.2 Faro Focus3D X330

Magistritöös kasutatavad referentsandmed on kogutud staatilise laserskänneriga Faro Focus<sup>3D</sup> X330 (vt Joonis 5.8). Laserskänneriga saab mõõta kuni 330 m kaugusele ideaaltingimustes kuni 976 000 punkti sekundis. Instrumendi täpsuseks on 2 mm. Skänner on suhteliselt kerge (5,2 kg) edasitöstmiseks ja paikaseadmiseks. [22] Faro Focus<sup>3D</sup> X330 tähtsaimad tehnilised andmed on koondatud LISA 1 Tabel 8.1.



Joonis 5.8. Faro Focus<sup>3D</sup> X330 (Foto: Sander Kanter)

Faro skänneriga saadud andmete töötlemise jaoks on spetsiaalne tarkvara Faro Scene, mis erinevatest seisudest mõõdistatud punktipilved *cloud-to-cloud* põhimõttel üheks tervikuks liidab. Magistritöös kasutatud Faro-ga mõõdistatud punktipilvede esmased töötused teostati kirjeldatud tarkvara abil.



### 5.3 Riegl VZ-400

Referentsandmetena on töös kasutatud ka terrestilist laserskännerit Riegl VZ-400 (vt Joonis 5.9). Skanner mõõdab kuni 600 m kaugusele 122 000 punkti sekundis, instrumendi täpsus on 3 mm. Statiivile asetatult on seade raske kaaludes 9,6 kg. [23] Riegl VZ-400 tehnilised andmed on esitatud LISA 1 Tabel 8.1.



Joonis 5.9. Riegl VZ-400 (Foto aadressil <https://geo-matching.com/terrestrial-laser-scanners/vz-400>)

Riegl skänneri andmete töötlemiseks on REIB OÜ ettevõttel mitmeid programme, mille rakendamise tulemusena genereeritakse erinevatest seisudest mõõdistatud ühine punktipilv. Magistritöös kasutati eelnevalt väljaarvutatud valmis punktipilve referentspinnana.

## 6 MÕÕDISTUSE KATSETÖÖDE KIRJELDUS JA ALGANDMED

Magistritöö jaoks vajalikud andmed koguti Estonia kaevanduses 29.11.2018 ja 21.02.2019. Töö tugineb TalTech Geoloogia Instituudi mäeosakonna poolt AS Eesti Energiale esitatud vahearuandele ja lõpparuandele „Markšeideritööde kaugseiremeetodite abil efektiivistamise võimaluste rakendusuuring“ [2][3], mille kaasautoriks oli lõputöö kirjutaja.

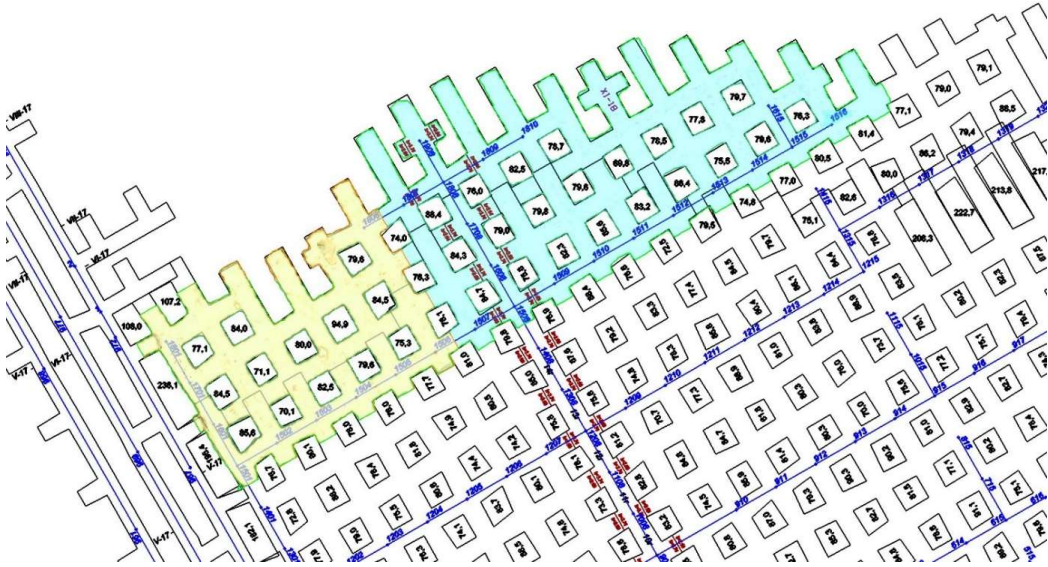
Kaevanduses olid mõõdistamisel abiks Hades Geodeesia OÜ-le kuuluva staatilise skänneriga Faro Focus<sup>3D</sup> X330 Hades Geodeesia OÜ insener Vaiko Veeleid juhendamisel TalTech geoloogia instituudi mäeosakonna spetsialist Sander Kanter ning teedehituse ja geodeesia uurimisrühma tudeng Sander Varbla, GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänneriga kõndis peamiselt Vaiko Veeleid. Esmased punktipilved genereeriti Hades Geodeesia OÜ kontoris spetsiaalsete programmide abil, hilisema andmetöötluse on läbi viinud töö koostaja 3D Reshaper tarkvara abil professor Artu Ellmann ja Vaiko Veeleid juhendamiste ja näpunäidete abil.

Andmetöötlusel lähtuti ühest programmist, 3D Reshaper, millega on võimalik punktipilvi töödelda ja moodustada nendest lõiked, mis oleksid avatavad CAD-põhistes tarkvarades (mida markšeiderid hetkel kasutavad). Sellega saavutati teadmine, et markšeideritöödeks vajalike andmete genereerimiseks piisab ühe tarkvara soetamisest. Kogu töös kirjeldatud andmetöötlus on tehtud programmiga 3D Reshaper kui ei ole mainitud teisiti.

Hoonete mõõdistuse andmed koguti 28.06.2018 ja 11.02.2019. Maa-ameti hoone mõõdistusel Hades Geodeesia OÜ poolt autor ei osalenud, aga sai vajalikud andmed enda kasutusse, kaubanduskeskuse mõõdistusel oli ka töö koostaja kaasategev. Hoonete mõõdistamisel olid staatilise laserskänneri Faro ja käsiskänneriga GeoSLAM abiks ettevõtte Hades Geodeesia OÜ töötajad, staatilisel mõõtmisel REIB OÜ laserskänneriga Riegl VZ-400 REIB OÜ geodeedid.

### 6.1 Estonia kaevanduse allmaa mõõdistused

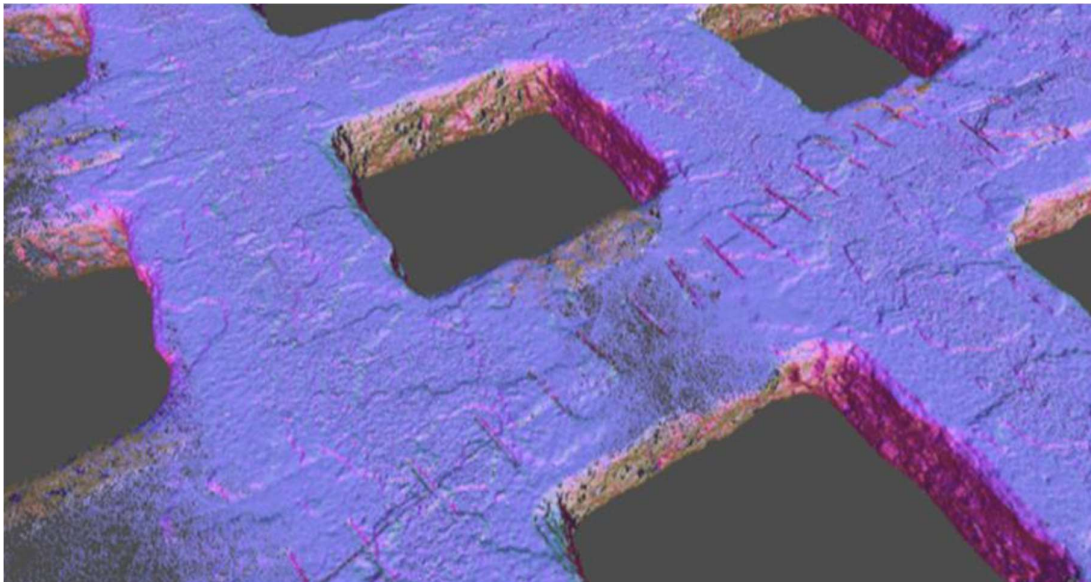
2018. aasta novembri lõpus käidi Estonia põlevkivikaevanduse kambriplokis nr 1214 (vt Joonis 6.1) seadmete ja meetoodika katsetöödel.



Joonis 6.1 Kambriploki mõõdistusala skeem. Kollasega on kahe skänneriga mõõdistatud ala (kontrollala), sinisega vaid GeoSLAMiga mõõdistatud ala. Tumesiniste numbritega on tähistatud markseidermõõdistusvõrgu punktid, mida saab kasutada ülesriputatavate skaneerimistähiste asukohtadena.

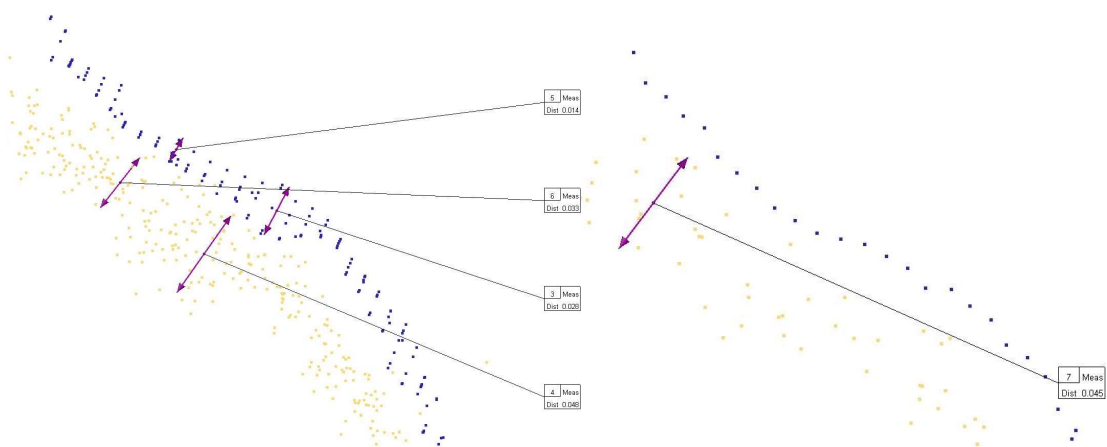
Katsetatavaks seadmeks oli käeshoitav laserskänner GeoSLAM ZEB-REVO, referentsandmete kogumiseks terrestiline laserskänner Faro Focus<sup>3D</sup> X330. Faro skänneriga mõõdistati u 5200 m<sup>2</sup> suurune ala (Joonis 6.1 tähistatud kollasega), mis jäi kontrollalaks, staatiline skänner asetati statiivile iga vahekäigu keskele ja ala mõõdistati 23 seisust, iga seis ca 4 minutit, tekkiva .pts faili suurus ca 5 952 000 KB (107 859 941 punkti). Käeshoitava skänneriga liiguti Joonis 6.1 tähistatud kollane ja sinine ala kahe käiguna 40 minuti jooksul, .pts formaadis andmefail ca 2 476 000 KB (95 112 040 punkti).

Faro punktipilv on täpne ja selge, pilvest loeb detailselt välja olulisi elemente kaevanduse maa-aluste käikude kohta nagu C/D vahekiht (vt Joonis 6.12). GeoSLAM punktipilv on mõnevõrra hajusam, aga ülevaate annab hästi edasi, selgelt on tuvastatavad nõ õmblused lagedes (lage läbivad lõhed, mis on poolpalkidega toetatud) või suurematel varingutel tekkinud lohud lagedes (vt Joonis 6.2).



Joonis 6.2. Mobiilse skaneerimise kujutis kambriploki lage läbivatest lõhedest (toetatud poolpalkidega) pealtvaates. Kõrgemad õnarused kambite lagedes tähistavad varisenud (või varisemisohtlikuna eemaldatud) materjali

Faro skänneri punktipilve hajuvus 5 cm läbilõikes on Joonis 6.3 põhjal 1-3 cm, punktid on ühtlaselt ja süstemaatiliselt paigutatud. GeoSLAM punktipilv on 3-5 cm hajuvusega punktide ebakorrapärase asetusega. Kaevanduse sein on paljude konarustega, mistõttu punktipilve hajuvuse hindamine kogu seina ulatuses on ebatäpne, 1 cm läbilõike korral moodustub Faro punktipilves üks punktide rida, käsiskänneri punktid on hajusalt laiali (kuni 4,5 cm).



Joonis 6.3. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kollasega ja Faro punktipilv sinisega 5 cm läbilõikes, GeoSLAM pilve hajuvus on 3-5 cm, Faro punktipilve hajuvus 1-3 cm. Paremal oleval joonisel on 1 cm läbilõikes Faro pilvest üks punktirida, ZEB-REVO hajub 4,5 cm

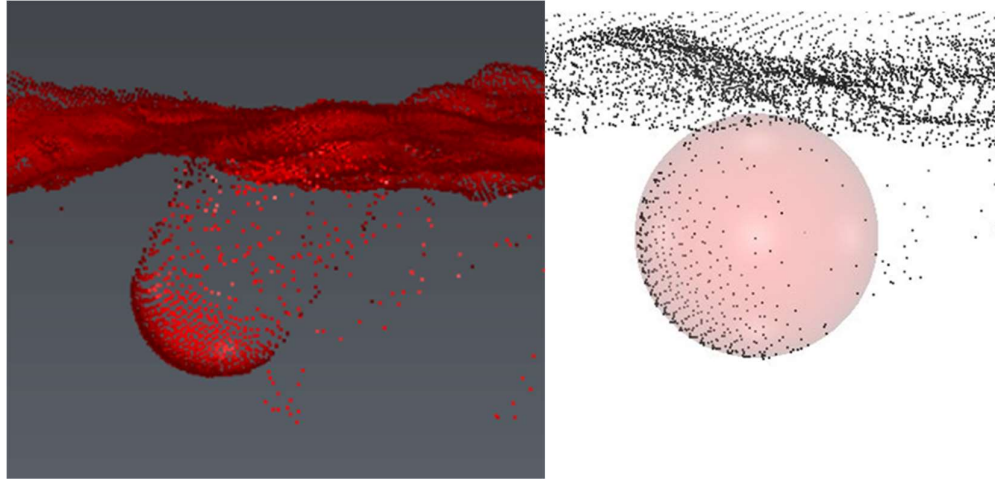
### 6.1.1 Punkt pilvede orienteerimine

Markšneideritel on kaeveõõntes rajatud mõõdistusvõrgud, võrgu punktides (Joonis 6.1 tumesiniste numbritega) on lakke kinnitatud konks ja punkti number. Laserskaneerimise tehnoloogia ei vaja mõõdistamiseks kindelpunkte, erinevate seisude kokkuarvutamine toimub nõ pilv-pilvega, kus kahes pilves leitakse ühised punktid punkt pilvede kokkuarvutamiseks. Punkt pilvede georefereerimiseks peaks kindelpunktidele asetama spetsiaalsed tähised (tavaliselt kahevärvilised ringid), millele on leitud koordinaadid. Maa all ei ole majanduslikult, ajaliselt ega tehniliselt võimalik kõikidele punktidele asetada spetsiaalset tähist või neid ümber tõsta, ühes punkt pilves peab kolmemõõtmelise ruumi korrektse mudeldamise jaoks olema vähemalt kolm tähist. Katsetööde käigus paigaldati koordineeritud punktidele 65 mm läbimõõduga tennisepallid (vt Joonis 6.4), sfäärilised kehad tulevad punkt pilves esile ja 3D Reshaper tarkvaras (ka teistes punkt pilvede töötlusprogrammides) on need võimalik asendada virtuaalsete etteantud parameetritega sfääridega.

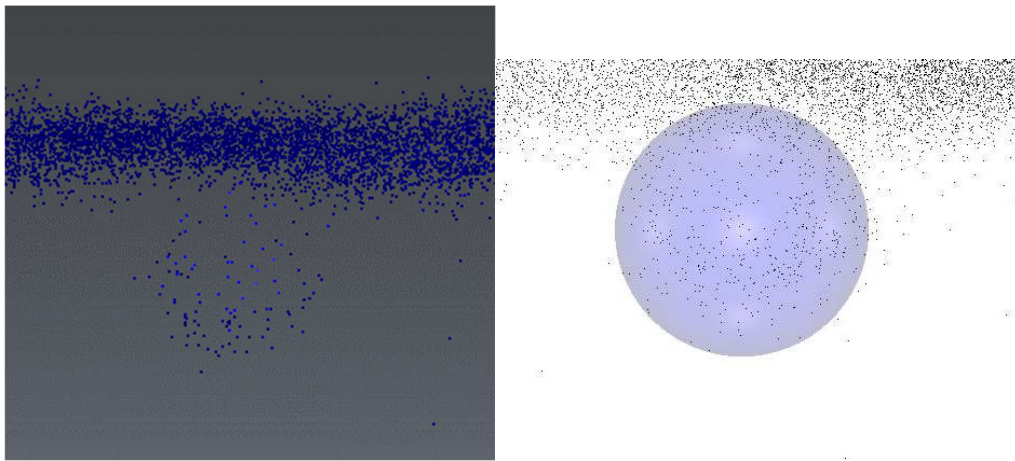


Joonis 6.4. Laserskaneerimise orienteerimiseks kasutatud siduspunktid, mis on riputatud markšneideri käikude koordineeritud laepunktidesse

Joonis 6.5 esitatud Faro punkt pilves on tennisepall kergesti tuvastatav, GeoSLAM punkt pilves on tuvastamine keerulisem, ent siiski teostatav (vt Joonis 6.6). Antud töös genereeriti 3D Reshaperis pallide asukohtadesse vähemalt kolme ettenäidatud punkti abil virtuaalsed sfäärid läbimõõduga 65 mm (vt Joonis 6.5 ja Joonis 6.6 paremal asuv kujutis).

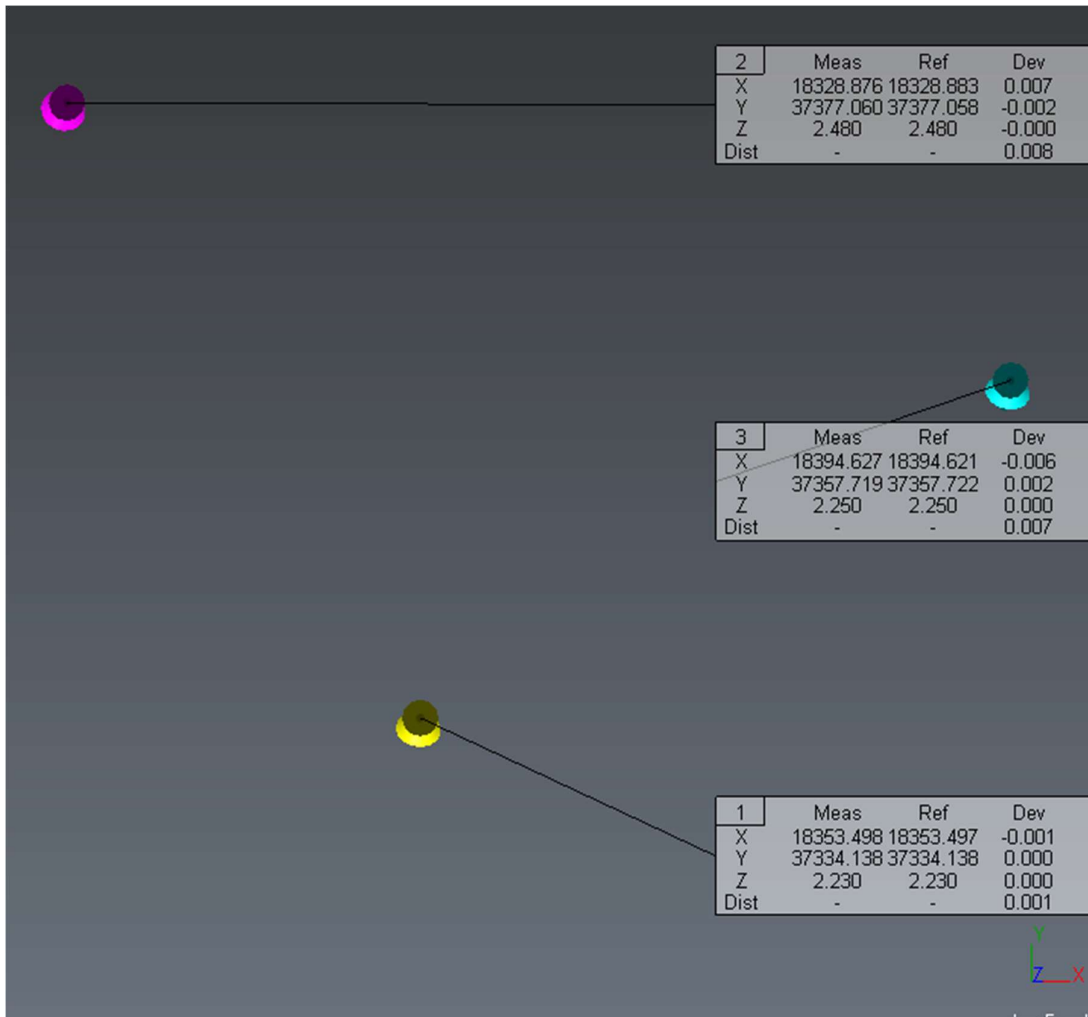


Joonis 6.5. Staatilise laserskänneri Faro punktipilv ja virtuaalne sfäär tennisepalli asukohas.



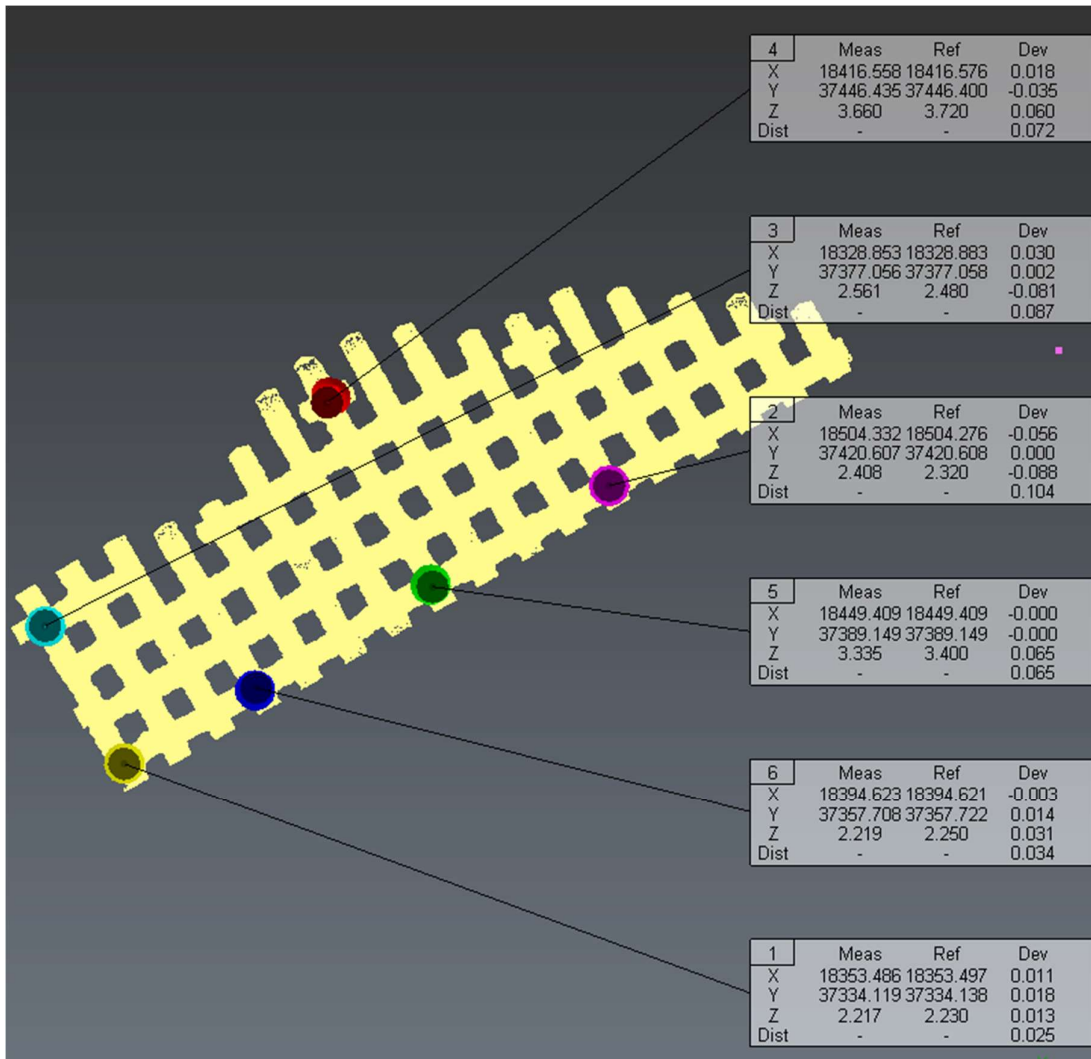
Joonis 6.6. Mobiilse laserskänneri GeoSLAM punktipilv ja virtuaalne sfäär tennisepalli asukohas.

Sfääride keskpunktidele omistati varem määratud koordinaadid (vt LISA 2 Tabel 8.2) ja punktipilved transformeeriti nende abil paika. Faro punktipilve jäi kolm sfääri, mille alusel tõsteti pilv kaevanduse koordinaatsüsteemi, Joonis 6.7 on toodud punktipilve paikaseadmisel tekkinud veahinnangud. Faro punktipilves olid tennisepallid kergesti tuvastatavad ja mõõdistusala väike, tekkinud vead jäid plaaniliselt 7 mm piiresse (vt *Dev* tulp joonisel).



Joonis 6.7 Staatilise laserskänneri Faro punktipilve ühildamine sfääride abil kolme punktiga. Kastides on toodud ühildamisel tekkinud veahinnangud, punktipilve joonisel näha ei ole.

GeoSLAM punktipilves olid sfäärilised kehad raskemini tuvastatavad ning mõõdistatud pindala suurem (u 14 500 m<sup>2</sup>) ja punktide vahemaad pikemad, seega kuue tähise abil paikaseatud punktipilve veahinnangud (vt Joonis 6.8 *Dev* tulp) on plaaniliselt kuni 56 mm, kõrguslikult 88 mm.



Joonis 6.8 Mobiilse laserskänneri GeoSLAM punktipilve koordineerimine kuue punktiga. Tekstikastides on toodud ühildamisel tekkinud veahinnangud.

Üheks ühildamisel tekkinud suuremate vigade põhjuseks võib olla 65 mm sfääride tuvastamine punktipilves ning tennisepallide hajusatele asukohapunktile virtuaalse sfääri tekitamine (punktipilve hajuvus on keskmiselt 30 mm, seega geomeetiline keha on ainult kaks korda suurem kui hajuvus). Kõrguslike vigade allikaks (mis mõningal määral mõjutab ka plaanilisi vigu) võib lugeda fakti, et markšneideri etteantud punktide kõrgused on arvatud konstantse laekõrgusena kogu kambriosa ulatuses, kõikidele punktile kõrgust ei ole mõõdistatud, seega kõrguslikult on pilve paikaseadmine mõne sentimeetri täpsusega.

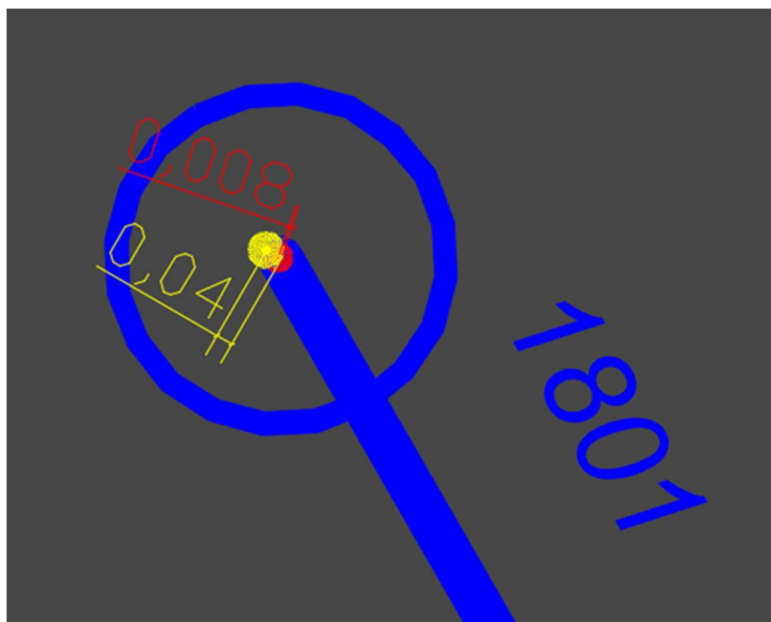
Plaaniliselt on sfääriliste tähiste keskpunkti koordinaate võrreldud markšneiderite poolt .dwg joonisel edastatud koordinaatidega (vt Joonis 6.9) Tabel 6.1.



Tabel 6.1. Koordinaatide plaanilised erinevused punktipilvedes asuvatest sfääridest.

Punkti nr	Faro (mm)	GeoSLAM (mm)
1501	1	33
1504	7	17
1801	8	40

Andmed näitavad, et Faro punktipilvede alusel tekitatud sfääriliste kehade koordinaadid erinevad markšneiderite edastatud koordinaatidest 1-8 mm, GeoSLAM ZEB-REVO omad ca 5 korda enam. Koordinaatide erinevused tulenevad nii mõõteseadmete mõõtetäpsusest kui ka andmete analüüsist. GeoSLAM puhul on koordinaatide ühildamine pilve hajuvusest tingitud sfääride tuvastamise tõttu ebatäpsem, lisaks annavad vale nurga all (kõrguslikud veaerinevused) olevad pilved plaanilises mõttes vale tulemuse, sest kaugused ja mõõdud on tegelikkuses ruumilised.



Joonis 6.9 Koordinaatide erinevused plaaniliselt (sinisega kaevanduse andmed, punasega Faro punktipilve ja kollasega GeoSLAM punktipilve koordinaatide erinevused), väljavõtte AutoCAD keskkonnast

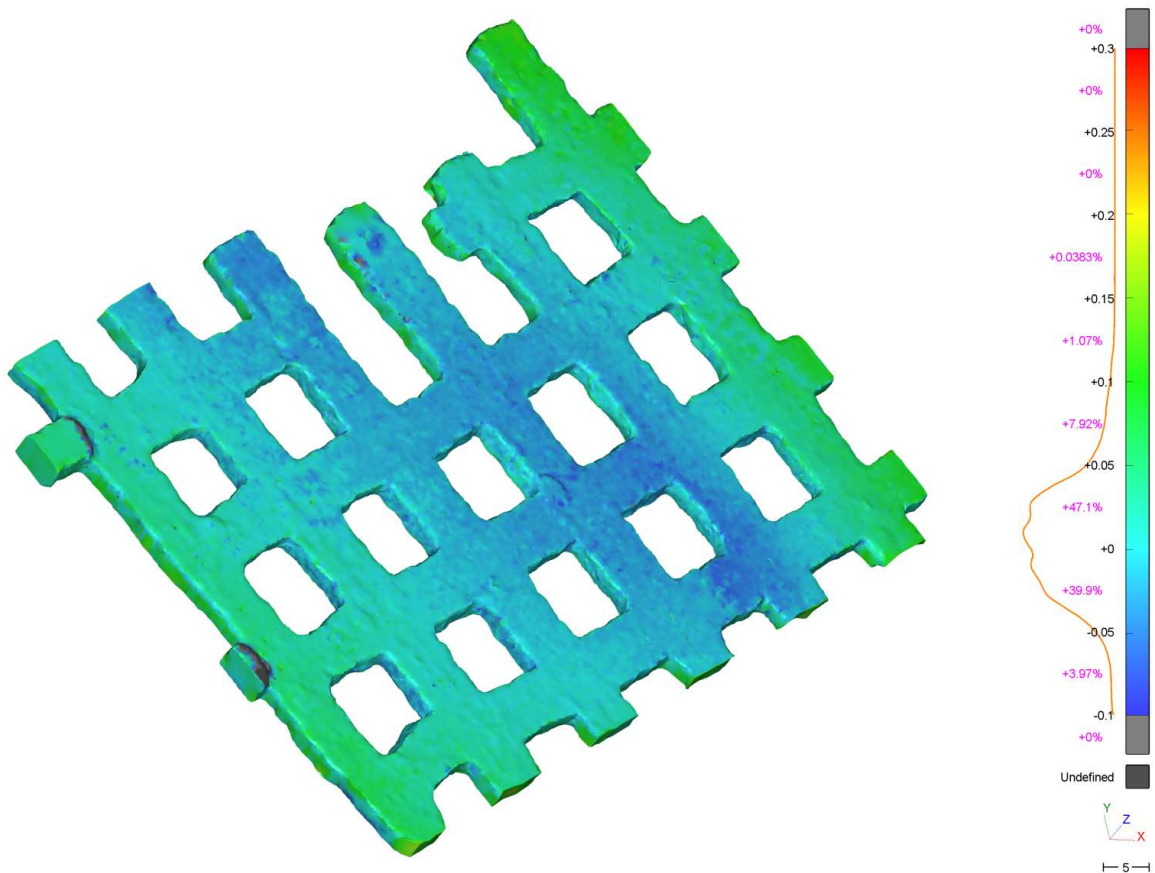
Uuringus selgub, et saadud veahinnangud on tervikute asukohtade, pindalade ja mahtude arvutamise seisukohalt siiski väikesed ja tulemustele märkimisväärset mõju ei avalda (vt Tabel 6.2, Tabel 6.3).

### 6.1.2 GeoSLAM ja Faro laserskännerite punktipilvede võrdlus

Ruumilise võrdluse jaoks on 3D Reshaperis võimalik punktipilved *Best Fit registration* abil omavahel sobitada, pilved ühildatakse võimalike ühiste punktide ja pindade abil. Tulemusena

tekib etteantud värviskaalaga pilt, kus histogramm kirjeldab värvide osakaalu ja sellega punktipilvede erinevusi. Võrdlus on võimalik läbi viia ka punktipilvedest moodustatud 3D pindade vahel, tulemused on sarnased, ent kuna pindade moodustamisel on seinapinnad teisendatud ühele joonele, siis võrdluspilt on selgem ja konkreetsem.

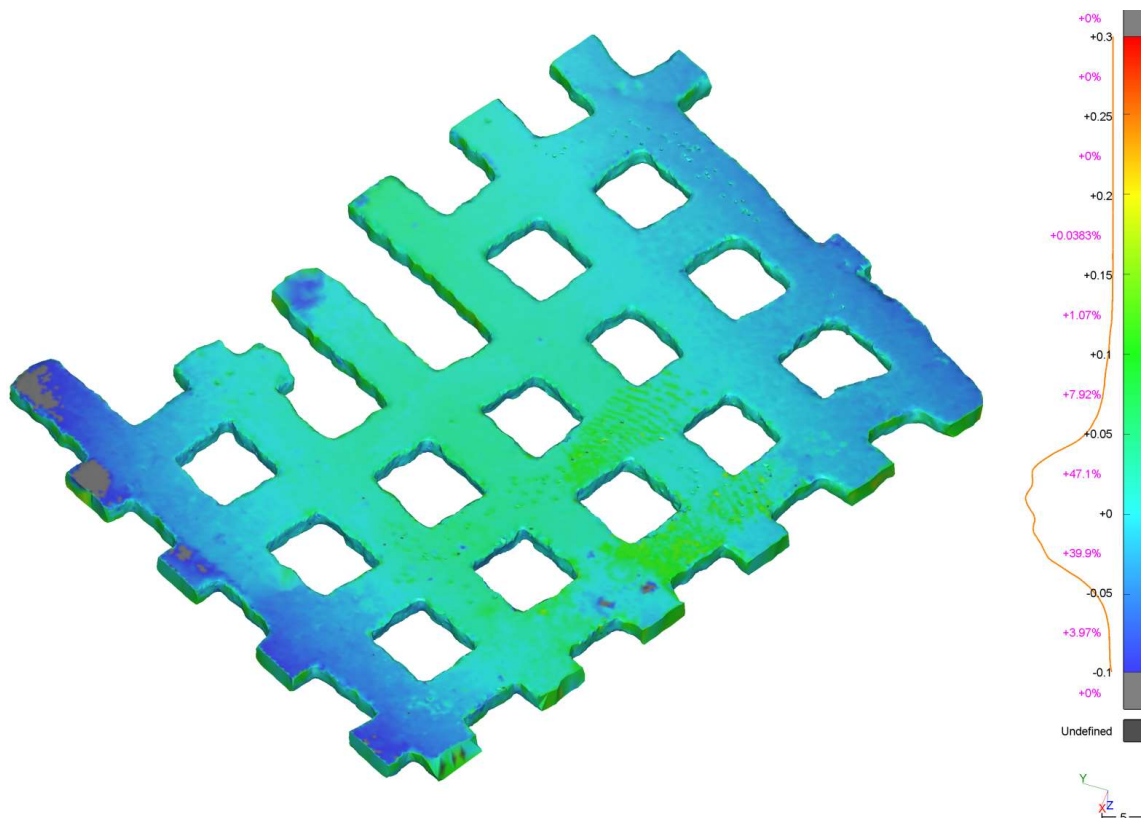
Joonis 6.10 ja Joonis 6.11 on võrreldud kontrollalal Faro tulemustest ja GeoSLAM tulemustest moodustatud 3D pinnamudeleid. Jooniste põhjal on GeoSLAM 3D pind Faro 3D pinnast äärealadel madalam (pealtvaates rohelised toonid, altvaates sinised toonid), nõ vajunud, kõrguslikud maksimaalsed erinevused pindade vahel on 5 cm. Vajumine võib olla põhjustatud GeoSLAMi mõõtmistehnoloogiast, kus skaneeritud äärealad võivad anda kõrguslikult suuremaid nihkeid.



Joonis 6.10 Faro ja GeoSLAM 3D pindade võrdlus pealtvaates kontrollalal. Rohelised toonid näitavad, et Faro 3D pind on kõrgemal kui GeoSLAMi oma, sinised toonid näitavad, et Faro 3D pind on madalamal (enamikus vahemikus +/- 0,1 m).

Plaaniliselt jäävad erinevused maksimaalselt 2 cm piiridesse. Eelduslikult tuleks moonustuste vältimiseks või vähendamiseks paigutada sfäärilised tähised mõõdistuse servaaladele, mis võimaldab punktipilve täpsemini koordineerida. Hallid ja mustad alad pildidel tähistavad piirkondi, kus üks või teine punktipilv on katkendlik või puudulik (nt Faro skanner ei mõõtnud erinevate

kõrgustega lagede puhul „nurga taha“ või on pilvest eemaldatud värskelt lõhatud kaevisega alad), nendes piirkondades jäävad erinevused etteantud skaalast välja. Piltide kõrval olevate histogrammide põhjal jääb üle 85% tulemustest nullilähedaseks ja vahemikku  $\pm 5$  cm.



Joonis 6.11 Faro ja GeoSLAM 3D pindade võrdlus altvaates kontrollalal. Rohelised toonid näitavad, et Faro 3D pind on kõrgemal kui GeoSLAMi oma, sinised toonid näitavad, et Faro 3D pind on madalamal (enamikus vahemikus +/- 0,1 m).

### 6.1.3 Tervikute pindalade võrdlemine

Kamberkaevandamisel jäävad maa-aluse kaevanduse käikudesse alles tugitervikud, mis toetavad lage ja seeläbi tagavad kambriplokkide stabiilse püsivuse. Tugitervikute projekteerimisel arvestatakse mäerõhkude ja tööohutusega, liiga suured tervikud jätavad suure osa maavarast kaevandamata, liiga väikesed tervikud ohustavad töö tegemist ja võivad mõjutada maapealset situatsiooni (varingud, langatused). Tervikute pindalade ja väljaveetava maavara mahu põhjal toimub ka kaevurite palgaarvestus.

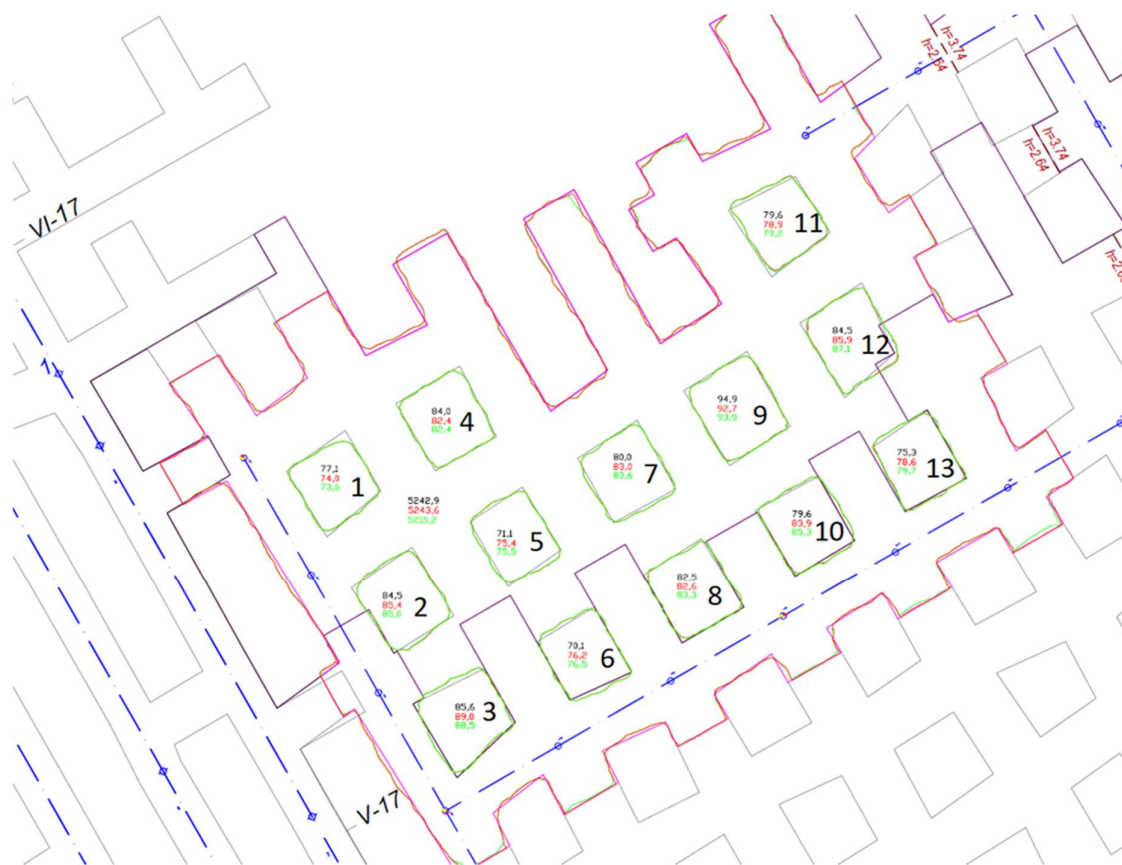
Kaevanduses on oluliseks näitajaks C/D vahekiht (vt Joonis 6.12), mis asub ligikaudu 1,6 m kõrgusel kaeveõõne põrandapinnast.



Joonis 6.12 Staatilise skänneriga tehtud värviline punkt pilv, kus selgelt eristub valge C/D vahekiht.

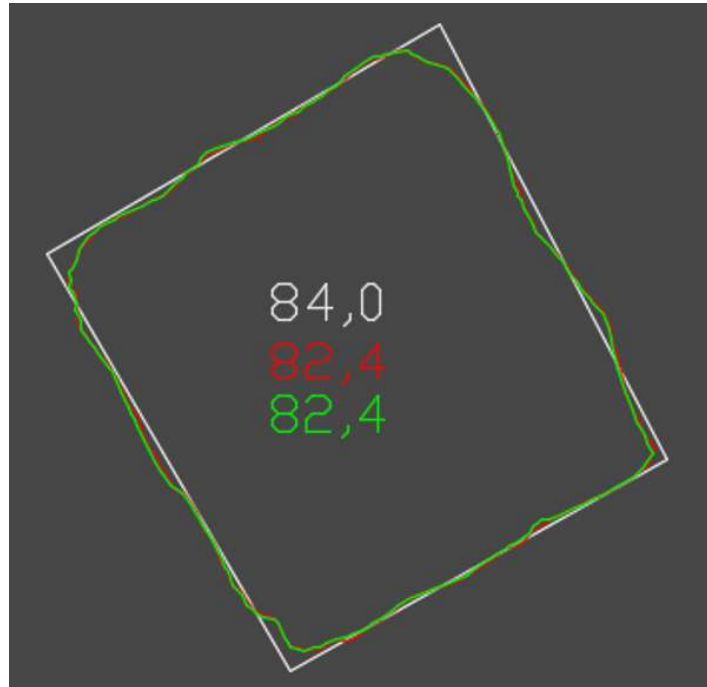
Mööda selgelt eristuvat paekivi vahekihti mõõdistavad markšeiderid tervikute pindalad laserkaugusmõõtjatega. Tervikud projekteeritakse ruutudena, ent tegelikkuses ideaalseid ruute ei saavutata ja toetus on erikujuline nelinurk. Igast neljast küljest mõõdetakse samba pikkus, kuju ja asukoha määramiseks võetakse lisamõõdud tervikute nurkadesse koordineeritud mõõdistusvõrgu punktide suhtes. Kõik mõõdetud suurused kirjutatakse väliraamatusse. Nii asukoht kui ka terviku kuju joonestatakse lõplikult valmis CREDO tarkvaras.

Võrdluseks tehti referents- ja käsiskänneri andmete põhjal moodustatud pinnamudelitel 3D Reshaper tarkvaras 1,6 m kõrgusel ristlõige, tekkinud tervikute pindalad on võimalik ekraanile kuvada. Alternatiivselt saab lõike pinnajooned eksportida .dxf failiformaati ja avada AutoCAD või CREDO programmi abil ning arvutada tekkinud pindalad vastava tarkvaraga (vt Joonis 6.13).



Joonis 6.13 Faro, GeoSLAM ja kaevanduse tervikute andmed. Punase kontuuriga Faro mõõteandmete ulatus, rohelisega GeoSLAM andmed, mustaga kaevanduse andmed.

Joonis 6.14 on eraldi välja toodud üks tugitervik, valgega on tähistatud kaevanduse markseideri mõõdistatud tervik laserkaugusmõõtjaga ja selle pindala 84,0 m<sup>2</sup>, punasega on Faro andmetest tekkinud tervik pindalaga 82,4 m<sup>2</sup> ja rohelisega GeoSLAM andmetest tekkinud tervik pindalaga 82,4 m<sup>2</sup>. Punased ja rohelised jooned on väga sarnased, ka pindala on antud näitel sama, ent valge joon eristub oma sirgjoonelisuse tõttu tunduvalt, samas pindalavõrdluses on erinevus 1,6 m<sup>2</sup>.



Joonis 6.14 Väljavõtte tervikust, kus punase kontuuriga on Faro andmed, rohelisega GeoSLAM andmed ja valgega kaevanduse andmed.

Kambriosa tervikute pindalade arvutuste kokkuvõtted kontrollalal on toodud Tabel 6.2.

Tabel 6.2. Tervikute võrdlused Faro, GeoSLAM ja kaevanduses mõõdetud andmete vahel, tervikute nummerdamise aluseks on Joonis 6.13.

Tervikud / Pindalad (m <sup>2</sup> )	Faro, m <sup>2</sup>	GeoSLAM, m <sup>2</sup>	Kaevandus, m <sup>2</sup>
1	74,0	73,6	77,1
2	85,4	85,0	84,5
3	89,0	88,5	85,6
4	82,4	82,4	84,0
5	75,4	75,5	71,1
6	76,2	76,5	70,1
7	83,0	83,6	80,0
8	82,6	83,3	82,5
9	92,7	93,9	94,9
10	83,9	85,3	79,6
11	78,9	79,2	79,6
12	85,9	87,1	84,5
13	78,6	79,7	75,3
<b>Tervikute summa, m<sup>2</sup></b>	<b>1068,0</b>	<b>1073,6</b>	<b>1048,8</b>
<b>Erinevus Faro tulemusest, m<sup>2</sup></b>		-5,6	19,2
<b>% Faro tulemusest</b>		0,5	1,8
<b>Erinevus GeoSLAM tulemusest, m<sup>2</sup></b>			24,8
<b>% GeoSLAM tulemusest</b>			2,3

Tabeli põhjal on neljal tervikul kolmeteistkümnest markšeideri mõõdistatud pindala suurem kui Faro andmetel leitud pindala, teistel juhtudel väiksem. Seega on tervikute kogupindala võrreldes

Faro andmetega 1,8% väiksem. GeoSLAM andmed annavad enamikel juhtudel suuremad pindalad kui Faro tulemused, kogupindala on 0,5% suurem.

GeoSLAM ZEB-REVO mõõtetulemused lähevad Faro tulemustega nii asukohaliselt kui ka pindaladelt hästi kokku. Erinevused võivad tuleneda ristlõike kõrguslikust asukohast, kui punktipilved ei ole omavahel ideaalses sobivuses, siis ei saa ka lõige kõrguslikult ideaalselt täpselt samas kohas olla. Lõiked genereeritakse punktipilvest (või sellest moodustatud 3D pinnast), kus programm arvutab lõikes oleva punktipilve (või 3D pinna) järgi joonelemendi paiknemise asukoha. Kuna Faro punktipilv on oluliselt selgem ja konkreetsem, siis võib eeldada, et ka lõige on täpsem.

### 6.1.4 Mahtude arvutamine ja võrdlemine

Mahu arvutamine 3D Reshaperis toimub 3D pinnamudeli abil. Valitud alast koostatakse suletud kontuuriga pinnamudel ja leitakse mudeli kogumaht. Kontrollala mahu arvutamise piirjoone järgi arvutatakse markšeideri poolt saadetud andmete alusel sama ala maht nende andmetele pindala ja kõrguse korrutisena (markšeiderite meetod mahtude arvutamiseks). Tulemused on toodud Tabel 6.3.

Tabel 6.3. Kaevandatud mahtude võrdlemine.

	Faro	GeoSLAM	Kaevandus
<b>Maht kontrollalal, (m<sup>3</sup>)</b>	11 067,7	10 984,2	10 988,5
<b>Erinevus Faro tulemusest, (m<sup>3</sup>)</b>	-	83,6	79,2
<b>% Faro tulemusest</b>	-	0,7	0,7
<b>Erinevus GeoSLAM tulemusest, (m<sup>3</sup>)</b>			4,4
<b>% GeoSLAM tulemusest</b>			0,04

Tabelis on kontrollala maht ilma tervikuteta, Faro andmetel 11 067 m<sup>3</sup>. Nii GeoSLAMi kui ka markšeiderite andmetel arvutatud mahud on 0,7% väiksemad referentsmahust, markšeideri tulemused erinevad GeoSLAM tulemustest 0,04%. Määruse [34] alusel võib kordusmõõtmistel mõõtesuuruse väärtuse erinevus kuni 20 000 m<sup>3</sup> mahu korral olla kuni 10%, uurimistöös leitud mahtude erinevus on lubatust 10 korda väiksem.

Võrreldud mõõdistusmeetodite mahtude erinevused on väga väikesed. Lisaks eelnevalt analüüsitud pindalade erinevuste põhjustele võivad mahu erinevused tuleneda punktipilve puhastatusest ehk vajalike objektiga seotud mõõdistuspunktide eraldamisest (puhastamine mõjutab ka ristlõike tegemist), sest mida rohkem ebavajalikke punkte punktipilves leidub, seda

ebatäpsem pind (või joonelement) nende punktide abil luuakse. GeoSLAM punktipilv oli mürarikas, sest mõõdistajale järgnenud huvilised skaneeriti punktipilve (Joonis 6.15). Selliste punktide mitte-eemaldamine mõjutab mõningal määral punktipilve kvaliteeti ja sellest moodustatud pinna kvaliteeti, viimasega omakorda löike täpsust ja mahu arvutamist. Soovitusena peaks GeoSLAM ZEB-REVO seadmega liikuma ainult mõõdistaja ise (mis on ka omane tootmisolukorrale), vajadusel võib seltskond kõndida instrumendi mõõteulatusest väljaspool mõõdistaja järel. Sellisel juhul väheneb punktipilve puhastamise vajadus ja tõuseb mudeldamise täpsus.



Joonis 6.15. GeoSLAM punktipilv, kus skaneerimisseadmele järgnenud inimfiguurid on skaneeritud pilve sisse

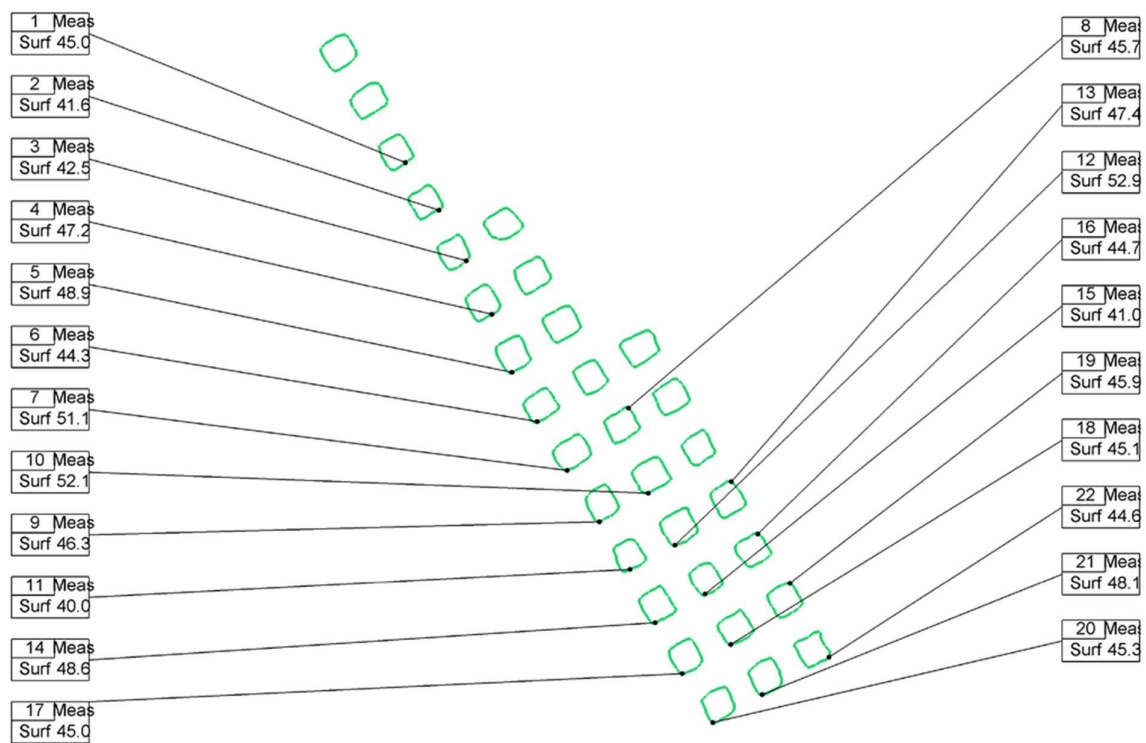
Markšneiderid arvutavad maa-aluse kaeve mahtusid lihtsustatud valemite (kasutades tervikute üldistamiseks geomeetrilisi primitiive nagu ruut, ristkülik, romb) abil ja saavad piisava täpsusega tulemused, ent kuna kontrollalal oli antud kaks kõrgust (2,60 ja 2,64 m), siis arvutusvalemisse lisati kõrgusena keskmine 2,62 m, teadmata, kuidas kõrguse muutudes (ilma muutuse piire defineerimata) mahu arvutamine tegelikkuses toimub. Mahtude leidmisel erinevate meetoditega (kõrguste erinevuste arvessevõtmine ja omavoliliste piiride seadmine) jäid tulemused 1% piiridesse.



## 6.2 Täiendavad mõõteandmed

2019. aasta 21. veebruaril käidi Estonia kaevanduse kambriplokis 1707 (vt LISA 3 Joonis 8.1) eesmärgiga tutvustada käsiskännerit, selle mõõdistusmetoodikat ja andmete analüüsi allmaakaevanduses töötavatele markšeideritele.

Joonisel toodud ala mõõdistati 40 minutiga kahe käiguna. Mõõdistusalast tehtud ristlõige on tähistatud rohelse joonega LISA 4 Joonis 8.2, oranžid jooned tähistavad väljakaevamata projekteeritud tugitervikuid ja mustaga on väljakaevatud tervikud. 3D Reshaperist tehtud väljavõtte tervikute pindaladega (valitud on tervikud, mille andmed olid mõõdistuse hetkel markšeideritel teada) on Joonis 6.16.



Joonis 6.16 GeoSLAM mõõdistuse lõige koos tervikute pindaladega (juuresoleval sildil tähistatud Surf).

GeoSLAM ZEB-REVO ja markšeideri antud pindalade vaheline võrdlus on esitatud Tabel 6.4.

Tabel 6.4 Tervikute pindalade võrdlus.

Tervikud / Pindalad (m <sup>2</sup> )	GeoSLAM	Kaevandus
1	45,0	48,9
2	41,6	43,4
3	42,5	44,9
4	47,2	48

Tervikud / Pindalad (m <sup>2</sup> )	GeoSLAM	Kaevandus
5	48,9	50,5
6	44,3	42,0
7	51,1	42,4
8	45,7	45,4
9	46,3	45,9
10	52,0	50,1
11	40,0	41,4
12	52,9	53,4
13	47,4	51,7
14	48,6	50,0
15	41,0	42,5
16	44,7	47,2
17	45,0	48,6
18	45,1	47,4
19	45,9	46,2
20	45,3	44,0
21	48,1	51,9
22	44,6	45,9
<b>Tervikute summa (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1013,2</b>	<b>1031,7</b>
<b>Erinevus (m<sup>2</sup>)</b>		18,5
<b>% GeoSLAM tulemusest</b>	-	1,8

Tabeli põhjal on enamik tervikuid suuremate pindaladega kui GeoSLAMiga mõõtes, summaarselt 1,8% erinevusega. Varasemas võrdluses Tabel 6.2 olid markšeideri mõõdistatud pindalad veidi väiksemad, mistõttu võib eeldada, et tervikute mõõdistamine traditsiooniliste meetoditega on subjektiivne ja sõltub mõõdistuspunktide valikust. Skaneerimistulemused on mõõdistajast sõltumatud, sest mõõdetakse kõik pinnad ühtlaselt, ilma subjektiivsete otsusteta.

Mahuarvutuse tulemused on välja toodud Tabel 6.5. GeoSLAMiga mõõdistatud ala maht on arvatud 3D Reshaper programmiga, markšeiderite arvutatud väljakaevet maht on edastatud nende poolt e-meili teel.

Tabel 6.5. Mahu võrdlused.

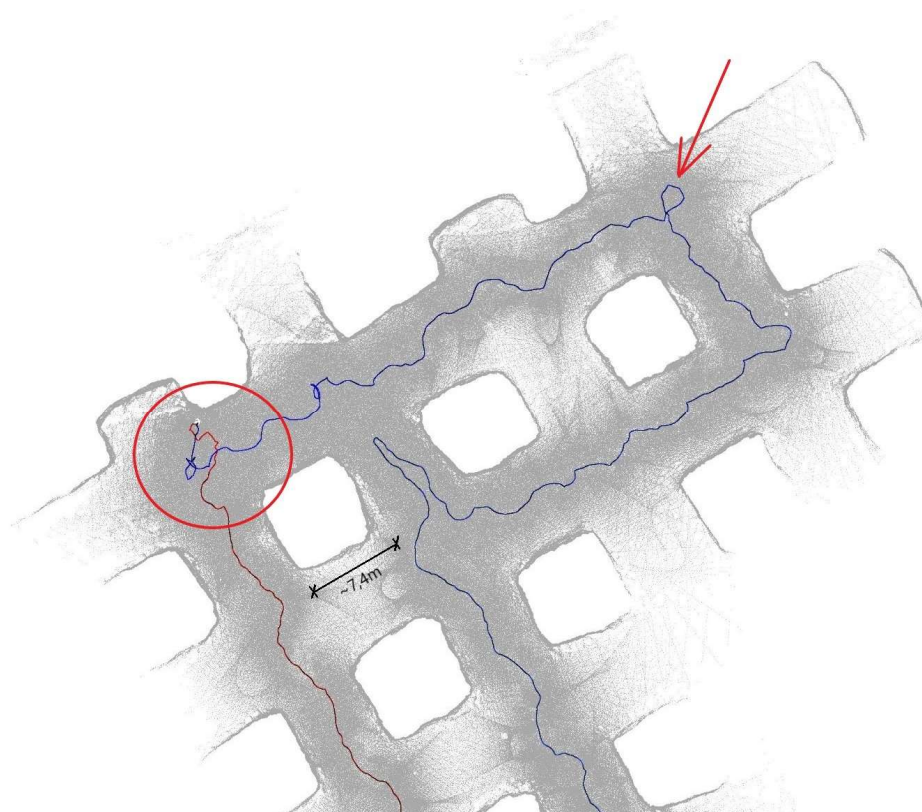
<b>GeoSLAM mõõdistatud maht</b>	29 187,63 m <sup>3</sup>
Markšeideri mõõdistatud maht	29 140,52 m <sup>3</sup>
Markšeideri tulemuste erinevus GeoSLAMist	47,11 m <sup>3</sup>
Erinevus, %	0,2

Tervikute kogupindala oli markšeideril suurem, sellest tulenevalt on maht veidi väiksem. Suurem tervikute kogupindala ja väiksem maht näitavad kambriosa vähemat väljakaevet kui tegelikkuses (kindlaks tehtud skaneerimisega).

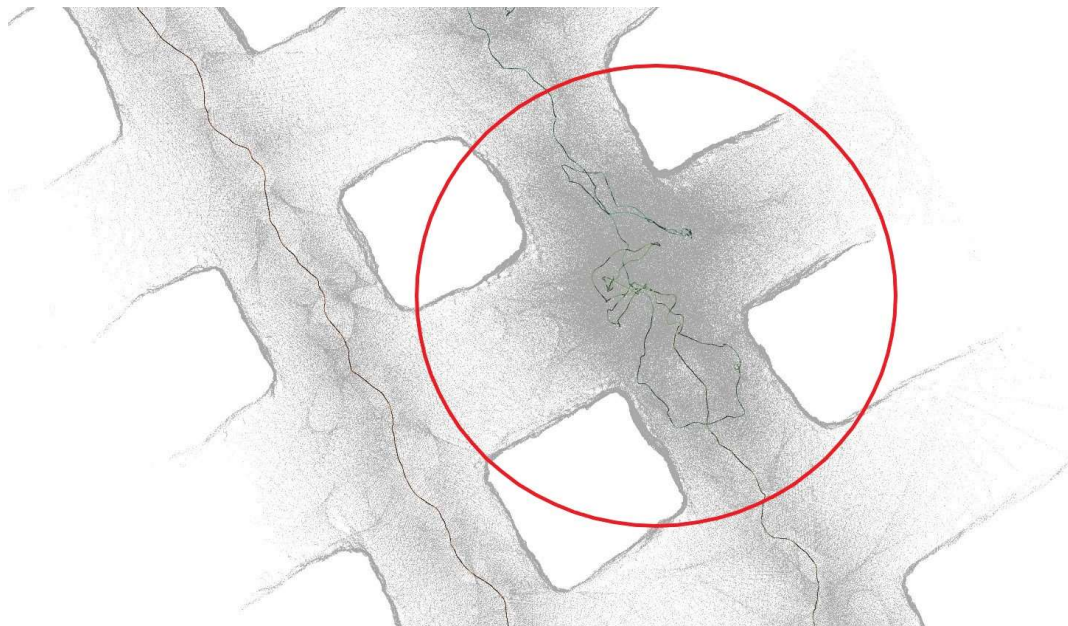
## 6.2.1 Trajektoori lisamine

Mõõdistusprotsessi illustreerimiseks ja andmete kvaliteedi analüüsimiseks salvestab GeoSLAM ZEB-REVO liikudes oma trajektoori. LISA 5 Joonis 8.3 on katselõigus läbi viidud punktipilvele lisatud skaneerimisseadme trajektoor. Sinisest vikerkaarevärvides punaseni värviskaala tähistab liikumise suunda algusest lõpuni, käigu alguspunkt asub joonisel üleval vasakul. Trajektoori joon näitab, kus on tehtud nõ haake või kõrvale mõõdistamisi, keskel olev pundar tähistab kohta, kus näitlikustamise huvides tiirutati sama koha peal, et tööd jälgivad inimesed punktipilve skaneerida.

Joonis 6.17 ja Joonis 6.18 on sissesuunitud väljavõtted eelnevast joonisest. Esimesel on näha käigu algus/lõpp ning noolega tähistatud paun, kus on lakke kinnitatud sfääriline tähis ja mõõdistaja tiir ümber selle, tähis on ka LISA 5 Joonis 8.3 alumises vasakus nurgas (viidatud noolega). Teisel pildil on sissesuunitult keskmine segapundar, kust vajadusel loeb välja, kuidas mõõdistaja liikus. Lisaks võib tähele panna, et trajektoori lähedal on punktipilv tihedam kui eemal, selle põhjal saab analüüsida, kui kaugele instrument tegelikult mõõdistab ja punkte kogub ning milliste mõõdistuskauguste ja liikumistrajektooriga peaks skaneerimisel arvestama.



Joonis 6.17. Väljavõtte GeoSLAM punktipilvest koos trajektooriga, algus ja lõpuosa initsialiseerimisega (tähistatud ringiga), parem ülemine paun on kõndimine tähise ümber (tähistatud noolega)

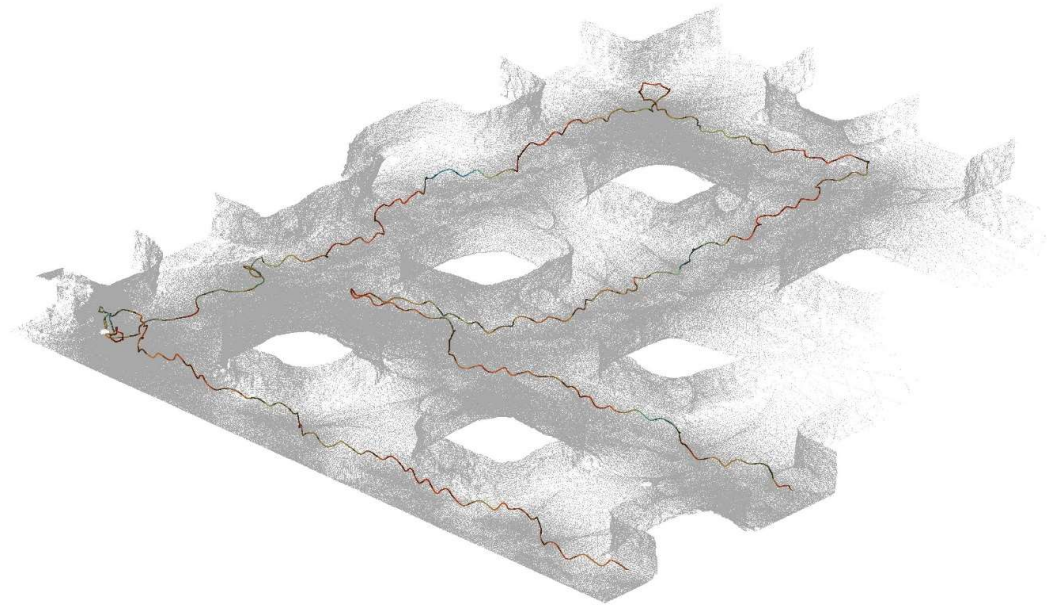


Joonis 6.18. Väljavõte GeoSLAM punktipilvest koos trajektooriga, keskmine nõ pundar ümbritsetud ringiga tähistab kohta, kus liiguti ümber paigalseisvate inimeste ringi

LISA 6 Joonis 8.4 on sama trajektoori joon teistes värvitoonides, värviskaala punasest siniseni vastab skaneerimise tingimustele, kus sinine näitab häid tingimusi (st SLAM algoritm leiab kergesti ühiseid punkte punktipilve registreerimiseks) ja punane kehvemaid tingimusi registreerimisel. [20]

Siin võib järeldada, et kuna toonid vahelduvad üsna kiiresti ja on valdavas osas punakate toonide poole, siis konarlikud ent samal ajal sarnased allmaakaevõõne seinad ei ole pilve registreerimisel kõige ideaalsemad tingimused. Sellistel mõõdistustel tuleks jälgida kõiki nõuandeid ja soovitusi parima tulemuse saamiseks (vt ptk 5.1.3).

Joonis 6.19 on välja toodud fragment kolmemõõtmelisest punktipilvest koos liikumistrajektooriga.



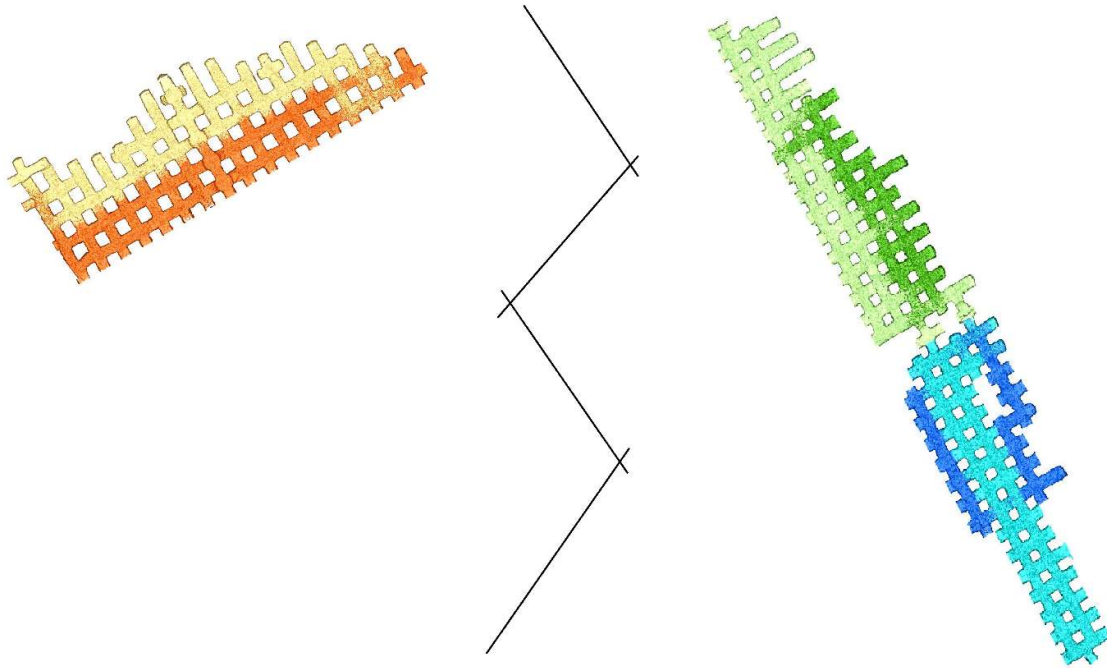
Joonis 6.19. GeoSLAM kolmemõõtmeline punktipilv trajektooriga

Trajektoori andmete alusel saab analüüsida liikumisteed, vaadata, millised piirkonnad olid paremini pilves registreeritud ja millised halvemini, teha korrekture ja täiendusi edasiste mõõtmiste jaoks.

## 6.2.2 Punktipilvede ühendamine ja andmebaasi loomine

Erinevate mõõdistusaegade punktipilved saab omavahel järjestikku ühendada. Varasematel mõõdistustel peaks eemaldama nõ kinnise seina (veel läbindamata alad), et tekiks sujuv ühendus järgmise mõõdistusega. Kui varasem ja uus mõõdistus on sfääriliste tähistega abil koordineeritud, siis peaksid mõlemad punktipilved olema õigesti asupaikades ja ühendatud. Punktipilvi ei saa ühendada parima sobivuse alusel (*Best Fit registration*), sest läbindamisel kasutatud lõhkamised ja kaevemasinad on seinapindasid muutnud ning automaatne ühiste punktide otsimine ei toimi. Punktipilvede üleminek võib olla veidi ebaühtlane, ebaühtluse parandamiseks võiks järgmise korra skaneerimine ulatuda mõned meetrid tagasi eelmisesse mõõdistusse. Näide pilvede ühendamise kohta on toodud LISA 7 Joonis 8.5, kus punktipilved osaliselt kattuvad ja osaliselt liituvad.

Eraldiseisvad mõõdistused (terve maa-aluse kaevanduse ulatuses) saab näidata ühisel skeemil või plaanil. Joonis 6.20 on toodud kahel erineval korral tehtud mõõdistused, kollase ja oranži tooniga on Estonia kaevanduse kambriplakk 1214, roheliste ja siniste toonidega kambriplakk 1707.



Joonis 6.20. Erinevate punktipilvede ühendamise ühte andmebaasi, erinevad mõõdistused on tähistatud erinevate värvitoonidega. Kuna antud mõõdistused asuvad üksteisest kümnete kilomeetrite kaugusel, siis joonise selguse huvides on punktipilvede kujutised toodud lähemale ja eraldatud musta joonega (mõõtkavatu)

Maa-alused mõõdistused on ajaloolistel põhjustel jäänud kohaliku (Kohtla-Järve) koordinaatide süsteemi. Maapealse situatsiooniga kokkuvõimiseks tuleb koordinaadid transformeerida, seega teisendati need Maa-ameti geodeesia kalkulaatori abil (kõige paremini sobivus Ida-Virumaa Mäetaguse teisendus L-Est97 süsteem) riiklikku L-Est97 süsteemi [25] (vt LISA 8 Tabel 8.4).

LISA 9 Joonis 8.6 näitab maapealset situatsiooni kaevanduse kambriploki 1707 kohal, mustaga on kujutatud tervikud, punasega väljakaevamata osa. Lähedale jääb talukoht Ereda. Joonis näitab, et skaneerimistulemusi saab edukalt siduda maapealse situatsiooniga ja seeläbi luua ühtse andmebaasi, mis võimaldab tuvastada hoonete ja rajatiste aluste tervikute asukohtade paikapidavust ning on abiks mäerõhkude arvutamisel. Joonis 6.21 on toodud mõlema kambriploki mõõdistused ühisel skeemil sõõrides punasega tähistatult. Must võrguslik on Estonia kaevanduse maa-alune kambriplakkide süsteem edastatult .dwg failina e-maili teel.



Joonis 6.21 Laserskaneerimisega 2018 ja 2019 saadud punktipilved ühtses andmebaasis koos maapealse situatsiooniga. Must võrgustik tähistab Estonia kaevanduse kambriplukke, sõõrides punasega tähistatult käesoleva töö raames erinevatel aegadel mõõdistatud kambriplokid. Ortofoto: Maa-amet 2019.

Maa-aluse ja maapealse situatsiooni sidumine ning mõõdistusalade kujutamine võimaldavad kolmemõõtmelise andmebaasi pidamist, selline andmebaas on ülevaatlike visualiseeringute, andmete hilisemate ülevaatamiste, ümberarvutuste, täiustuste ja täpsustuste tegemiseks täielik informatsioonikogum.

## 6.3 Hoonete mõõdistamine

Käesolevas töös uuriti GeoSLAM ZEB-REVO kasutusvõimalusi kaubanduskeskuse lao-ja tagaruumide mõõdistamiseks. Täiendavate andmete nagu inventar, lambisiinid või ventilatsioonivad joonisel kujutamise jaoks kasutatakse mõõdistamisel laserkaugusmõõtja asemel laserskaneerimist, terrestiline skaneerimine on täpne ja informatiivne, punktipilve salvestub kõik ruumis asetsev. Probleemiks on statiivile asetatud skänneriga aeganõudev mõõtmine, väikestesse ja kitsastesse ruumidesse ligipääs on piiratud ning kaubanduskeskuse puhul on kaubad skänneri paigutamisel takistavateks elementideks. Lisaks jätavad terrestilised skännerid enda kohale ja/või alla ca 4 m diameetriga (olenevalt skännerist, siin Riegl VZ-400) skaneerimata tühja ringi, kuhu mõõtekiired ei ulatu ja alale jäävad objektid tuleb mõõta teisest seisust või teiste meetoditega.

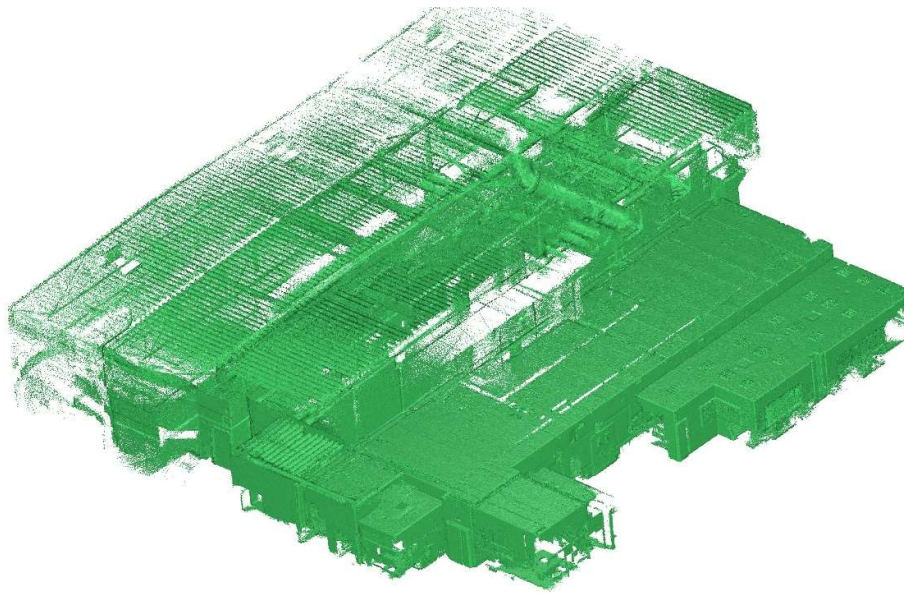
Käeshoitava käsiskänneriga nagu ZEB-REVO oleks mõõdistamine lihtsam ja kiirem, sest oma väiksuse ja kompaktsusega saab sellega liikuda kitsastes kohtades ja takistavate elementide taha. Skaneerimisel tekkinud punktipilv on informatiivsem kui laserkaugusmõõtjaga hoone kindlates kohtades mõõtude võtmine. Järgnevad hoonete mõõdistamised on läbi viidud GeoSLAM ZEB-REVO mõõteseadmega.

### 6.3.1 Algandmed

Töö uurimisobjektiks olid kaubanduskeskuse väiksemad lao-ja tagaruumid (vt Joonis 6.22), kus mõõdistustööd toimusid Riegl VZ-400 laserskänneri (referentsandmed) ja GeoSLAM ZEB-REVO-ga. Mõõtmised leidsid aset 11. veebruaril 2019.

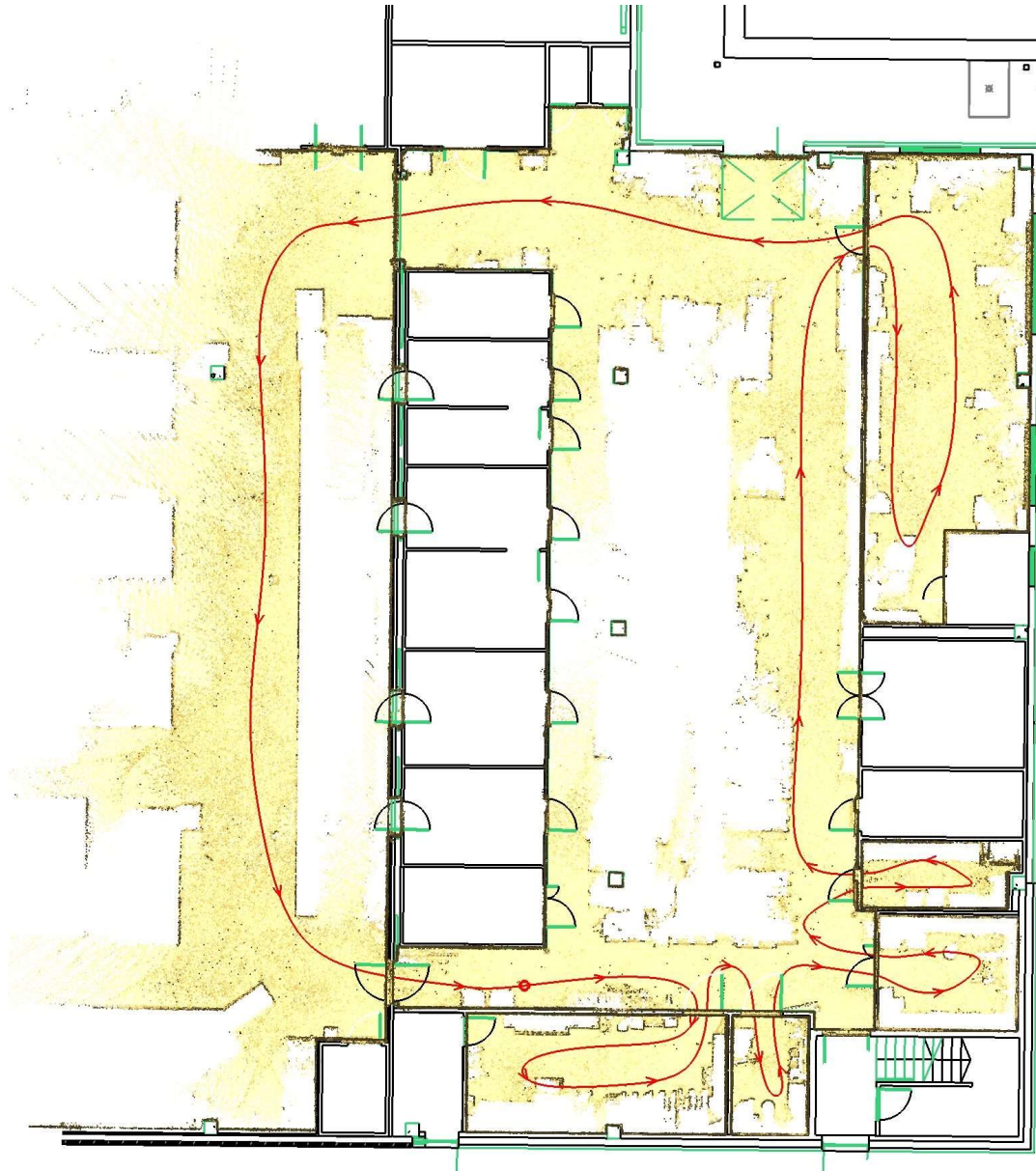
GeoSLAMiga mõõdeti ligikaudu 950 m<sup>2</sup> ala ca 15 min, tulemusena genereeriti umbes sama ajaga *.las* formaadis andmefail suurusega 518 377 KB. Riegl skänneriga mõõdistati sama ala 32 seisus, üks seis ca 4 minutit (mõõdistus ja fotode tegemine), töö tulemusena valmis 6 131 010 KB fail *.pts* formaadis (suurest kaubanduskeskusest väljalõigatud ala lao-ja tagaruumide osas). Töös selgub, et terrestilisel laserskaneerimisel tekkinud punktipilve (224 184 237 punkti) töötlemine 3D Reshaper programmis oli 3-4 korda aeglasem kui GeoSLAMiga tekkinud punktipilve (18 957 743 punkti, seega ligikaudu 10 korda vähem punkte kui referentsandmetel) töötlemine.





Joonis 6.22. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv kaubanduskeskuse ruumidest, kõrgem osa on saali osa, madalam osa laoruumid, kontoriruumid.

Joonis 6.23 näitab GeoSLAM ZEB-REVO-ga mõõdistatud ala kaubanduskeskuses. Punane joon markeerib liikumise trajektoori (ligikaudne liikumistee), kollane pind on osa mõõdistusel skaneeritud põrandapinnast. Trajektoori jälgides on näha, et joonisel vasakul liiguti läbi müügisaali, et käik kokku viia ja uurida, kas kõrged ja avarad ruumid on skaneerimisel segavateks faktoriteks (müügisaali osas on lagi tunduvalt kõrgem kui tagumistes laoruumides).



Joonis 6.23. Mõõdistatud ala skeem. Punane joon näitab ligikaudset liikumist GeoSLAM ZEB-REVO-ga, algus- ja lõpp-punkti tähistab punane ring all keskel, kollane pind on põrandapinnast moodustunud punktipilv. Aluseks on kaubanduskeskuse projekt.

LISA 10 Joonis 8.7 on välja toodud Riegl VZ-400 mõõdistatud ala koos punaseid ringe (skänneri statiivi alt mõõtmata jääv piirkond läbimõõduga 4 m) tähistavate seisukohtadega, 2-3 tunniga tehti 32 seisu. Kuna terrestilise laserskänneriga mõõdistati kogu kaubanduskeskus, siis müügisaali osas on punktipilves kõrvalseisude skaneerimiste pilveosasisid, seisupunktid asuvad vaadeldavast alast väljas. Joonisel on kujutatud keskuse põrandapind hoone plaani taustal. Valged alad on kohad, mida ei skaneeritud (joonisel kaks väiksemat ruumi) või paigad, kus oli inventar, kaubad mõõtekiire ees. Väiksemad ruumid mõõdistati skänneri asukohaga ukseavas, kus sidumine ümbitsevaga on kõige parem ja punktipilve jääb suurem osa väikesest ruumist.

### 6.3.2 Tööprotsess

Kõik elemendid, mis jäävad skaneerimisel laserkiire ette, salvestatakse punktipilve. Kaubanduskeskuse lao-ja tagaruumides on lisaks liikuvatele töötajatele palju kaupa ja inventari, mis lõplikus punktipilves avaldub. Selgema pildi ja täpsema andmetöötuse jaoks peaks punktipilved esmalt puhastama, samas on punktipilvede puhastamisel oht enese teadmata või pilvest mitteamusaamisel eemaldada ka vajalikud konstruktsiooniosad.

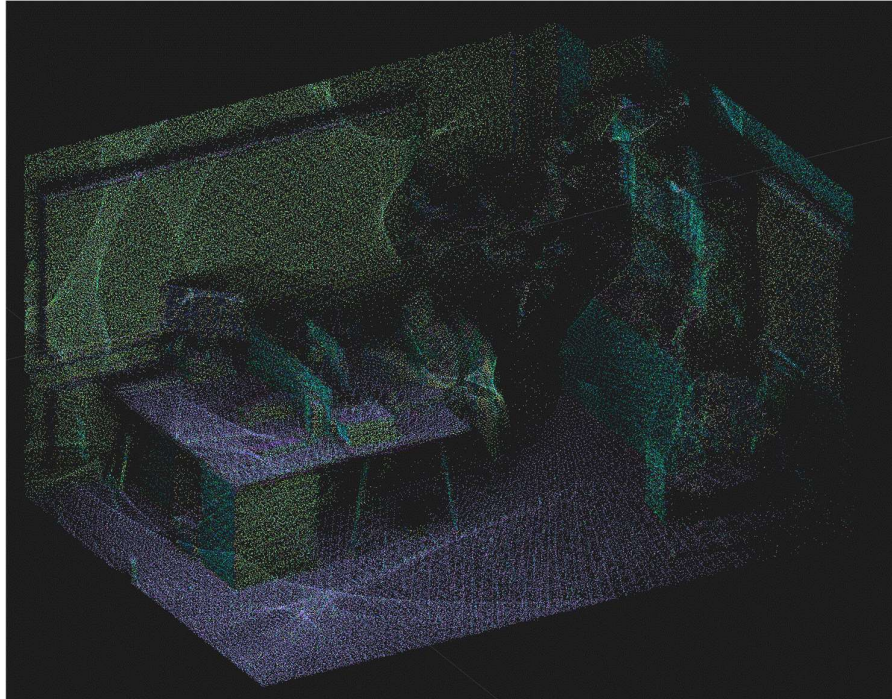
Antud töös otsustati pilved puhastada, akende ja peeglite peegeldused, inimesed, inventar, kaubad ja muud ebavajalikud punktid kustutati failist. Joonis 6.24 on toodud GeoSLAM punktipilv, kus ruumide sisemuses liikuvad inimesed, inventar ja kaubad on tumedama rohelise tooniga. Valged pinnad on alad, kuhu ei liigutud või mis jäävad teiste objektide taha. Töötamiseks jäeti alles hoone konstruktiivsed elemendid, korralik töötus kestis 2-3 tundi. Hoonete inventariseerimisjooniste koostamiseks on arendatud mitmeid programme ja nõ pluginaid erivatele tarkvaradele, punktipilvest saab leida sein- ja laepinnad ning kindlad esemed välja eraldada, aga kuna antud uurimistöös raames ei olnud see omaette eesmärk, siis erinevaid meetodeid pilve puhastamiseks ja automaatseks joonestamiseks ei katsetatud, pilved puhastati visuaalse pildi alusel.



Joonis 6.24. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv lõikena lae pinnast madalamal, näha on kaubanduskeskuse sisemus, inventar, inimesed, kaubad. Seinad joonistuvad selgelt välja.

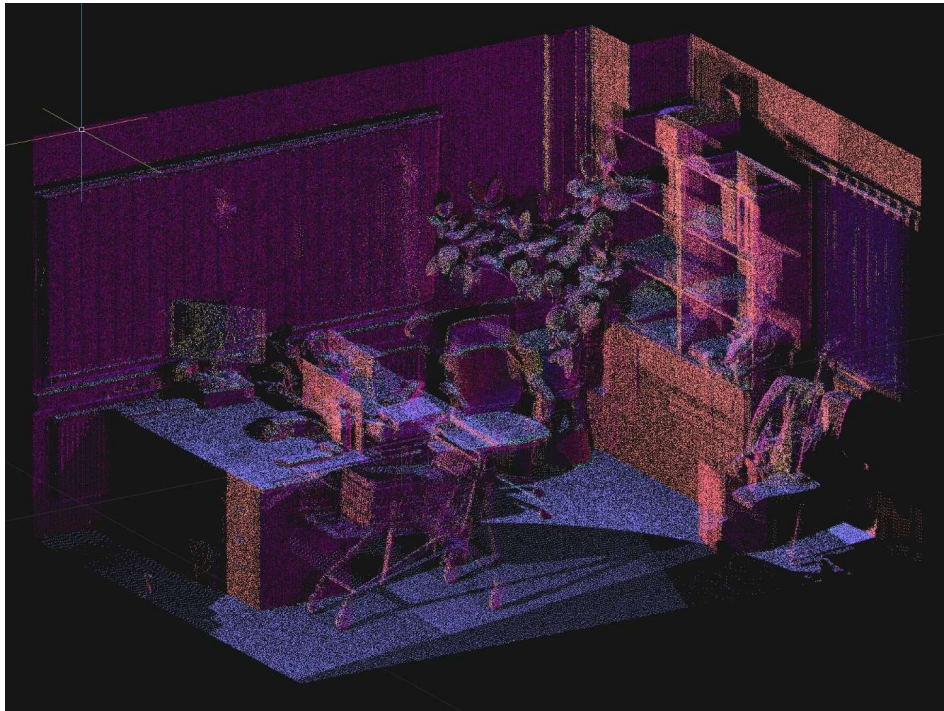
Puhastatud GeoSLAM punktipilv on 14 548 641 punkti (esialgselt 18 957 743 punkti). Riegl puhastatud punktipilv on 122 181 679 punkti (esialgselt 224 184 237 punkti).

GeoSLAM punktipilve näide kontori töökohast on esitatud Joonis 6.25. Pilvest on detaile raske eristada, aga töölaud, kapid seinä ääres ja kardinaga kaetud aken on arusaadavad.



Joonis 6.25. Väljavõte GeoSLAM REVO punktipilvest, kontori töökoht (AutoCAD tarkvaras)

Joonis 6.26 on toodud sama töökoht Riegl punktipilves, detailid on selgemini eristatavad, esemete piirjooned on konkreetsemad. Kuigi mõlemad punktipilved kujutavad sama asukohta, siis erinevused lisaks punktipilve selgusele tulenevad ka eri aegade mõõdistustest, mil situatsioon paari tunniga muutunud oli. Riegl punktipilve põhjal on eristatavad laual asuvad arvutid, ribikardina ribad, riuli jaotus ja taim ruumi nurgas, selliste detailide väljalugemiseks GeoSLAM punktipilv ei sobi. Samas inventariseerimisjooniste ja ka mudelite koostamisel eelloetud elemente vaja ei lähe.



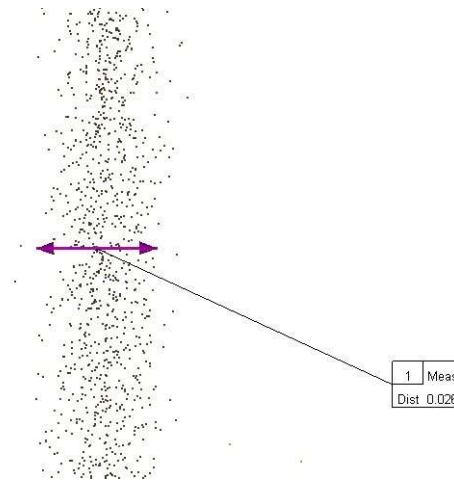
Joonis 6.26. Riegl VZ-400 punktipilv, kontori töökoht (AutoCAD tarkvaras)

Kõrgete lagede mõõdistamine ei ole ZEB-REVO jaoks problemaatiline, lae pinna struktuur on nähtav ja arusaadav, erinevad tehnoseadmed (ventilatsioonitorud, valgustussiinid) lae all on eristatavad (vt Joonis 6.22).



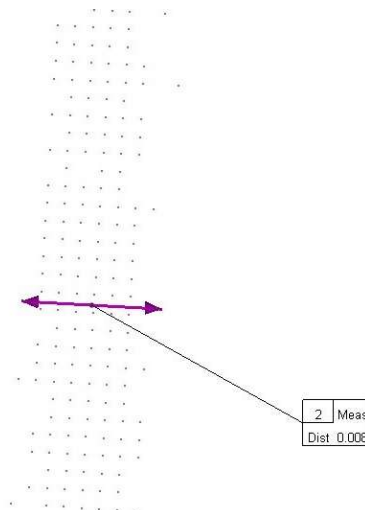
Joonis 6.27. GeoSLAM ZEB-FARO punktipilv vaatega keskuse lae alla, lambisiinid ja ventilatsioonitorud on punktipilves tuvastatavad (AutoCAD tarkvaras)

GeoSLAM punkt pilv on hõredam ja laialivalguvam kui terrestiliste skännerite punkt pilv Riegl näitel. Joonis 6.28 on toodud fragment pealtvaates seinast (kogu seina kõrguses 2,5m), seina moodustava punkt pilve hajuvus on vaadeldavas asukohas 26 mm, mistõttu seina sellisel kujul joonestamisel tekkivad plaanilised vead on ligikaudu 3 cm.



Joonis 6.28. GeoSLAM REVO fragment seinast pealtvaates, punkt pilve läbimõõt 26 mm

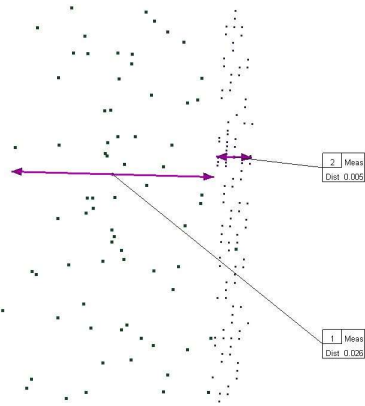
Samast seinast on väljavõte Riegl punkt pilvest Joonis 6.29, hajuvus on 8 mm, ligikaudu 3,5 korda vähem kui GeoSLAMi punkt pilves. Punkt pilv on kompaktsem ja punktide asetus korrapärane.



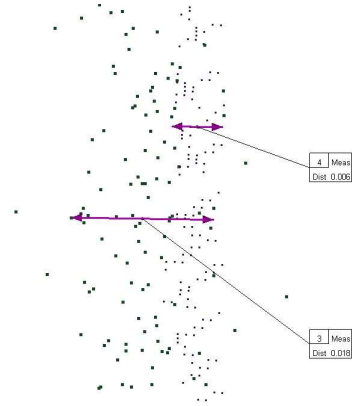
Joonis 6.29. Riegl VZ-400 punkt pilve fragment seinast pealtvaates, punkt pilve läbimõõt 8 mm.

Kogu seina ulatuses võib sein olla kalde all (ka antud näite puhul on seinal silmaga eristamatu kaldenurk), mistõttu seina joonestamisel tuleks võtta punkt pilvest (või mudelist) lõige 1,6 m kõrgusel (sellisel kõrgusel antakse ruumide pindalad [26]). Kogu seina ulatuses on mõnes kohas

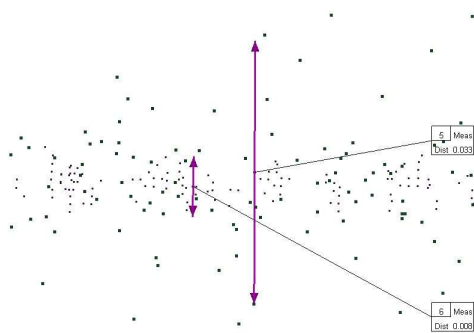
punktipilve hajuvus suurem, mõnes kohas väiksem olenevalt skänneri asukohast, mõõtmistihedusest, detailidest seintel. Näiteid 10 cm läbilõikega punktipilvedest seinte kohal on esitatud Joonis 6.30, Joonis 6.31, Joonis 6.32, Joonis 6.33, skeem väljavõtetest Joonis 6.34 ja tulemused on koondatud LISA 12 Tabel 8.5.



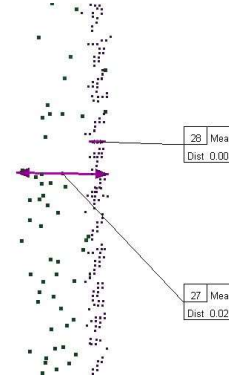
Joonis 6.30. Sein pealtvaates lõige 1-2, GeoSLAM 26 mm, Riegl 5 mm.



Joonis 6.31. Sein pealtvaates lõige 3-4, GeoSLAM 18 mm, Riegl 6 mm



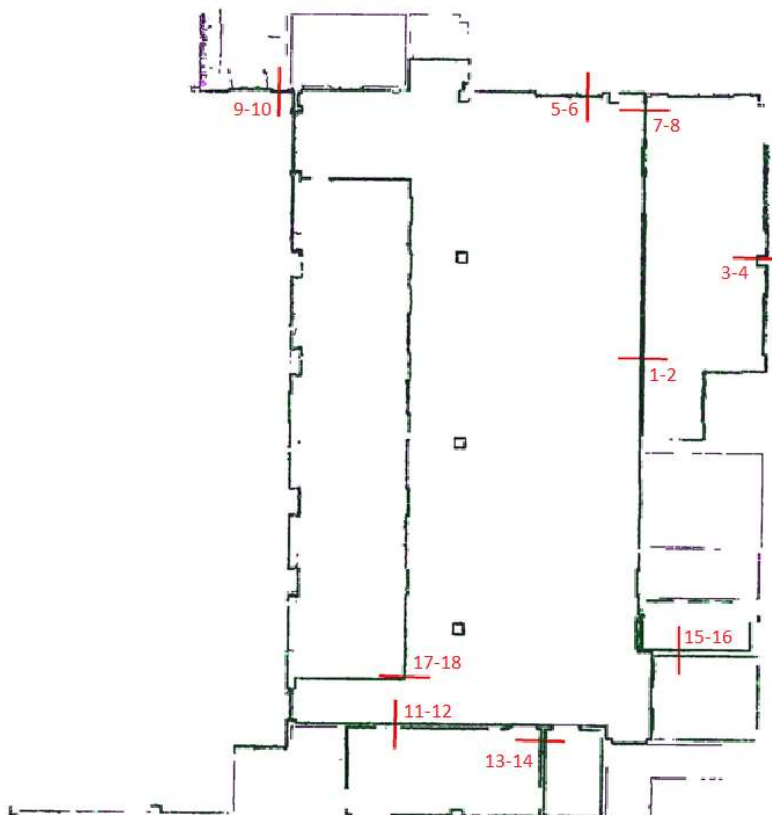
Joonis 6.32. Ukse asukoht pealtvaates lõige 5-6, GeoSLAM 33 mm, Riegl 8 mm



Joonis 6.33. Sein pealtvaates lõige 7-8, GeoSLAM 21 mm, Riegl 4 mm

Seinte osas on näha, et GeoSLAM punktipilv on Riegl punktipilve suhtes hajusam ja kaootilisem.



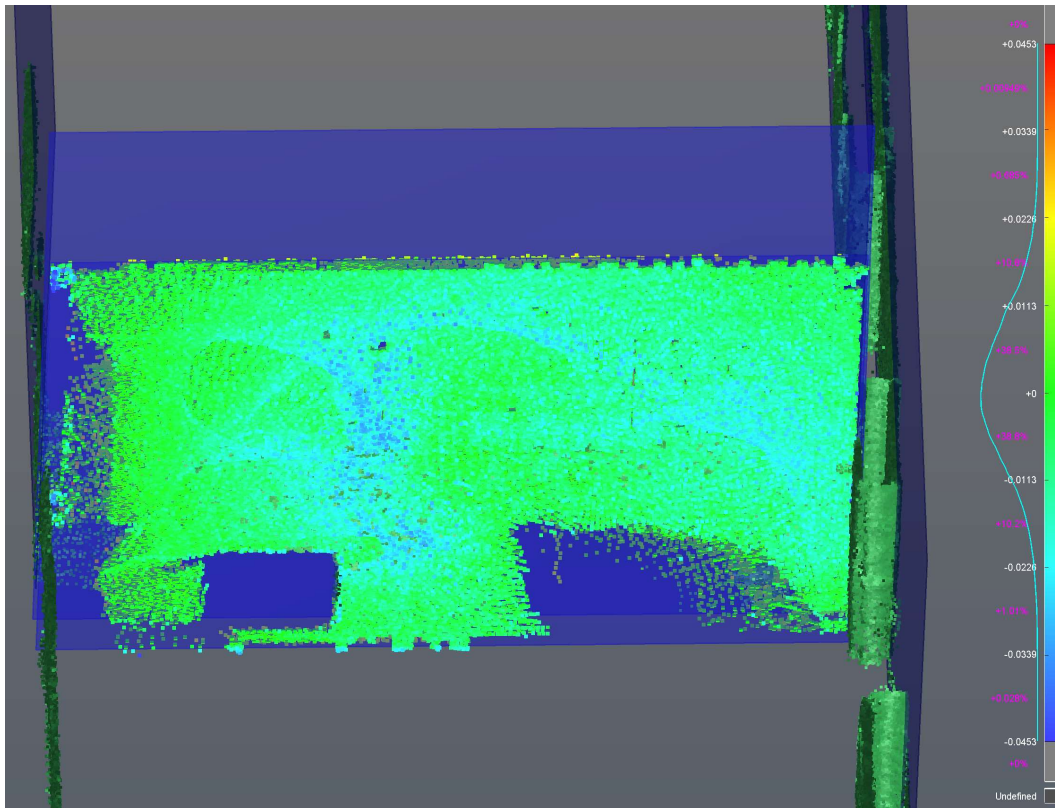


Joonis 6.34. Punktipilve hajuvuse mõõtmise asukohtade skeem pealtvaates

Hajuvuse analüüsimiseks on punktipilve läbilõikeid tehtud kogu plaani ulatuses erinevatel kohtadel. Tulemused sõltuvad sellest, kus on asetsenud skänner (skänneri asukoht ukseavas: lõikes 15-16 Riegl pilv 3 mm, käsiskänneril hõredam punktide asetus 23 mm).

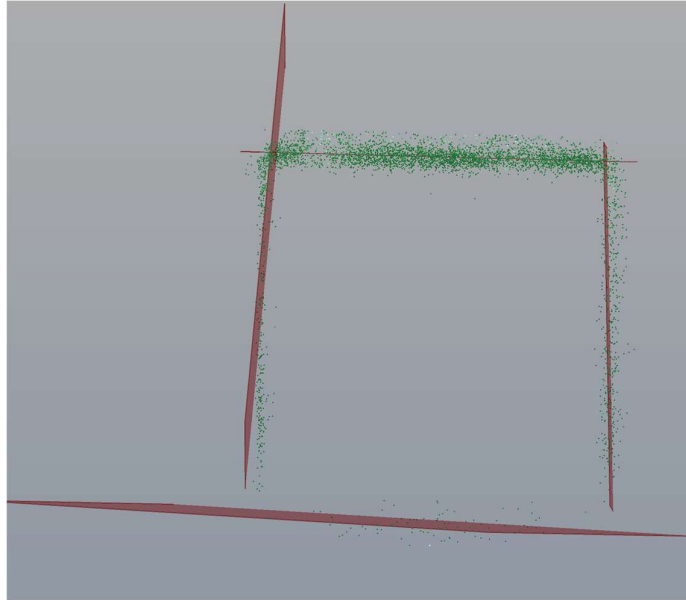
Kokkuvõtvalt on 9 juhul tehtud läbilõike puhul keskmiselt Riegl punktipilve hajuvus 5 mm ja GeoSLAM hajuvus 26 mm. Kolmes lõikes on vaadeldud lagede ja põrandate punktipilvede hajuvusi (vt LISA 11 Joonis 8.8), vastavad numbrilised väärtused on koondatud LISA 12 Tabel 8.6. Põrandate ja lagede puhul on Riegl punktipilve hajuvus keskmiselt 4 mm ja GeoSLAM puhul 23 mm, mis on veidi väiksemad kui seinte puhul, aga samas suurusjärgus.

Järgnevalt analüüsitakse ruume üldisemalt. Kõikidele seintele, lagedele ja põrandatele tekitati GeoSLAM ZEB-REVO pinda kujutava punktipilve asemele parima sobivuse alusel tasapinnad. Väljavõtte tööprotsessist on toodud Joonis 6.35. Tasapinna moodustamisel arvutatakse pindade kohta histogramm, näitel oleva seina punktid erinevad tasapinnast maksimaalselt 4,5 cm, üle 75% punktidest jäävad 1 cm kaugusele tasapinnast.



Joonis 6.35. Väljavõtte tööprotsessist, tasandi sobitamine seina punktipilve järgi, histogrammi alusel jääb 75% punktidest (rohekad toonid) 1 cm kaugusele tekitatavast tasapinnast

Kohtades, kus punktipilv oli hõre, punkte väga vähe (kaupade, inventari taga), ei saanud moodustada korralikku tasapinda, sellised tasapinnad eemaldati tööst (näitena Joonis 6.36 post pealtvaates).



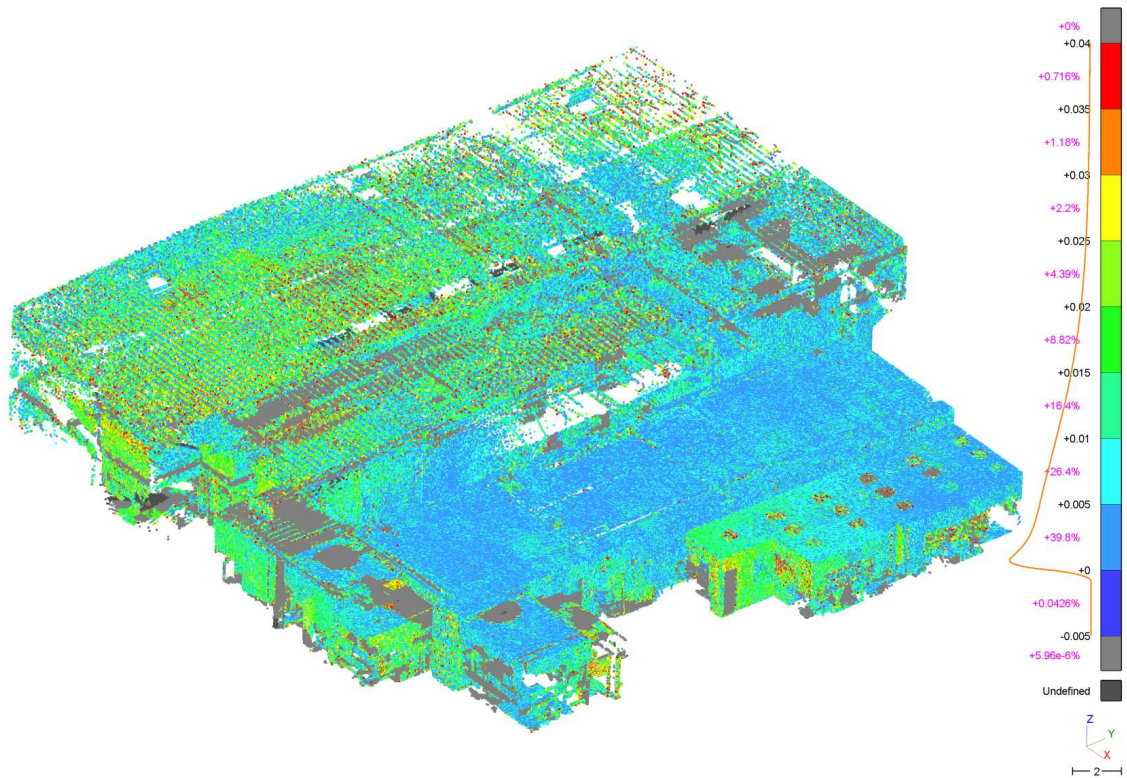
Joonis 6.36. Väljavõtte tööprotsessist, kus posti kujutava punktipilve alusel moodustati tasapinnad posti külgedele. Punaka tooniga on tasapind, rohelisega on GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv. Selgelt eristub, et väheste punktidega korrektset tasapinda automaatselt moodustada ei õnnestu (posti alumine ja vasak külg).

Sama süsteemiga moodustati tasapinnad Riegl skänneri mõõdistatud punktipilves. Kui GeoSLAM punktipilve genereerimisel tasapindadeks oli vaja jälgida, kas tasapind moodustub seina asukohale (vt Joonis 6.36), siis Riegl punktipilvel selline probleem praktiliselt puudub, sest seina moodustavad punktid on korrapäraselt ja selgelt arusaadavalt paigutatud, üleliigsed nõ ujuvad punktid suuremalt jaolt puuduvad.

Tasapindade abil saab kahte punktipilve omavahel võrrelda. Selleks mõõdeti 1,6 m kõrgusel ruumide laiused, pikkused, lõigetel kõrgused, arvutati pindala (kui vajalikud andmed olemas olid) ja moodustati võrdlev tabel (vt LISA 14 Tabel 8.7).

Tabeli põhjal on mõõdetud 17 vahemaad (vt LISA 13 Joonis 8.9), keskmiselt on kauguste erinevus Riegl ja GeoSLAM ZEB-REVO punktipilvedest moodustatud tasapindade vahel 3 mm, kõrguste erinevus 1 mm. Nelja ruumi pindala võrdluses on keskmine erinevus 0,02 m<sup>2</sup>. Andmete põhjal võib eeldada, et väikeste ruumide mõõtmine ZEB-REVOga pindala palju ei mõjuta, aga väike valim ei võimalda teha üldistusi.

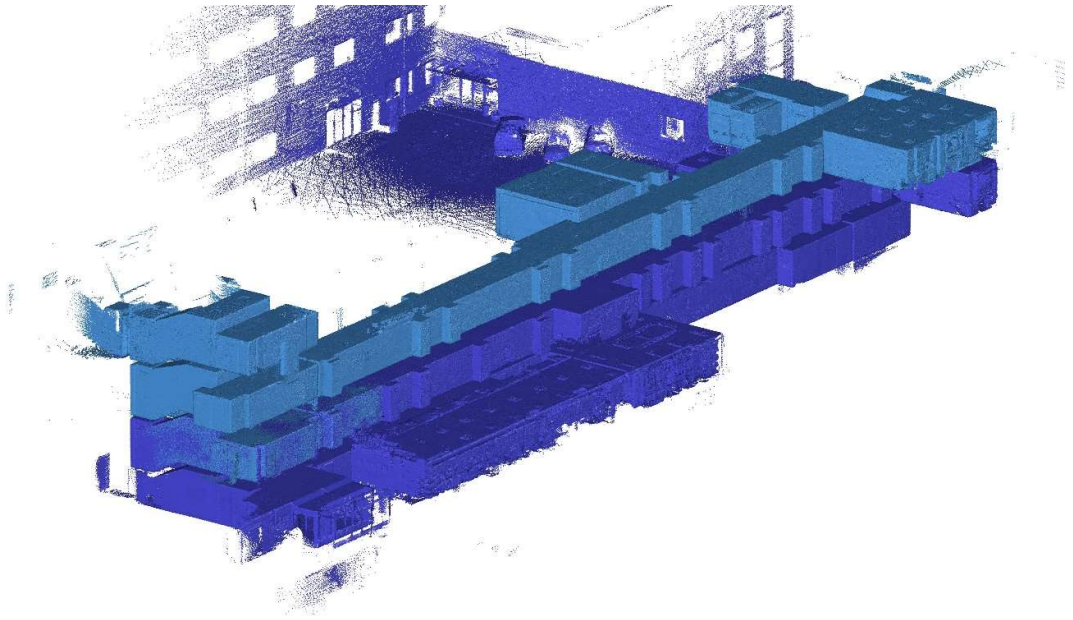
Lisaks tasapindadele võrreldi punktipilvi üldisemalt (vt Joonis 6.37). Joonis 6.37 põhjal on üle 80% punktidest erinevusega 15 mm, GeoSLAM ZEB-REVO punktipilv on Riegl punktipilvest suurem. Joonisel nähtavad hallid alad jäävad etteantud mõõteskaalast välja.



Joonis 6.37. Kahe punktipilve võrdlus 3D Reshaperis. Histogrammi alusel jääb ca 40% tulemustest 5 mm piiridesse, 65% 10 mm piiridesse ja üle 80% 15 mm piiridesse.

### 6.3.3 Maa-ameti hoone mõõdistamine

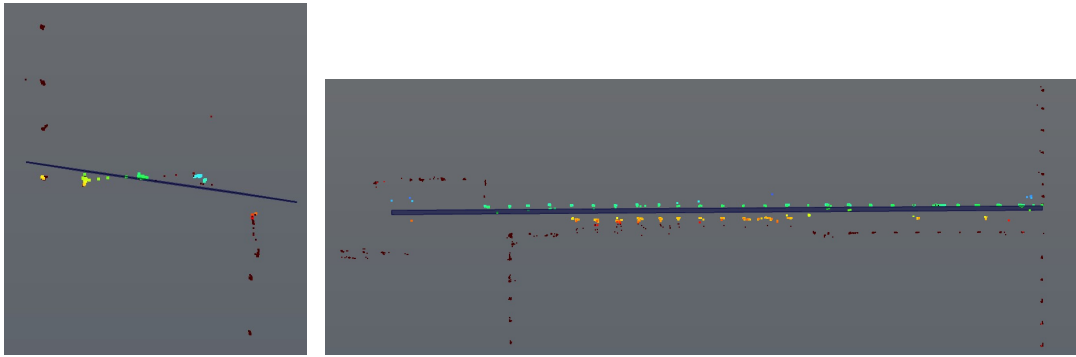
Maa-ameti hoone Mustamäe tee 51 Tallinnas mõõdistati 28. juuni 2018 GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänneri ja Faro Scene staatilise skänneriga, skaneeriti kolm korrust. Visuaalne pilt kogu mõõdistusest on esitatud Joonis 6.38.



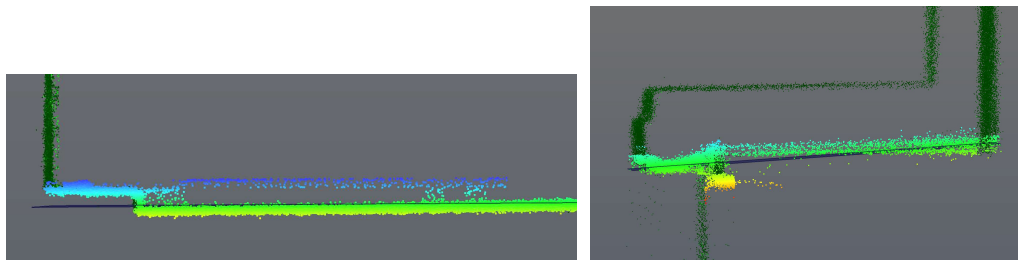
Joonis 6.38. Maa-ameti hoone puhastamata punktipilv mõõdistatud GeoSLAM ZEB-REVO-ga. Tumedam sinine toon on üks käik, heledam sinine toon kolmanda korruse osas teine käik.

GeoSLAM punktipilv koosneb kahest käigust erinevate korruste vahel, mõõdistatud ei ole kõiki hoone ruume, kokku 64 164 127 punkti. Faro punktipilv on eelnevalt eraldiseisvatest seisudest kokku pandud ja jagatud kolmeks korruseks ning mõõdistatud on kõik ruumid hoone kõigil korrustel, punktipilved on hõrendatud (andmetöötluse mahu vähendamise eesmärgil), kokku 3 026 266 punkti, mistõttu punkte on 20 korda vähem kui GeoSLAM puhul.

Vaadeldud punktipilvede puhul vertikaalsete tasandite moodustamiseks 3D Reshaper programmi abil hästi ei õnnestu, Faro punktipilv on mõnes kohas liiga hõre ja tarkvara ei arvesta tasapinna moodustamisel nõ õigete punktidega (vt Joonis 6.39). GeoSLAM punktipilv on vastupidi hajus ja tasapinna arvutamiseks kaasatakse ebavajalikke punkte (vt Joonis 6.40). Korrekse mudeli moodustamiseks peaks uurima tarkvara erinevaid meetodeid ja võimalusi punktipilve automaatseks töötlemiseks, ent hoone mudeldamine ei kuulu antud magistritöö raamesse ja siinkohal seda ei uurita. Maa-ameti hoone plaanid joonestati AutoCAD Civil keskkonnas punktipilvede alusel autori poolt käsitsi arvestades, et kui hoonest ei ole vaja moodustada 3D mudelit, siis plaanid joonestatakse ka geodeesiaettevõtetes punktipilvedest geodeedi poolt.



Joonis 6.39. Faro punktipilves seintele tasapindade moodustamine, värvilised punktid näitavad, et tasapinna arvutamiseks on kaasatud ka nõ valed punktid kõrvalasuvate seinte osas



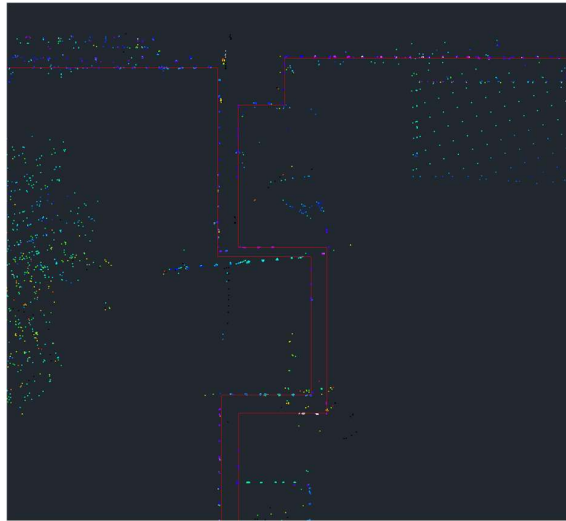
Joonis 6.40. GeoSLAM punktipilves tasapindade moodustamine, tasapinnad arvutatakse värviliste punktide alusel, mis ei kujuta korrektsid seinapindasid

GeoSLAM mõõdistusest tekkinud punktipilv on seinte osas hajus, autor joonestas seinapinda moodustava punktipilve keskeljele seinakontuuri (vt Joonis 6.41).



Joonis 6.41. GeoSLAM ZEB-REVO punktipilve lõige Maa-ameti hoone esimesest korrusest, fragment pealtvaates. Kollased sirged jooned on autoripoolsed seinakontuurid

Joonis 6.42 on esitatud eeltoodud fragment Faro punktipilvest. Pilv on hõrendatud, mistõttu on situatsioonist kohati keeruline aru saada, samas on seinapindu moodustavad punktid reastatud ja selged, autoripoolsed seinakontuurid on joonestatud piki punktideridu.



Joonis 6.42. Faro punktipilve lõige Maa-ameti hoone esimesest korrusest, fragment pealtvaates. Punased kontuurid on autori joonestatud seinakontuurid

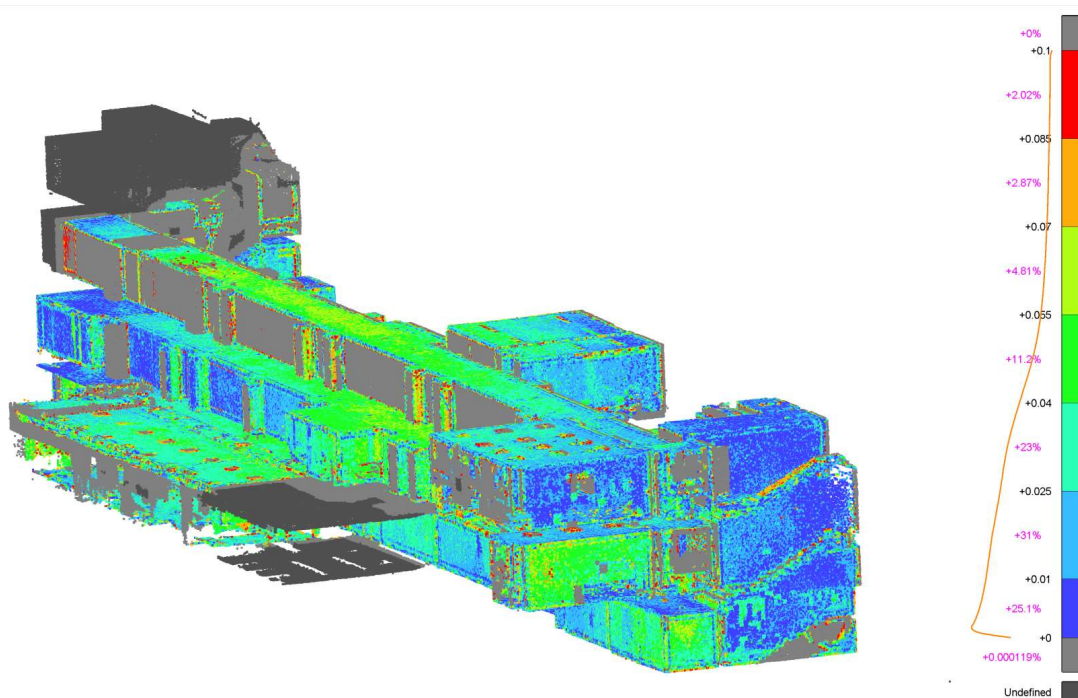
Faro mõõtmistulemused edastati magistr töö autorile kolme osana, kus erinevad seisud olid kokku liidetud, ent korruste kaupa eraldi failides. Kaks esimest korrust sobivad kohakuti, ent kolmas korrus on tegelikkusest lühem (vt LISA 15 Joonis 8.10), nihe tekib kolmanda korruse koridoris, kus koridoriaosa on pilves valesti ühendatud 2,9 m erinevusega (vt LISA 15 Joonis 8.10 ja LISA 16 Joonis 8.11). Avastatud viga näitab, et punktipilvede automaatne ühendamine võib olla ekslik ja situatsiooni mõõdistamisel oleks tarvilik üksikute kontrollmõõtmiste võtmine.

LISA 17 Joonis 8.12 on esitatud punktipilvedest joonestatud lihtsustatud korruste plaanid. Lisatud on ruumide numbrid pindaladega, punasega on referentsandmed ja kollasega käsiskänneri andmed. Ruumidena toodi välja üksnes need, millel oli olemas mõlema skänneri punktipilv ja arusaadavad sein moodustavad punktid.

Ruumide pindalad on kokkuvõtvalt esitatud LISA 18 Tabel 8.8. Kokku loendati 23 ruumi, ent punktipilve nihke tõttu kolmanda korruse koridori pindala statistilistes arvutustes eiratakse. Keskmiselt olid ruumide pindalad erinevusega, suurimad erisused ulatusid 0,08 m<sup>2</sup> juurde ehk ümardatuna „ruutmeetritesse täpsusega üks koht peale koma“ [26] (ehitisregistrisse kandmise täpsus) on erinevus 0,1 m<sup>2</sup>. Kõikide ruumide pindalad kokku saadi erinevusega 0,04 m<sup>2</sup> ehk 0,004% erines käsiskänneriga saadud tulemus referentsandmetest ning summaarselt ei teki ka

ümardamisel suurt viga. Saadud erinevused mõjutavad pindala määramise täpsust vähesel määral, ent mõnel juhul võib erisus oluliseks osutuda, sest pindalad määratakse 0,1 m<sup>2</sup> täpsusega, mistõttu ümardamisel tekkivad vead võivad olla määrava tähtsusega üksikute ruumide kujutamisel.

Siiski peab lisama, et autori arvates on pindalade kontuuride joonestamine punktipilvedest käsitsi ehk silma järgi ebamäärane tegevus nii Faro väga hõrendatud punktipilve kui ka GeoSLAM suhteliselt hajutatud punktipilve korral, sest mõne mm sein nihutamine võib suurema ruumi pindala oluliselt mõjutada. Seetõttu soovitab töö koostaja punktipilvedega tegelemisel kasutada mudeldamist, mis võiks anda sõltumatu ja korrektsema lahenduse ruumide kontuuride määramisel ja pindalade arvutamisel.



Joonis 6.43. Maa-ameti hoone punktipilvede võrdlus, erinevad toonid skaalal 0-0,1 m näitavad ZEB-REVO punktipilve suuremana kui referentsandmed.

Joonis 6.43 on esitatud punktipilvede võrdlus ZEB-REVO ja Faro vahel. Kuna mõlemad pilved olid suvalises koordinaatsüsteemis (Faro erinevad korrused erinevates süsteemides), siis autor tõstis parimal võimalikul viisil pilved ühtsesse süsteemi ja teostas võrdluse kõigi korruste kohta korraga. Jooniselt selgub, et trepikojad lähevad hästi kokku (sinised toonid), erinevused jäävad maksimaalselt 1 cm piiridesse, ZEB-REVO punktipilv on suurem, kõik tumesinised alad ehk ca 25% punktidest jäävad 1 cm erinevuse piiridesse. 56% punktidest on 2,5 cm erinevusega ja ca 80% on 4



cm erinevusega. Helehallid toonid näitavad, et punktid jäävad etteantud skaalast välja, siin on üks või teine punktipilv puudulik või nihkes, et võrdlus toimiks. Tumehallid toonid kujutavad piirkondi, kus võrdlemiseks ei olnud alust, ei olnud kahte pilve, üks piirkond on esimesel korrusel Faro-ga mõõdetud ruum, mida GeoSLAM pilves ei ole, teine oluline koht jääb kolmanda korruse trepikoja juurde, sest korruse koridor ja trepikoda on eelmiste suhtes nihkes.

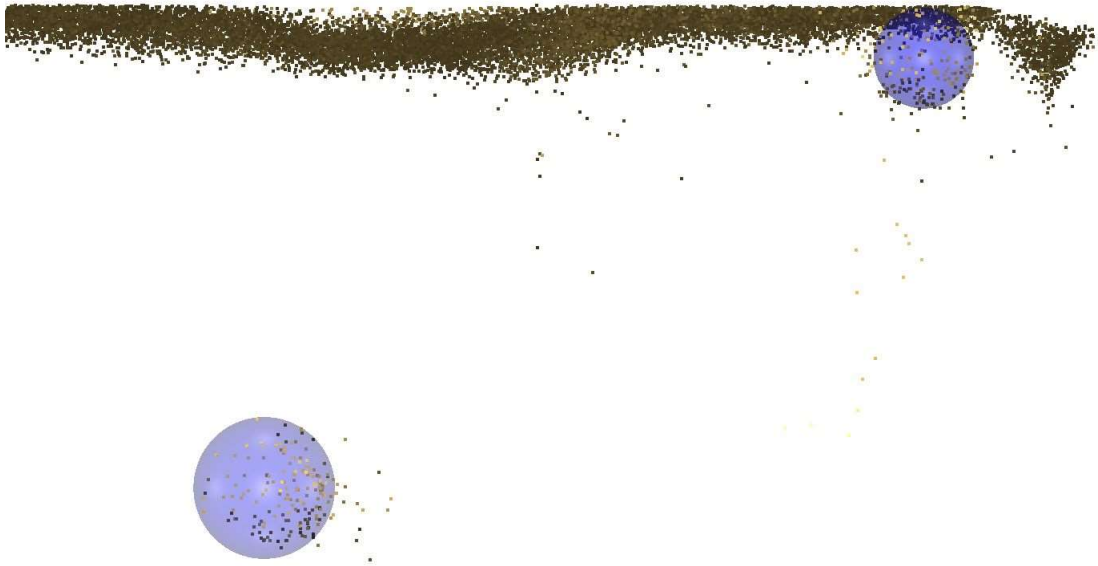
## 7 TULEMUSTE KOKKUVÕTE

Estonia kaevanduse maa-alused kaeveõõned saab töös esitatud tulemuste põhjal mõõdistada GeoSLAM ZEB-REVO seadmega. Meetod on kiire, 40 minutiga mõõdistati 14 500 m<sup>2</sup> samas kui terrestilise laserskänneriga kulus tund aega 5200 m<sup>2</sup> ehk peaaegu 3 korda väiksema ala skaneerimiseks. Käsiskänneriga tekkiv punktipilv on hajusam kui statiivile asetatud seadmega saadav, 1 cm asemel 3-5 cm, mis mõjutab punktipilvest 3D pinna genereerimise ja lõigete tegemise täpsust, ent kaevanduses vajaminevate andmete jaoks on see piisava täpsusega, tervikuna erineb ZEB-REVO punktipilv plaaniliselt kuni 2 cm ja kõrguslikult kuni 5 cm referentspinnast väljapoole. Tugitervikute kogupindala oli referentsandmetega võrreldes 0,5% suurem ja sellest tulenevalt maht 0,7% väiksem. Samas markšeiderite saadud tervikute kogupindala oli ühel juhul 1,8% väiksem käsiskänneriga mõõdetavatest andmetest, teisel juhul 1,8% suurem, mahud esimesel korral 0,04% suuremad ja teisel korral 0,2% väiksemad. Erinevused markšeideri andmetega võivad tähendada, et laserkaugusmõõtjaga mõõtmine oleneb indiviidist (erinevad kambriplokid mõõdeti erinevate inimeste poolt) ja hetkeolukorrast, mistõttu skaneerimise meetod on täpsem ja usaldusväärsem.

ZEB-REVO-ga mõõdistamisel võtavad ettevalmistustööd ca 10 min, käigu tegemine 20-30 min, punktipilve moodustamine 20-30 min ja töötlemine (punktipilve puhastamine, orienteerimine, mudeldamine, ristlõigete tegemine, mahu arvutamine) 25-30 min, mistõttu kulub ühe kuu tervikute ning mahu arvutamiseks terves kamberplokis ühel inimesel kuni 4 tundi tööd. Markšeider abiliseega mõõdistavad laserkaugusmõõtjaga kuu mahtu 4 tundi, andmete töötlemine võtab 8 tundi ja kogu aeg on kokku 12 tundi, töö kestab 3 korda kauem kui GeoSLAM-iga mõõtmine aega võtaks. Andmemahud on punktipilve puhul suuremad, sest GeoSLAM andmemaht ühe skaneerimise kohta on ca 10MB, mitme kuu skaneerimised nõuavad andmete hoidmiseks ja töötlemiseks vastavat riist- ja tarkvara. [2]

GeoSLAM-iga töötamiseks maa-aluses kaevanduses on mõned tähelepanekud. Praegu kasutatavate puurvankrite operaatorid vajavad töö tegemiseks sihti, mistõttu punktide kinnitamine lakke ja nende tahhümeetriga mõõdistamine peavad hetkeolukorras alles jääma. Koordineeritud mõõdistusvõrgu punkte saab kasutada sfääriliste tähistega paigutamiseks. Minimaalselt on ühe käigu jaoks tarvilik kolm tähist, ent tähiste hävimisohu või märkamata jätmise vältimiseks võiks neid paigaldada lisaks (samaaegselt konksude lakkekinnitamisega). [2] Tähisted võivad olla ca 65 mm läbimõõduga tennisepallide moodi sfäärilised kehad, mille tuvastamine punktipilves võib mõnel juhul keeruliseks osutuda, ent suurema läbimõõduga sfäär ei

pruugi anda paremaid tulemusi. Joonis 7.1 on toodud katsetuseks laest madalamale asetatud 90 mm sfääriline keha (jõuluehe) ja 65 mm nõ tavajuhul kasutusel olnud sfääriline keha, punktide hajuvus on mõlemal juhul suur ja sfääri tuvastamine ei ole suurema objekti puhul lihtsam. Punktipilve orienteerimisel tuleks kasutada pilve suhtes üksteisest kõige kaugemal asetsevaid tähiseid, mis arvutamisel annavad täpsemaid tulemusi, koordineeritud punktidel peaks kõrgused kõigis tähiste asukohtades üles mõõtma.



Joonis 7.1. GeoSLAM punktipilves 65 mm (ülemine) ja 90 mm sfäärilise keha genereerimine

Käigu tegemisel peaks käigu algus- ja lõpp-punkt asuma mõõdistava ala suhtes võimalikult keskel, sest SLAM algoritm arvutab punktipilve järk-järguliste iteratsioonide abil ja korduvate punktide mõõtmine ala keskel võimaldab trajektoori ning punktipilve täpsust suurendada.

Skaneerimisel jääb punktipilve kõik, mis ümber operaatori, seega töö täpsuse, korrektsuse ja aja kokkuhoiu eesmärgil peaks mõõdistaja töötama üksi võimalikult väheste inimeste ja masinate juuresoleku ja liikumisteta. Peatükis 5.1.3 on toodud täpsustavad juhised käsiskänneriga mõõdistamiseks. LISA 19 [2] on kokkuvõtvalt esitatud 3D Reshaperi juhised punktipilvest maa-aluse mõõdistuse jaoks tervikute pindalade ja väljakaevemahu leidmiseks.

Hoonete mõõdistamise ZEB-REVO käsiskänneriga on tulemuste põhjal inventariseerimisjooniste koostamiseks mõnel juhul sobiv instrument. Kaubanduskeskuse andmete alusel toimus GeoSLAM seadmega mõõdistamine 15 minuti jooksul, käigu pikkuseks ca 150 m ja mõõdistusala ca 900 m<sup>2</sup>. Sama ala mõõtmiseks statiivile asetatud laserskänneriga toimus 32 seisus 2-3 tunni jooksul.

Terrestiline skänner annab detailsema ja täpsema punktipilve, ent inventariseerimise jaoks on vaja detailid üldistada ja selle jaoks on käsiskänneri punktipilv sobilik. 10 cm löikel oli Riegl punktipilve hajuvus keskmiselt 5 mm vertikaalpindadel ja 4 mm horisontaalpindadel, ZEB-REVO punktipilve hajuvus oli 5 korda suurem, vertikaalpindadel 26 mm ja horisontaalpindadel 23 mm. Automaatselt genereeritud tasapindade abil analüüsitud pindade vahelised kaugused olid 1-3 mm erinevusega, mis moodustab 0,03-0,04 % erinevuse referentsandmetega. Väikese valimiga pindalade puhul jäi erinevus alla 0,1%. Üldistatult oli GeoSLAM punktipilv Riegl punktipilvest 15 mm hälbega suurema poole, 65% pindadest jäid 10 mm erinevuse piiridesse, 80% 15 mm sisse.

Maa-ameti hoone andis võimaluse suuremahulisemaks pindalade võrdluseks. 22 ruumi pindalad keskmiselt Faro ja GeoSLAM punktipilves ei erinenud, ent suurimad erinevused olid 0,07 ja 0,08 m<sup>2</sup>, mis ümardamisel annavad 0,1 m<sup>2</sup> erinevuse ja võivad ruumide pindala lõpp-väärtusi sellega mõjutada. Samas leiab autor, et käsitsi punktipilvest seinakontuuride joonistamine on ebamäärane ja tuleks kasutada mudeldamise meetodit, mis peaks ja võiks anda parima võimaliku tulemuse ja korrektse võrdluse nagu eelnevalt vaadeldud kaubanduskeskuse juhtumil. Käesolev magistr töö mudeldamisele ei keskendunud, mistõttu autor pakub selle välja kui uurimistöo edasisteks võimalikeks analüüsideks GeoSLAM ZEB-REVO käsiskänneriga hoonete mõõdistamisel.

## KOKKUVÕTE

Magistritöös uuriti Eestis vähekasutatud käsiskänneri GeoSLAM ZEB-REVO kasutusvõimalusi maa-aluste kaevandustööde efektiivistamise ja kaasajastamise eesmärgil. Laserskaneerimine on mujal mäetööstuses laialdaselt kasutusel, otsitakse uusi ja paremaid võimalusi tööde lihtsamaks ja ohutumaks läbiviimiseks ning katsetatakse erinevate mobiilsete laserskännerite ning droonide kasutusvõimalusi.

GeoSLAM ettevõtte alustas SLAM põhise algoritmiga instrumendi loomist esmalt just kaevanduste jaoks, kus GNSS satelliitside puudub ja standardset töötavaid mobiilseid laserskännereid kasutada ei ole võimalik. Arendatud seade võimaldab mobiilset mõõtmist kohtades, kus tavapärased meetodid ei tööta, nagu allmaakaevandused ja –käigud, kitsad, keerulised ruumid ja koridorid ning tihedad metsaalad. Seega on Eesti mäetööstuse kaasajastamiseks käeshoitav (või ka liikuvõidukile kinnitav) laserskanner sobilik instrument maa-alusteks mõõdistustöödeks, mis asendaks hetkel kasutuselolevaid laserkaugusmõõtjaid.

Lõputöös analüüsiti ZEB-REVO andmete täpsust referentsandmetega (terrestiline laserskanner Faro Focus<sup>3D</sup> X330), maa-aluse mõõdistuse punktipilvede erinevused jäid maksimaalselt 5 cm piiridesse, tugitervikute pindalad erinesid 0,5% ja väljakaevamaht 0,7%. Lisaks täpsetele tulemustele saab ühtsesse andmebaasi kogutud punktipilvi uuesti üle vaadata, arvutusi teha, ohtlikuks muutunud alade kohta (lahtioestatud alad) täiendavat analüüsi teostada, varem tähelepanuta jäänud aspekte tagantjärele inspekteerida.

Hoonete inventariseerimisjooniste koostamiseks leiti, et ZEB-REVO on kompaktne, lihtne, väike, kerge ja kiire instrument keeruliste ja suurte hoonete mõõdistamiseks, kus statiivile asetatud laserskänneriga töötamine võtab kaua aega ja kõikidesse kohtadesse ligi ei pääse. Väikeste ruumide mõõdistamisel kaubanduskeskuse näitel jäid vertikaalpindadevahelised erinevused võrrelduna terrestilise laserskänneriga Riegl VZ-400 3 mm juurde, horisontaalpindade erinevused 1 mm piiridesse. Pindalade erinevus oli neljal ruumil keskmiselt 0,02 m<sup>2</sup>, ent maksimaalne erinevus 0,1 m<sup>2</sup>, mis pindala määramist mõjutab. Ilma mudeldamiseta käsitsi punktipilvest plaanide joonestamine Maa-ameti hoone näitel pindalad keskmiselt ei erinenud, ent maksimaalsed erinevused jäid ka siin ca 0,1 m<sup>2</sup> juurde, mis üksikute ruumide pindala mõjutab. Seega võiks eeldada, et väikeste ruumide pindala ZEB-REVO-ga mõõtes oluliselt ei muutu ja sobib pindalade määramiseks, samas suurte ruumide puhul on mõned millimeetrid erinevused suurema tähtsusega ja pindalade arvutamisel tuleb olla kindel, et see on määratud korrektsel viisil. Autori

arvates võiks ZEB-REVO seadet inventariseerimisjooniste koostamiseks kasutada eelkõige väikeste ruumide juures, suuremate ruumide puhul tuleks teha täiendavaid kontrollmõõtmisi näiteks laserkaugusmõõtjaga, et tulemuses veenduda ja jooniste koostamiseks kasutada mudeldamise meetodit.

Mudeldamine on pindalade määramisel sõltumatu võimalus, magistritöö autor antud töö raames erinevaid mudeldamise meetodeid ei uurinud, mistõttu hoonete inventariseerimisjooniste koostamiseks tuleks läbi viia täiendavaid uurimistöid mudeldamiste abil.

## SUMMARY

In this Masters thesis mobile laser scanning as a method to survey underground mines and enclosed spaces in buildings has been evaluated. Mobile laser scanning technology is commonly used in outdoor situations, where the surveyor's location can be determined by GNSS (Global Navigation Satellite System) signals, but, because satellite systems cannot be used in enclosed spaces, novel methods to obtain accurate mobile laser scanning results in those circumstances are actively being researched and developed.

In the beginning of year 2019 Division of Mining of Department of Geology in TalTech in association with Road Engineering and Geodesy Research Group of Department of Civil Engineering and Architecture and with the company Hades Geodeesia OÜ studied surveying technologies in an Estonian mine to improve and modernize mine surveying methods in order to make surveyors' work easier, more accurate and faster. The author participated in this research and her Masters thesis is based on the results in [2].

In this paper conventional methods for surveying underground mines and a new mobile laser scanning method have been compared. Mine surveyors measure cross sections of mine chambers with laser-distometers to calculate the areas of the pillars and the volume of mineral resources, but this is time-consuming and error-prone because of the repetitive writing of results of the measurements to a journal and copying from the journal into the technical drawing programs. In this thesis the handheld laser scanner GeoSLAM ZEB-REVO is introduced, the instrument is a compact, simple to use, small in size, lightweight and fast scanner based on the SLAM (Simultaneous localization and mapping) algorithm used to compute motion trajectory and map a point cloud. It will not need a GNSS signal and therefore can be used in underground mines, passages, narrow and complex spaces, corridors and dense forest areas.

The author analysed the point cloud from ZEB-REVO comparing it to the reference data from the terrestrial laser scanner Faro Focus<sup>3D</sup> X330 and the results were accurate, the difference between the clouds remained within 5 cm, the areas of the pillars of the chambers differed by 0,5% and volume of mineral resources by 0,7%. Handheld laser scanner produces a 3D point cloud with full information about the underground mine, in which the support elements and caved in pieces on the ceilings, rooms and pillars can be determined. Furthermore, point clouds collected in a database can be re-examined, distances measured, areas calculated as well as volumes and this information can be useful pinpointing unsafe areas in an underground mine.

Laser scanners can also be used in buildings for making drawing plans or 3D models from point clouds. Measuring with the laser scanners placed on a tripod is time-consuming and they can not be placed in all locations of the building or the room. The operator of ZEB-REVO can access all areas of the measured object and the scanning time is short. In this paper the author concluded that compared to the conventional terrestrial laser scanner small rooms can be measured as accurately and more easily with the handheld laser scanner, because the resultant areas of the rooms were not influenced by the scanning method. On the drawing plans the areas will be given to an accuracy of one square meter and rounded measurements from the handheld scanner achieved such accuracy in small spaces. However, results of scans in larger, longer or narrower rooms may be influenced by the increased noise and therefore uncertainty of the area calculation from ZEB-REVO's point cloud. The difference of the area of the room between the terrestrial and mobile scanning methods could in those cases be up to 0,1 m<sup>2</sup> which changes the resultant net room area, therefore additional surveying methods or measurements should be used. In the author's opinion the topic of using handheld laser scanners for making drawing plans should be more thoroughly studied and the possibility of using 3D modeling considered.



## VIIDATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Toomik, P. (2015). *Põlevkivi kaevandamise geoloogilised tingimused ja tehnoloogilised võimalused Narva karjääri näitel*. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [2] Väli, E., Kanter, S., Karu, V., Ellmann, A., Julge, K. Varbla, S., Malberg, K. (2019). *Markšeideritööde kaugseiremeetodite abil efektiivistamise võimaluste rakendusuuring*. II etapi aruanne. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [3] Väli, E., Kanter, S., Karu, V., Ellmann, A., Julge, K. Varbla, S., Malberg, K. (2018). *Markšeideritööde kaugseiremeetodite abil efektiivistamise võimaluste rakendusuuring*. Vahearuanne. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [4] Kutsar, R. (2016). *AS Enefit Kaevandused Estonia kaevanduse maavara kaevandamisloa KMIN-054 pikendamise taotluse keskkonnamõju hindamine*. Töö nr 2596/16. Tartu-Tallinn.
- [5] Quintero, M. S. jt (2008). *Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning*. Version 4. Euroopa. Loetud 28.05.2019 aadressil [jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo\\_Tutorial\\_Final\\_vers5\\_ENGLISH.pdf](http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_ENGLISH.pdf)
- [6] Uueküla, K. (2014). *Terrestilise laserskaneerimise andmete baasil loodud 3D mudelite kvaliteedi analüüs*. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [7] Kokamägi, K. (2016). *Mobiilse laserskaneerimise kõrgusliku täpsuse hindamine erineva taimestiku korral*. (Bakalaureusetöö). Eesti Maaülikool, Tartu.
- [8] Bahuguna, P. P. jt (2019). *Modern survey instruments and their use in mine surveying*. Dhanbad, India. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.academia.edu/8758993/MODERN\\_SURVEY\\_INSTRUMENTS\\_AND\\_THEIR\\_USE\\_IN\\_MINE\\_SURVEYING](https://www.academia.edu/8758993/MODERN_SURVEY_INSTRUMENTS_AND_THEIR_USE_IN_MINE_SURVEYING)
- [9] Ahamad, N. ja Ojha, S. K. (2015). *The Practical Application Of Laser Scanning in A Mining Environment*. Dhanbad, India. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.researchgate.net/publication/301229691\\_The\\_Practical\\_Application\\_Of\\_Laser\\_Scanning\\_in\\_A\\_Mining\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/301229691_The_Practical_Application_Of_Laser_Scanning_in_A_Mining_Environment)
- [10] Kajzar, V. (2015) *Verifying The Possibilities Of Using a 3D Laser Scanner in the Mining Underground*. Acta Geodyn. Geomater., Vol 12, No 1 (177), 51-58,2015 Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta\\_content/2015\\_doi/Kajzar\\_AGG\\_2015\\_0004.pdf](https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2015_doi/Kajzar_AGG_2015_0004.pdf)
- [11] Van Wegen, Wim. (2018). *Surveying in the Mining Sector*. GIM International. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.gim-international.com/content/article/surveying-in-the-mining-sector>
- [12] Peck Tech Consulting Ltd. (2019). uGPS Rapid Mapper kodulehekül. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://ugpsrapidmapper.com/>
- [13] Simela, J. V. (2016). *Towards Automated Underground Mine Surveying: Integration of Mobile Mapping with Georeferenced Geometric Beacons*. (Doktoritöö). Queen's University, Kanada. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://qspace.library.queensu.ca/handle/1974/13986>
- [14] James, N. (2018). *Drones being used to map underground areas, saving time and improving safety*. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.miningweekly.com/print-version/underground-mapping-drone-can-enhance-safety-surveyor-2018-04-27>
- [15] Zlot, R. ja Bosse, M. (2012). *Efficient Large-Scale 3D Mobile Mapping and Surface Reconstruction of an Underground Mine*. International Conference on Field and Service Robotics. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.researchgate.net/publication/257934653\\_Efficient\\_Large-Scale\\_3D\\_Mobile\\_Mapping\\_and\\_Surface\\_Reconstruction\\_of\\_an\\_Underground\\_Mine](https://www.researchgate.net/publication/257934653_Efficient_Large-Scale_3D_Mobile_Mapping_and_Surface_Reconstruction_of_an_Underground_Mine)
- [16] GeoSLAM Ltd. (2019) GeoSLAM kodulehekül. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://geoslam.com/>

- [17] Lisheen Mine (2015). *Lisheen Mine Accelerates Survey Workflows Using GeoSLAM ZEB1 to Accurately Map Underground Mines*. Loetud 28.05.2019 aadressil <http://geoslam.landmark.com.gr/wp-content/uploads/2016/12/59243-Lisheen-Mine-Ir.pdf>
- [18] Maapõueseadus. (2017). RT I, 12.12.2018, 53. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/MaaPS>
- [19] Nocerino, E. jt. (2017). *Investigation of Indoor and Outdoor Performance of Two Portable Mobile Mapping Systems*. SPIE Optical Metrology Conference. Euroopa. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.researchgate.net/publication/317969481\\_Investigation\\_of\\_indoor\\_and\\_outdoor\\_performance\\_of\\_two\\_portable\\_mobile\\_mapping\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/317969481_Investigation_of_indoor_and_outdoor_performance_of_two_portable_mobile_mapping_systems)
- [20] Sammartano, G. ja Spano, A. (2018). *Point clouds by SLAM based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*. Applied Geomatics. Volume 10, Issue 4, pp 317-339. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-018-0221-7#CR5>
- [21] GeoSLAM Ltd. (2017). *ZEB-REVO User's Manual v3.0.0*. Loetud 28.05.2019 aadressil <http://download.geoslam.com/docs/zeb-revo/ZEB-REVO%20User%20Guide%20V3.0.0.pdf>
- [22] Faro. (2016). *Faro Laser Scanner Focus3D X330 Tech Sheet*. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://faro.app.box.com/s/dd1af36zjlkhoabqdf4iw9xbd11puw5/file/60993766109>
- [23] Riegl. (2017) *DataSheet VZ-400. 3D Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing*. Loetud 28.05.2019 aadressil [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxriegl/downloads/10\\_DataSheet\\_VZ-400\\_2017-06-14.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf)
- [24] Isakar, M. (2011). *Põlevkivi*. TÜ geoloogiamuuseumi kodulehekül. Loetud 28.05.2019 aadressil <http://www.ut.ee/BGGM/maavara/pqlevkivi.html>
- [25] Aaloe, A. (2006). *Kukersiit – Eesti põlevkivi*. MTÜ GEOGuide Baltoscandia, Tallinn. Loetud 28.05.2019 aadressil [http://www.gi.ee/geoturism/Polevkivi\\_CMYK\\_062011\\_100dpiS.pdf](http://www.gi.ee/geoturism/Polevkivi_CMYK_062011_100dpiS.pdf)
- [26] Maa-ameti geodeesiakalkulaatorid. (2018). *Kohalik geodeesia kalkulaator*. Loetud 28.05.2019 aadressil <http://www.maaamet.ee/rr/helm/>
- [27] *Ehitise tehniliste andmete loetelu ja arvestamise alused*. (2015). RT I, 10.06.2015, 8. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/110062015008>
- [28] Russhakim, N.A.S. jt (2019). *The Suitability of Terrestrial laser scanning for building survey and mapping applications*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W9. Bergamo, Itaalia. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W9/663/2019/isprs-archives-XLII-2-W9-663-2019.pdf>
- [29] Durrant-Whyte, H. Ja Bailey, T. (2006). *Simultaneous localization and mapping: part I*. IEEE Robotics & Automation Magazine. Volume 13, Issue 2, 99-110. Austraalia. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://people.eecs.berkeley.edu/~pabbeel/cs287-fa09/readings/Durrant-Whyte\\_Bailey\\_SLAM-tutorial-I.pdf](https://people.eecs.berkeley.edu/~pabbeel/cs287-fa09/readings/Durrant-Whyte_Bailey_SLAM-tutorial-I.pdf)
- [30] Brewitt, H. (2019). *What is SLAM?*. GeoSLAM kodulehekül. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://GeoSLAM.com/blog-post/what-is-slam/>
- [31] Oleksuik, W., Sankey, E. (2014). *Comparison of Laser Scanner and Total Station Survey Methods: Analysis of Time and Accuracy for Building Modeling*. (Geomatics Project). Inglismaa. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://spatialtechnologies.ca/wp-content/uploads/2014/04/Final-Report-by-Will-Oleksuik-and-Eric-Sankey.pdf>
- [32] Bosse, M. Ja Zlot, R. (2009). *Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser*. International Conference of Robotics and Automation. Loetud 28.05.2019 aadressil [https://www.researchgate.net/publication/224557584\\_Continuous\\_3D\\_scan-matching\\_with\\_a\\_spinning\\_2D\\_laser](https://www.researchgate.net/publication/224557584_Continuous_3D_scan-matching_with_a_spinning_2D_laser)

- [33] Eesti Energia. (2016) *I kvartali vahearuanne*. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://docplayer.net/24129013-Vahearuanne-1-jaanuar-marts-eesti-energia-aulepa-tuulepark-noarootsis.html>
- [34] Markšeidermöödistuse täpsustatud nõuded ja kord. (2019). RT I, 07.05.2019, 5. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/107052019005>
- [35] (2016). *What is Geospatial SLAM?*. LiDAR Magazine. Vol 6 No 4. Loetud 28.05.2019 aadressil [http://lidarmag.com/wp-content/uploads/PDF/LIDARMagazine\\_Reid-GeospatialSLAM\\_Vol6No4.pdf](http://lidarmag.com/wp-content/uploads/PDF/LIDARMagazine_Reid-GeospatialSLAM_Vol6No4.pdf)

## 8 LISAD

### LISA 1. Töös kasutatud mõõteseadmete tehnilised andmed

Tabel 8.1. GeoSLAM ZEB-REVO, Faro Focus<sup>3D</sup> X330 ja Riegl VZ-400 tehnilised näitajad

Tehniline näitaja	GeoSLAM ZEB-REVO [21]	Faro Focus <sup>3D</sup> X330 [22]	Riegl VZ-400 [23]
Maksimaalne mõõteulatus	30 m optimaalsetes tingimustes 15-20 m tavaliselt	0,6 m kuni 330 m	1,5 m kuni 600 m
Mõõteulatus	270° / 360°	300° / 360°	60° + 40° = 100° kuni 360°
Skaneerimiskiirus (punkti sekundis)	100 joont sekundis 43 200 p/s	976 000 p/s	120 joont sekundis 122 000 p/s
Täpsus	± 30 mm	± 2 mm	± 3mm
Laseri ohutusklass	Laser Class 1	Laser Class 1	Laser Class 1
Laseri lainepikkus	905 nm	1550 nm	Infrapunakiirguse lähedane (750 nm – 1 nm)
Mõõtmistingimused	Temp 0° kuni 50° C Õhuniiskus kuni 85% RH	Temp 5° kuni 40° C	Temp 0° kuni 40° C Õhuniiskus kuni 80%
Kaal	2 kg	5,2 kg	9,6 kg
Mõõdud	Skaneerimispea 80x113x140 mm	240x200x100 mm	Ø180x308 mm
Aku vastupidavus	Keskmiselt 4 h	4,5 h	

LISA 2. Markšeidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid

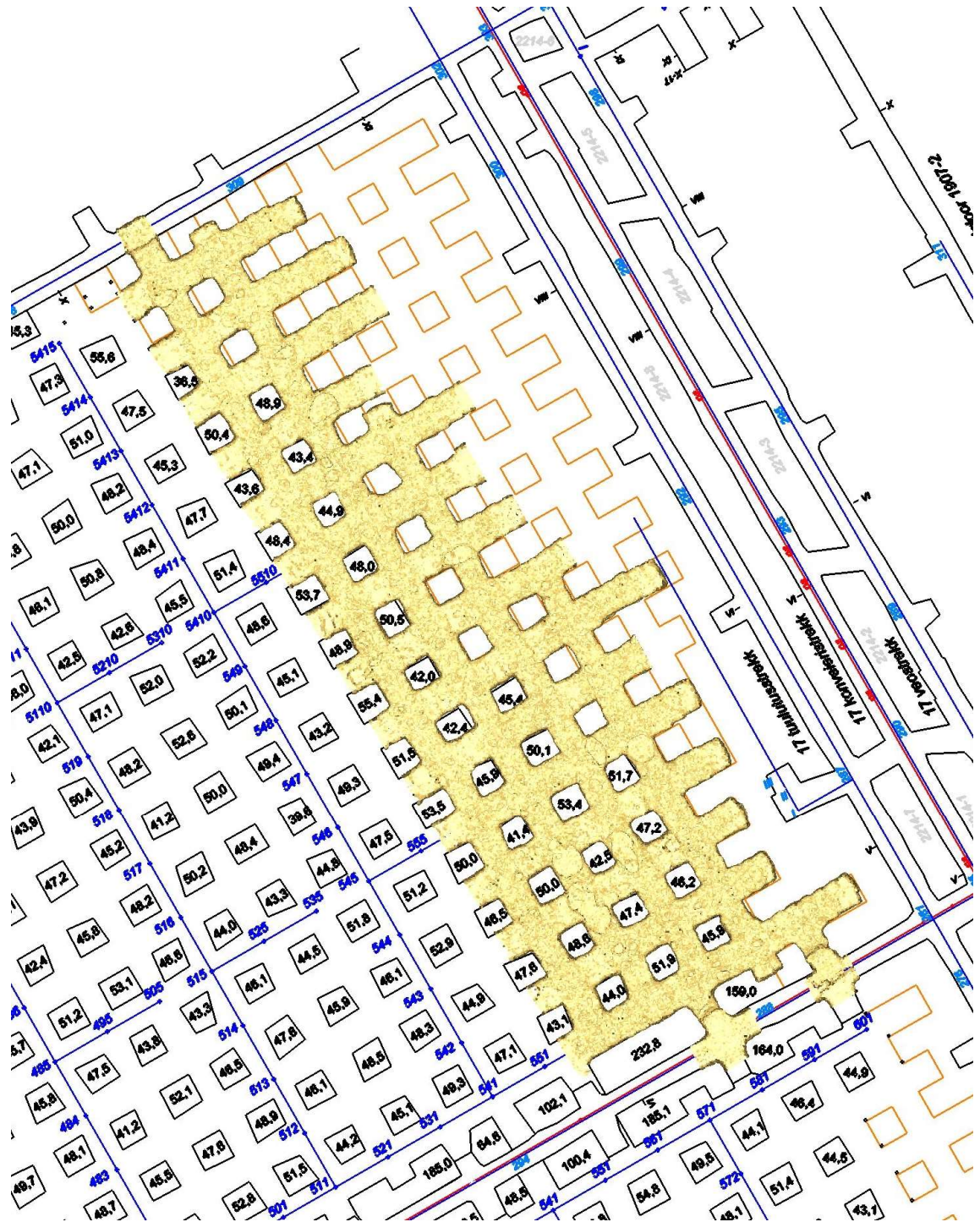
Tabel 8.2. Markšeidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid kambriplokis 1214

Punkti nr	X (m)	Y (m)	H (m)
1501	18353,4972	37334,1378	2,23
1504	18394,6206	37357,7216	2,25
1508	18449,4089	37389,1489	3,40
1512	18504,2761	37420,6076	2,32
1516	18559,0969	37452,0467	2,24
1321	18644,1085	37462,7259	2,01
1115	18578,2299	37386,9142	1,97
1801	18328,8831	37377,0578	2,48
1908	18416,5759	37446,4004	3,72

Tabel 8.3. Markšeidermõõdistusvõrgu punktide koordinaadid kambriplokis 1707

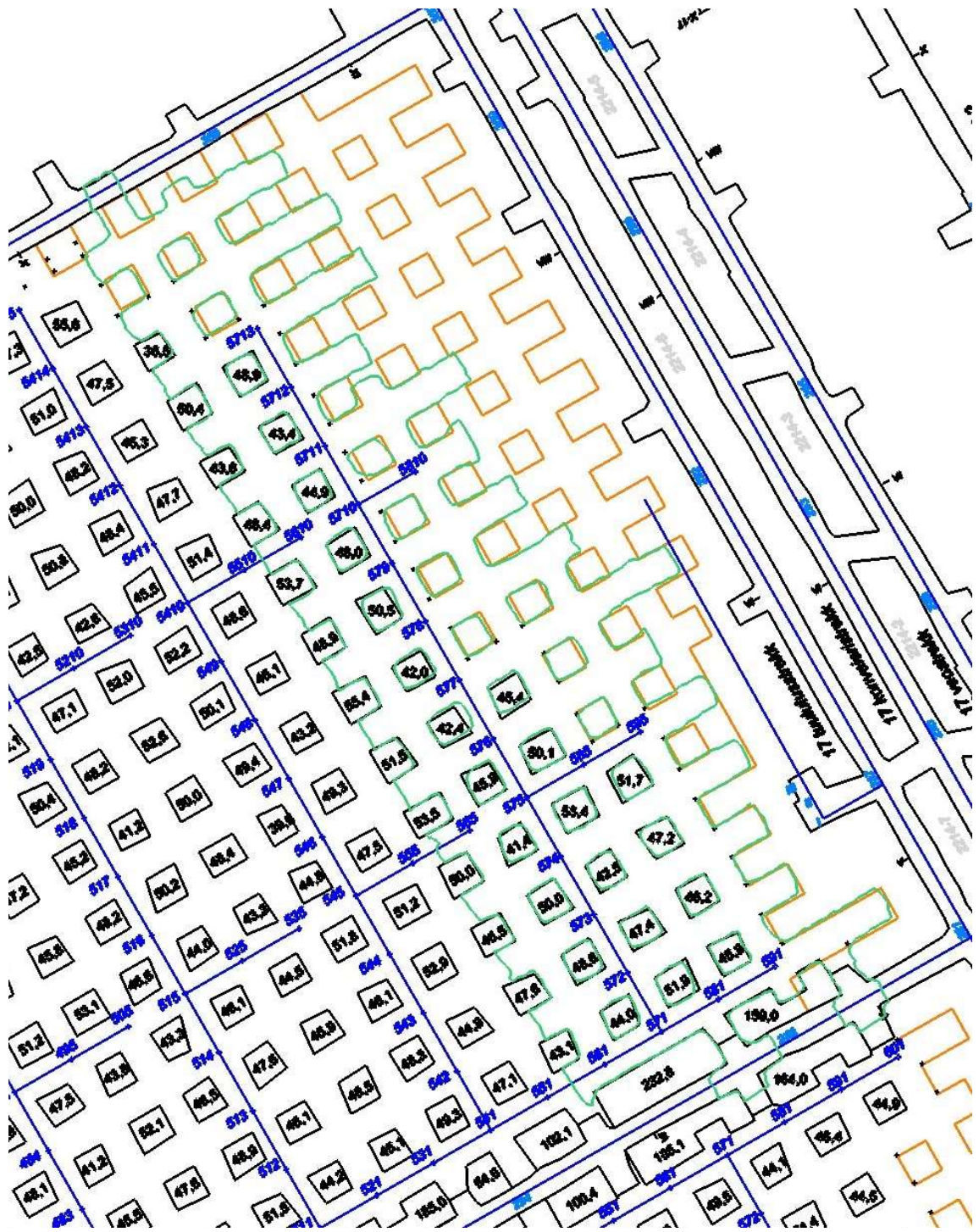
Punkti nr	X (m)	Y (m)	H (m)
Parem poolplokk			
5715	40916,06	28464,78	12,535
5810	40983,55	28441,67	12,535
571	41085,99	28367,06	12,535
601	41106,32	28402,42	12,535
Vasak poolplokk			
561	41104,75	28341,63	12,575
581	41118,31	28365,21	12,575
595	41173,66	28349,08	12,575
5610	41214,01	28278,80	12,575
5715	41281,51	28255,71	12,575
591	41125,10	28377,01	11,780

LISA 3. Kambriploki 1707 mõõdistatud ala punktivõrg kaevanduse plaaniga

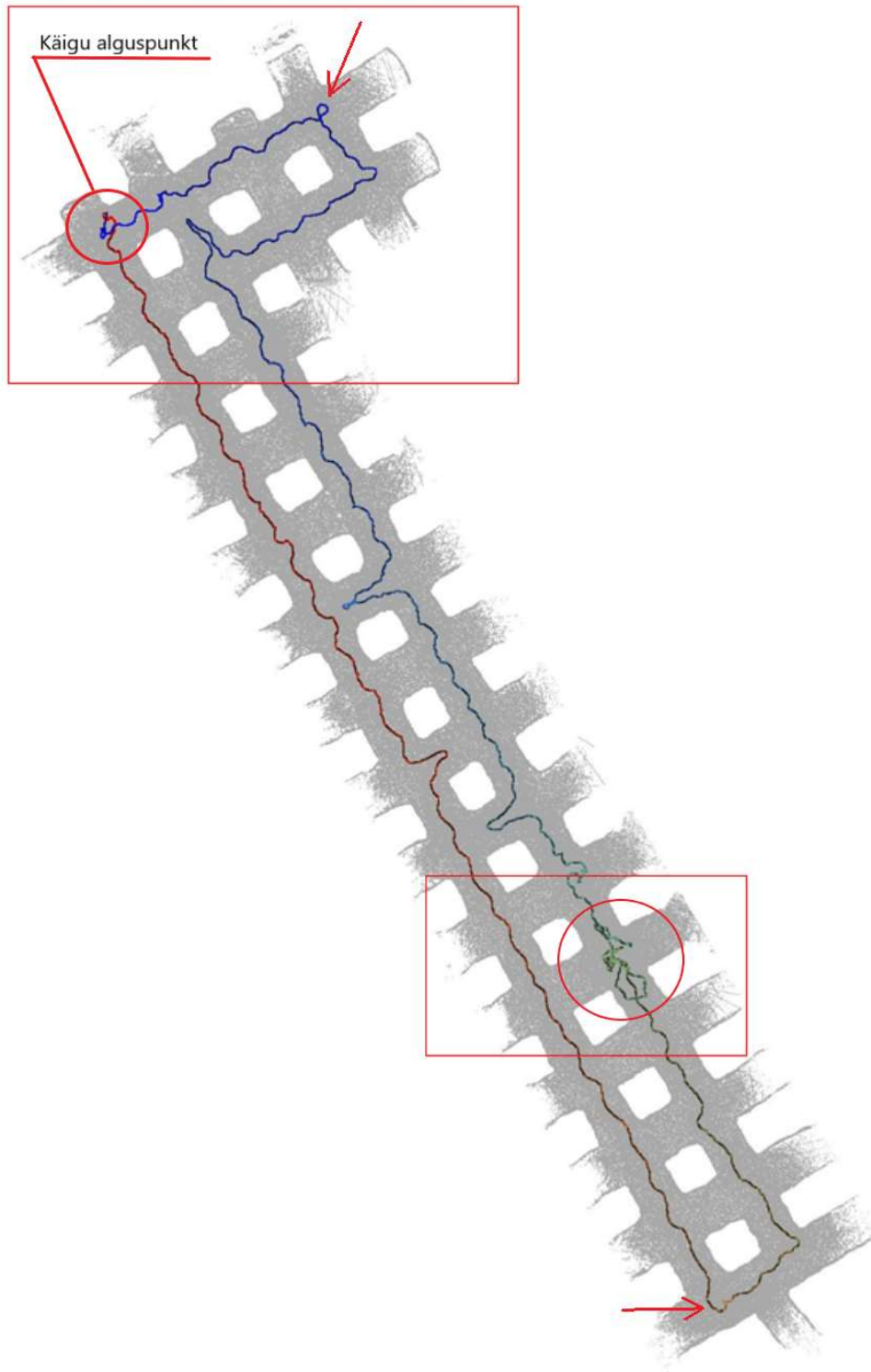


Joonis 8.1 Mõõdistatud ala punktivõrg kaevanduse andmete taustal. Oranžiga on tähistatud projekteeritud tervikud, mustaga moodustunud tervikud koos pindalaga, kollane toon on GeoSLAMiga mõõdistatud ala. Sinisega on tähistatud mõõdistusvõrgu punktide asukohad (vt Tabel 8.3).

LISA 4. Kambriploki 1707 punktivilvest tehtud lõige kaevanduse plaaniga



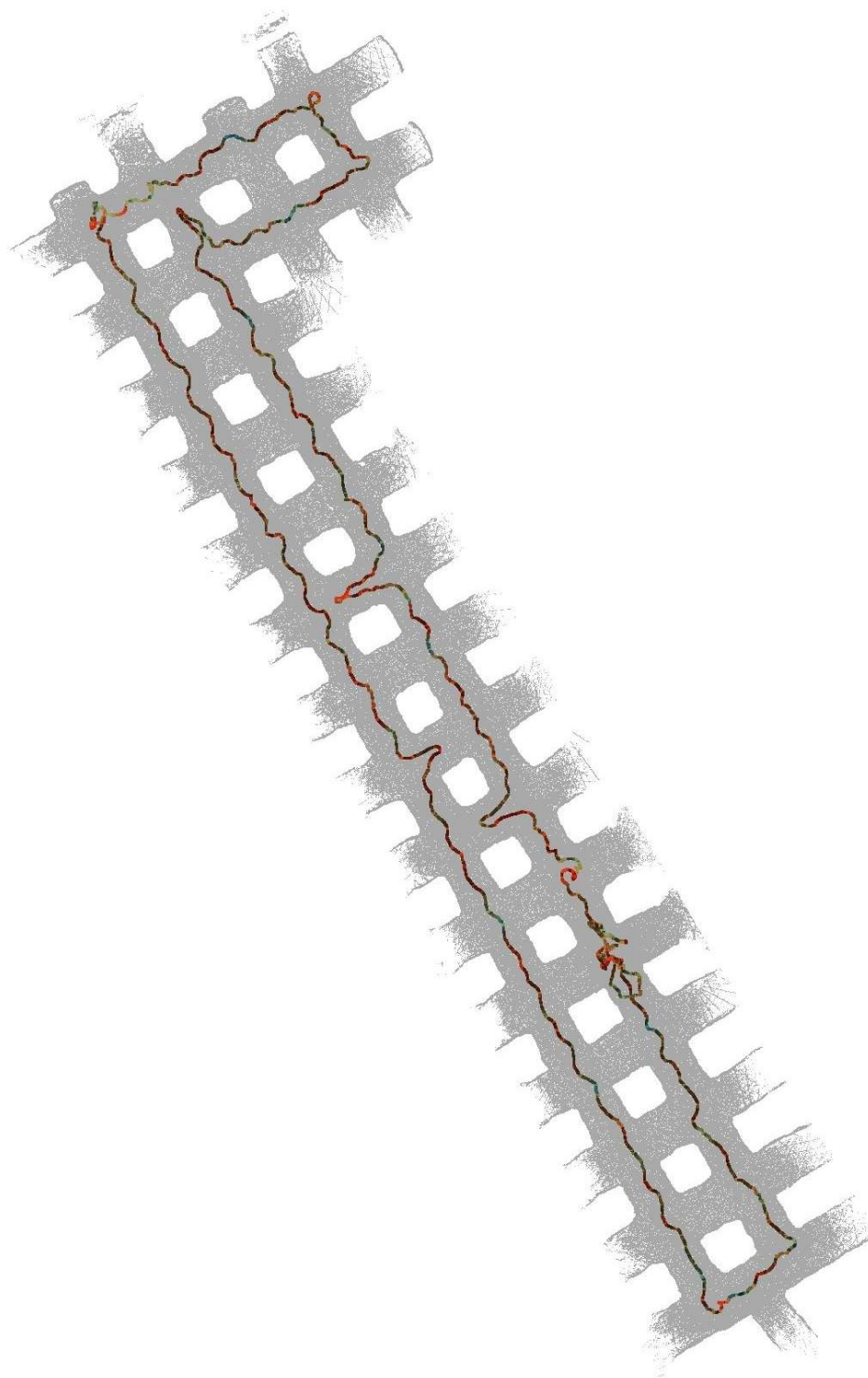
Joonis 8.2 GeoSLAM mõõdistuse lõige kaevanduse andmete taustal. Oranžiga on tähistatud projekteeritud tervikud, mustaga moodustunud tervikud koos pindalaga, roheline on GeoSLAMiga mõõdistatud ala.



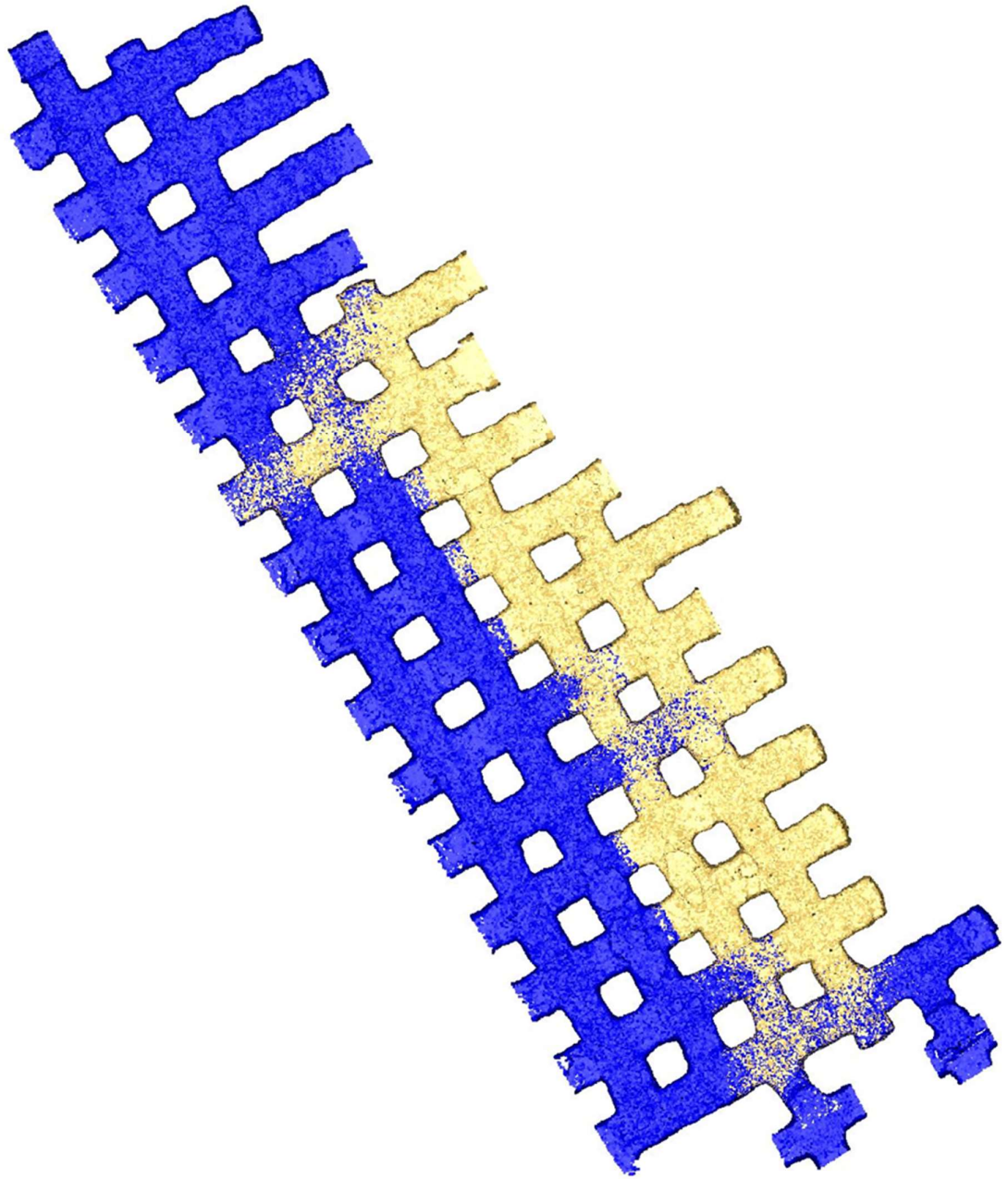
Joonis 8.3. Koos trajektooriga GeoSLAM punkt pilv. Toonid sinisest läbi vikerkaarevärvide punaseni näitavad liikumise suunda. Punased kastid näitavad väljavõtete asukohti.



LISA 6. GeoSLAM punkt pilv rgistreeringu tingimusi näitava trajektooriga



Joonis 8.4. GeoSLAM punkt pilv trajektooriga punkt pilve registreerimist näitavate värvitoonidega sinisest punaseni. Sinised toonid ütlevad, et registreeringu tingimused on head, punased näitavad kehvemaid tingimusi.



Joonis 8.5 Kahe erineva GeoSLAM punktipilve ühendamine. Kollase ja sinise punktipilve segunemine näitab järjestikuste moodsustusalade ülekattuvusi.

## LISA 8. Koordinaatide teisendamised

Tabel 8.4. Koordinaatide teisendused L-Est97 süsteemi erinevate Maa-ameti kalkulaatorite abil [25]. Kaevanduse poolt edastatud tulbas on kahe punkti koordinaadid L-Est97 süsteemis, kolmel teisendusel on võrreldud koordinaatide erinevusi saadetud koordinaatidega, parima sobivusega leiti Mäetaguse kalkulaator

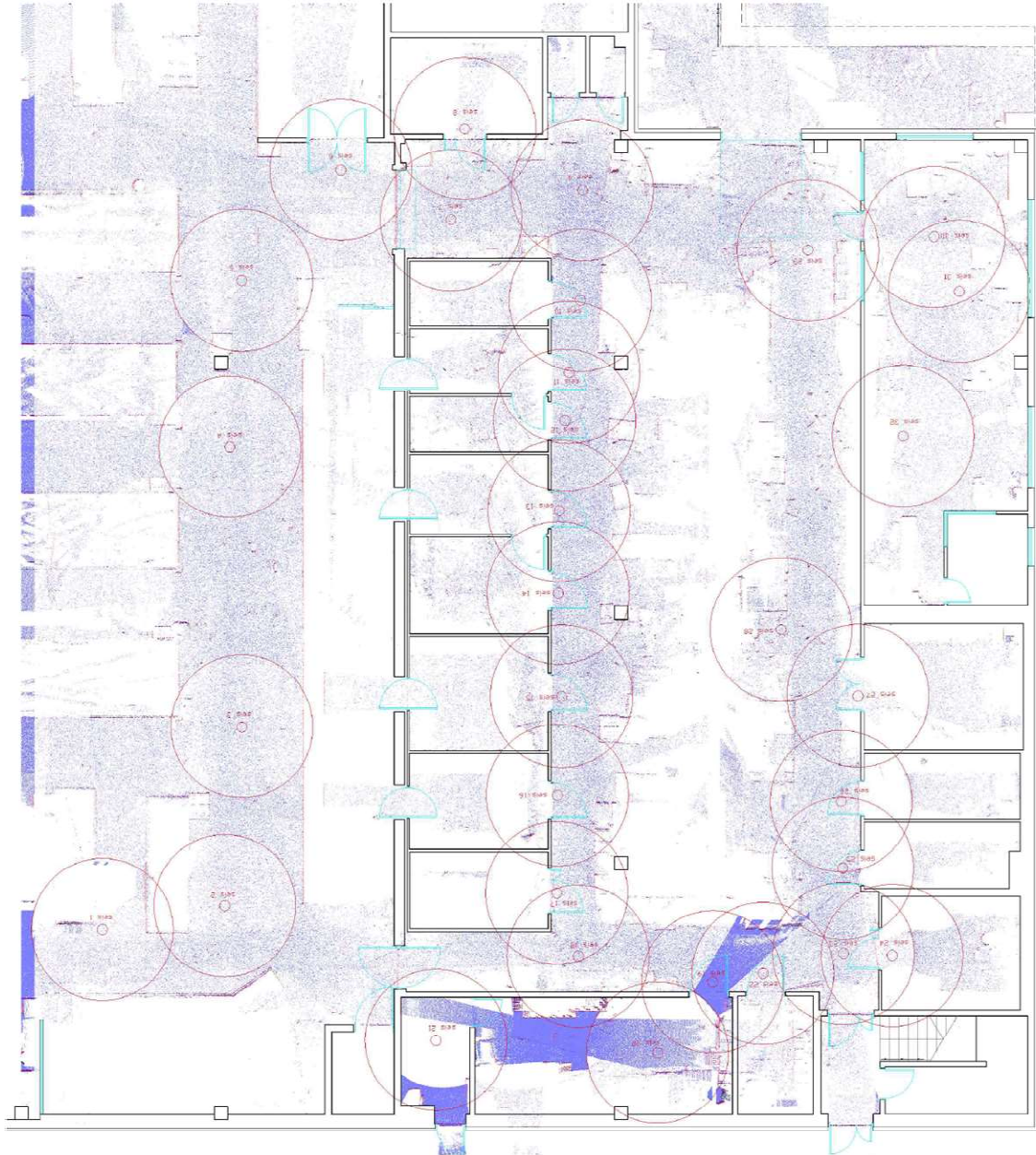
Punkti nr	Kohaliku koordinaadid		Kaevanduse poolt edastatud, L-Est97		Mäetaguse teisendus, L-Est97		Erinevus (m)		Kaevanduse (Eesti Põlevkivi 1973a) teisendus, L-Est97		Erinevus (m)		Jõhvi teisendus, L-Est97		Erinevus (m)	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)			X (m)	Y (m)			X (m)	Y (m)		
kambriplakk 1214																
1501	37334,138	18353,497			6569212,350	687475,150			6569211,683	687477,836			6569211,721	687475,603		
1504	37357,722	18394,621			6569237,747	687515,179			6569237,083	687517,864			6569237,121	687515,631		
1508	37389,149	18449,409			6569271,590	687568,509			6569270,931	687571,194			6569270,967	687568,961		
1512	37420,608	18504,276			6569305,467	687621,926			6569304,813	687624,600			6569304,848	687622,367		
1516	37452,047	18559,097			6569339,323	687675,277			6569338,674	687677,962			6569338,708	687675,728		
1321	37462,726	18644,109			6569353,788	687759,727			6569353,145	687762,413			6569353,178	687760,179		
1115	37386,914	18578,230			6569275,110	687697,300			6569274,461	687699,989			6569274,495	687697,755		
1801	37377,058	18328,883			6569254,128	687448,644			6569253,460	687451,326			6569253,499	687449,094		
1908	37446,400	18416,576			6569327,317	687533,152			6569326,658	687535,832			6569326,694	687533,600		
kambriplakk 1707																
PK140	41035,285	28505,008	6573363,283	697450,939	6573363,149	697451,155	<b>0,134</b>	<b>-0,216</b>	6573363,316	697453,918	<b>-0,033</b>	<b>-2,979</b>	6573363,163	697451,661	<b>0,120</b>	<b>-0,722</b>
PK155	41295,374	28355,477	6573616,424	697289,943	6573616,298	697290,158	<b>0,126</b>	<b>-0,215</b>	6573616,464	697292,898	<b>-0,040</b>	<b>-2,955</b>	6573616,311	697290,647	<b>0,113</b>	<b>-0,704</b>
parem poolplakk																
5715	40916,060	28464,780			6573242,247	697416,292			6573242,408	697419,062			6573242,256	697416,803		
5810	40983,550	28441,670			6573308,637	697390,191			6573308,798	697392,955			6573308,647	697390,698		
571	41085,990	28367,060			6573407,641	697311,081			6573407,801	697313,835			6573407,650	697311,581		
601	41106,320	28402,420			6573429,530	697345,497			6573429,693	697348,252			6573429,541	697345,997		
vasak poolplakk																
561	41104,750	28341,630			6573425,247	697284,838			6573425,405	697287,591			6573425,254	697285,337		
581	41118,310	28365,210			6573439,846	697307,789			6573440,007	697310,542			6573439,855	697308,287		
595	41173,660	28349,080			6573494,420	697289,203			6573494,582	697291,951			6573494,430	697289,698		
5610	41214,010	28278,800			6573531,591	697217,192			6573531,749	697219,935			6573531,598	697217,683		
5715	41281,510	28255,710			6573579,992	697191,111			6573598,150	697193,848			6573597,999	697191,597		
591	41125,100	28377,010			6573447,156	697319,264			6573447,318	697322,016			6573447,166	697319,762		

LISA 9. Maa-alune kaevandus maapealse situatsiooniga



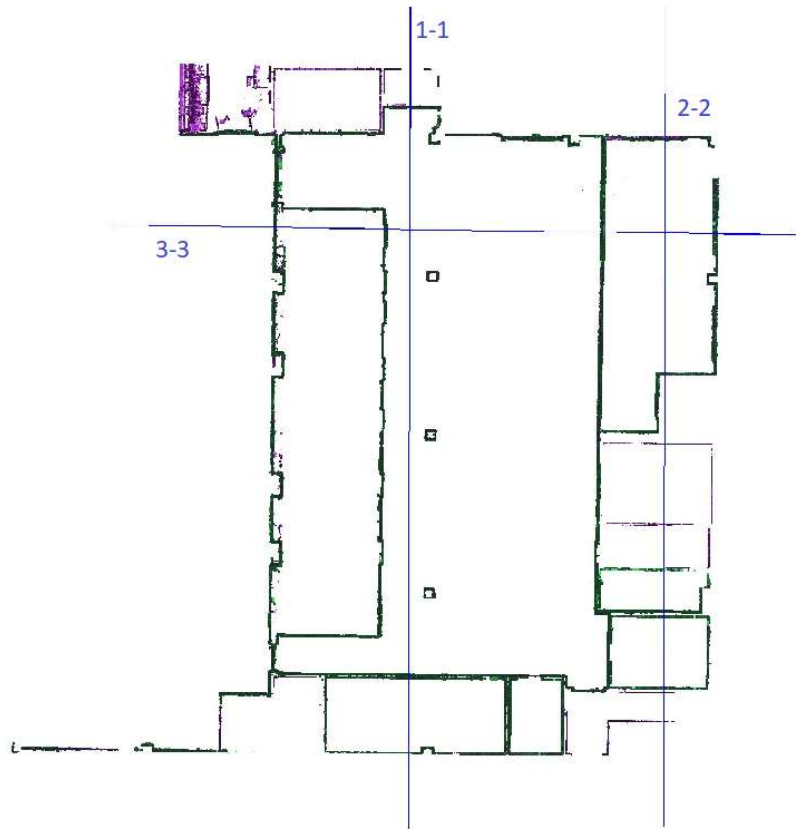
Joonis 8.6 Maa-aluse kaevanduse kambrite ja tervikute asukohta maapealsete objektide suhtes (mustaga kaevandatud osa, punasega edasiseks kaevandamiseks planeeritud osa). Ortofoto: Maa-amet 2019.

LISA 10. Riegl VZ-400 mõõdistatud punktipilv kaubanduskeskusest

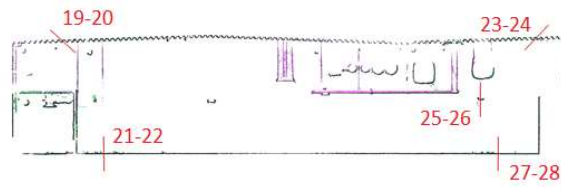


Joonis 8.7. Mõõdistatud ala laserskänneriga Riegl VZ-400. Punased ringid on skänneri seisukohad, alal kokku 32 seisu. Aluseks osa kaubanduskeskuse plaanist.

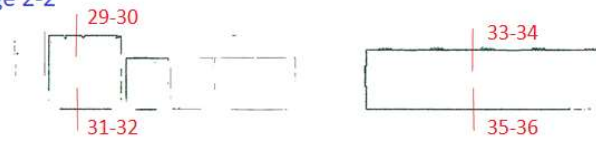
LISA 11. Kaubanduskeskuse skeem lõigete asukohtadega



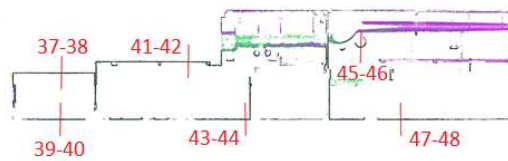
Lõige 1-1



Lõige 2-2



Lõige 3-3



Joonis 8.8. Skeemil plaan kolme lõikejoonega ja lõiked, kuhu on märgitud lagede ja põrandate lõikekohad.

LISA 12. Kaubanduskeskuse näitel punkt pilve hajuvuse analüüs

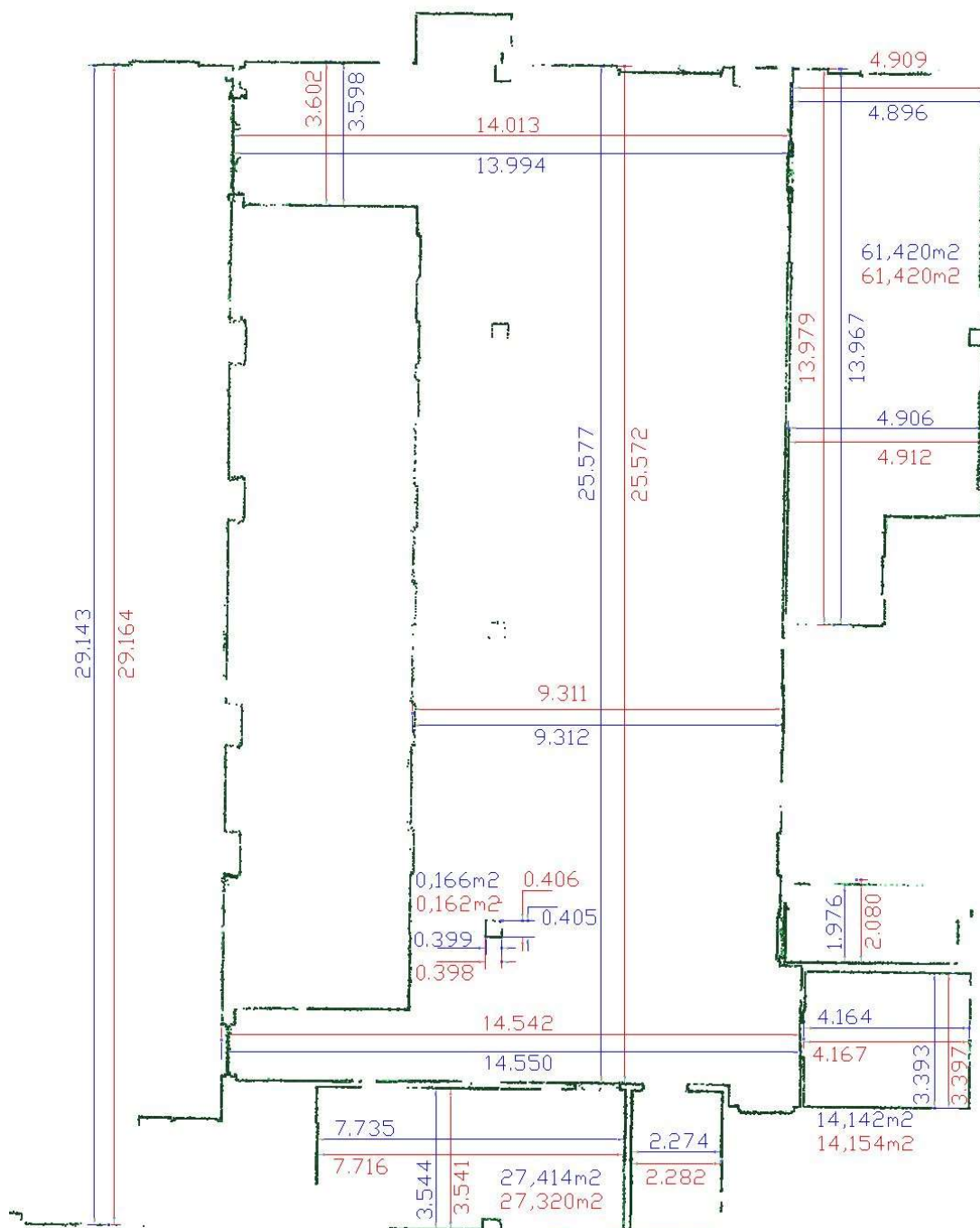
Tabel 8.5. Seina lõikes punkt pilve hajuvuse läbimõõt

Lõike asukoht	Riegl punkt pilve läbilõige (mm)	GeoSLAM punkt pilve läbilõige (mm)
1-2	5	26
3-4	6	18
5-6	8	33
7-8	4	21
9-10	5	21
11-12	5	31
13-14	6	27
15-16	3	23
17-18	7	35
<b>Keskmine</b>	<b>5,4</b>	<b>26,1</b>
<b>Miinum</b>	<b>3,0</b>	<b>18,0</b>
<b>Maksimum</b>	<b>8,0</b>	<b>35,0</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>1,5</b>	<b>5,9</b>
<b>Keskmine</b>	<b>5,4</b>	<b>26,1</b>
<b>Mediaan</b>	<b>5,0</b>	<b>26,0</b>

Tabel 8.6. Põrandate ja lagede lõikes punkt pilve hajuvuse läbimõõt

Lõike asukoht	Riegl punkt pilve läbilõige (mm)	GeoSLAM punkt pilve läbilõige (mm)
19-20	4	21
21-22	3	32
23-24	4	15
25-26	6	28
27-28	4	20
29-30	3	27
31-32	4	29
33-34	4	39
35-36	4	15
37-38	3	24
39-40	2	23
41-42	4	17
43-44	4	18
45-46	5	18
47-48	3	20
<b>Miinum</b>	<b>2,0</b>	<b>15,0</b>
<b>Maksimum</b>	<b>6,0</b>	<b>39,0</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,9</b>	<b>6,8</b>
<b>Keskmine</b>	<b>3,8</b>	<b>23,1</b>
<b>Mediaan</b>	<b>4,0</b>	<b>21,0</b>

LISA 13. ZEB-REVO võrdluse skeem referentsandmetega pikkuste ja pindalade osas



Joonis 8.9. Riegl VZ-400 ja GeoSLAM ZEB-REVO omavaheline võrdlus pikkuste ja pindalade osas. Punasega Riegl andmed, sinisega GeoSLAM andmed.

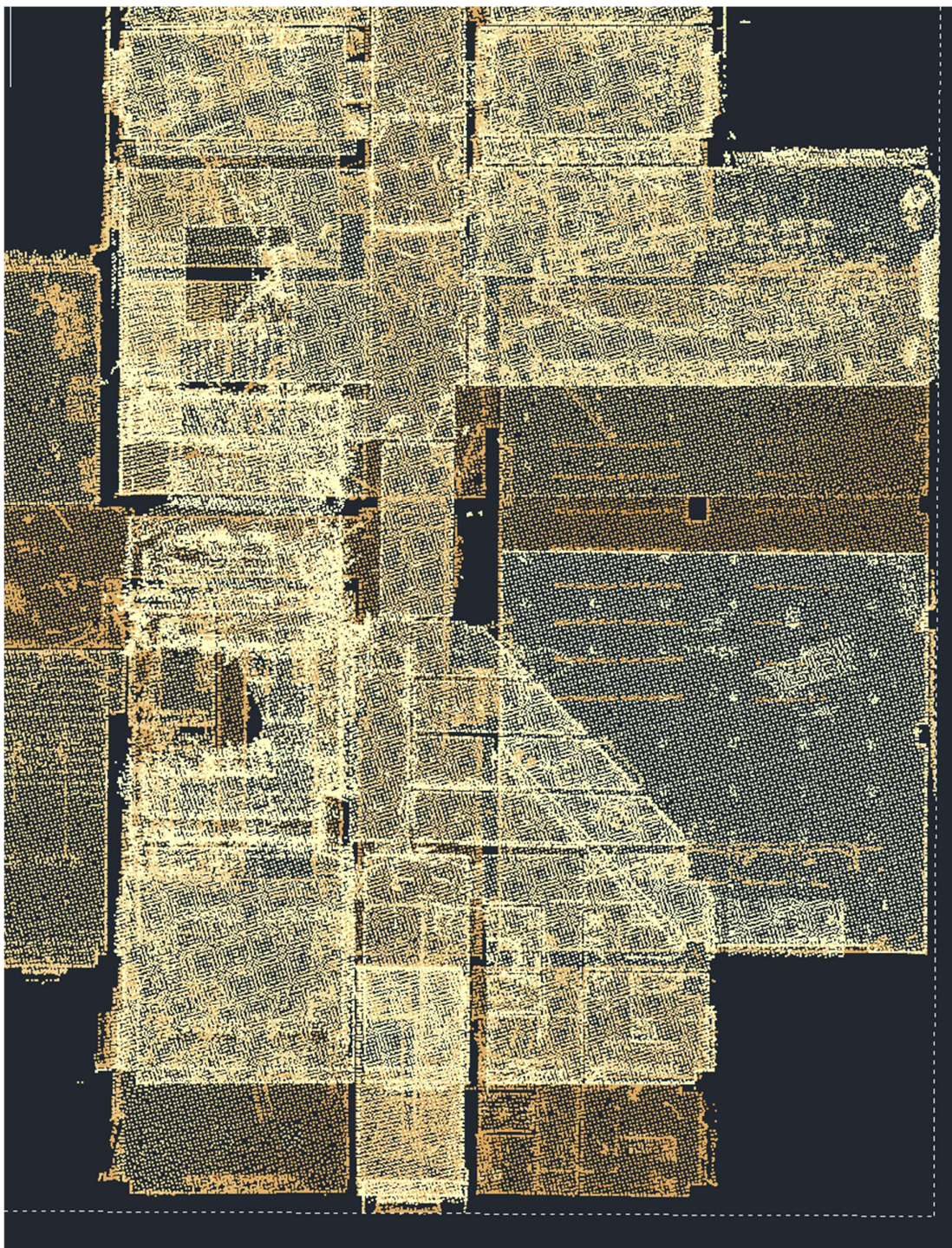


LISA 14. Kaubanduskeskuses võrreldud pikkused ja pindalad

Tabel 8.7. Kaubanduskeskuse ruumide andmed GeoSLAM REVO ja Riegl punkt pilvede põhjal

Mõõt	Riegl VZ-400 (m)	GeoSLAM REVO (m)	Erinevus (m)
<b>Pikkused</b>	0,398	0,399	-0,001
	0,406	0,405	0,001
	1,976	2,080	-0,104
	2,282	2,274	0,008
	3,397	3,393	0,004
	3,541	3,544	-0,003
	3,598	3,602	-0,004
	4,909	4,896	0,013
	4,167	4,164	0,003
	4,912	4,906	0,006
	7,716	7,735	-0,019
	9,311	9,312	-0,001
	13,979	13,967	0,012
	14,013	13,994	0,019
	14,542	14,550	-0,008
	25,572	25,577	-0,005
	29,164	29,143	0,021
<b>Minimaalne</b>	<b>0,398</b>	<b>0,399</b>	<b>-0,104</b>
<b>Maksimaalne</b>	<b>29,164</b>	<b>29,143</b>	<b>0,021</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>8,471</b>	<b>8,464</b>	<b>0,028</b>
<b>Keskmine</b>	<b>8,464</b>	<b>8,467</b>	<b>-0,003</b>
<b>Mediaan</b>	<b>4,909</b>	<b>4,896</b>	<b>0,001</b>
<b>Keskmine väärtus moodustab 0,04% Riegl tulemusest</b>			
<b>Kõrgused</b>	3,465	3,468	-0,003
	3,454	3,461	-0,007
	2,787	2,793	-0,006
	3,470	3,471	-0,001
	2,413	2,394	0,019
	2,802	2,793	0,009
	3,464	3,467	-0,003
<b>Minimaalne</b>	<b>2,413</b>	<b>2,394</b>	<b>-0,007</b>
<b>Maksimaalne</b>	<b>3,470</b>	<b>3,471</b>	<b>0,019</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>0,444</b>	<b>0,451</b>	<b>0,010</b>
<b>Keskmine</b>	<b>3,122</b>	<b>3,121</b>	<b>0,001</b>
<b>Mediaan</b>	<b>3,454</b>	<b>3,461</b>	<b>-0,003</b>
<b>Keskmine väärtus moodustab 0,03% Riegl tulemusest</b>			
	<b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>
<b>Pindala</b>	0,406	0,405	0,001
	14,154	14,142	0,012
	27,320	27,414	-0,094
	61,420	61,420	0,0
<b>Minimaalne</b>	<b>0,406</b>	<b>0,405</b>	<b>-0,094</b>
<b>Maksimaalne</b>	<b>61,420</b>	<b>61,420</b>	<b>0,012</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>26,151</b>	<b>26,155</b>	<b>0,050</b>
<b>Keskmine</b>	<b>25,825</b>	<b>25,845</b>	<b>-0,020</b>
<b>Mediaan</b>	<b>20,737</b>	<b>20,778</b>	<b>0,000</b>
<b>Keskmine väärtus moodustab 0,08% Riegl tulemusest</b>			

LISA 15. Faro punktipilv Maa-ameti hoone teise ja kolmanda korruse kohta



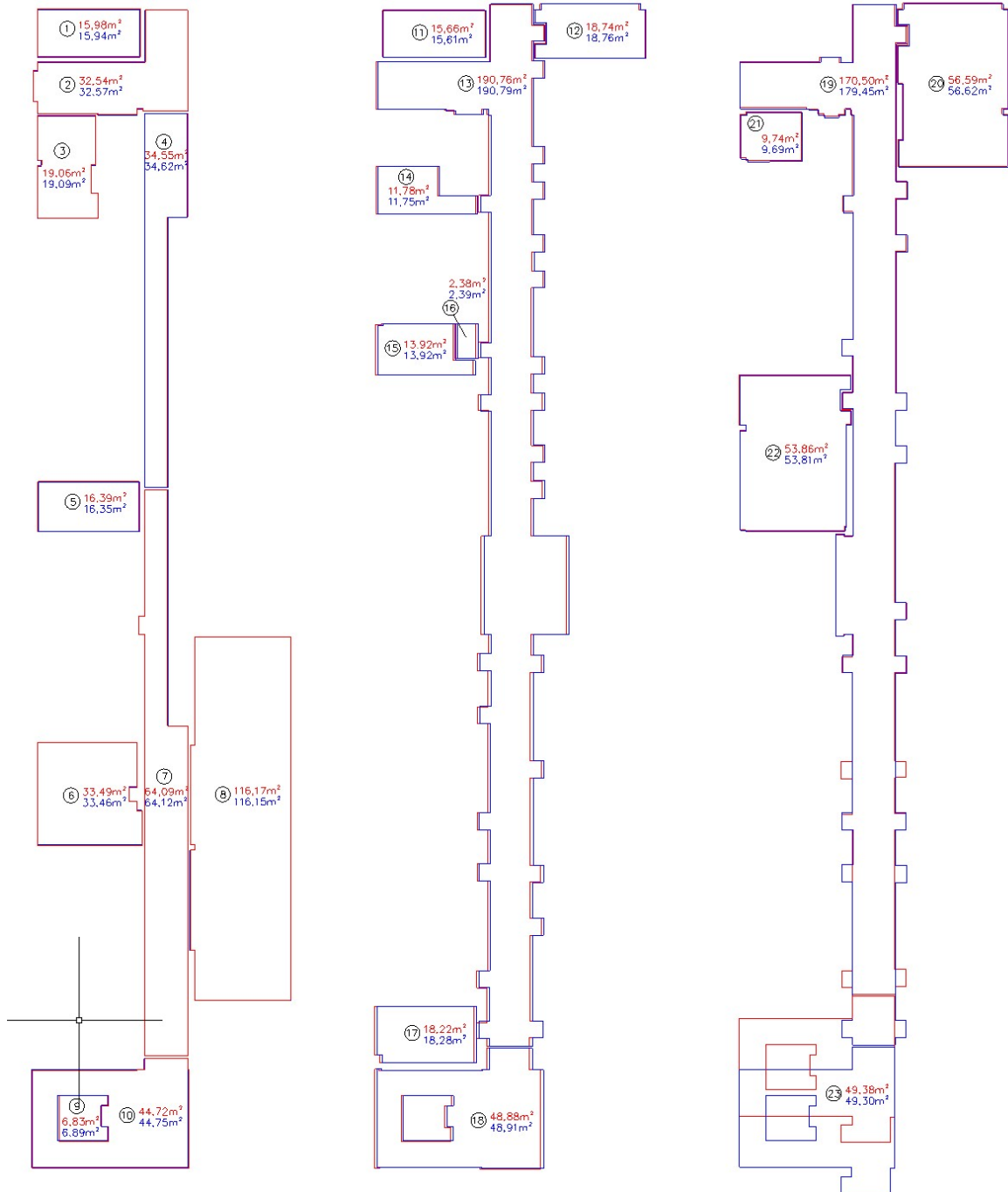
Joonis 8.10. Faro punktipilve teine ja kolmas korrus kohakuti, heledam osa kujutab kolmandat korrust, mis on teisest korrusest lühem ja nihkes

LISA 16. Maa-ameti hoone Faro ja GeoSLAM punkt pilve kohakuti kolmanda korruse osas



Joonis 8.11. Punaste toonidega GeoSLAM punkt pilve Faro punkt pilve kohal kolmandal korrusel. Nihe pilvede vahel on 2,9 m, erinevus tekib pika koridori keskosas

LISA 17. Maa-ameti hoone joonestatud plaanid pindaladega



Joonis 8.12. Maa-ameti hoone plaanid ruumide kontuuride ja pindaladega, punasega tähistatud referentsandmed, sinisega käsiskänneri andmed

## LISA 18. Maa-ameti hoone ruumide pindalad

Tabel 8.8. Maa-ameti hoone ruumide pindalad kolme korruse lõikes, ruumide numbrid on Joonis 8.12 alusel

Ruumi nr	Faro pindala (m <sup>2</sup> )	GeoSLAM pindala (m <sup>2</sup> )	Erinevus (m <sup>2</sup> )
1	15,98	15,94	0,04
2	32,54	32,57	-0,03
3	19,06	19,09	-0,03
4	34,55	34,62	-0,07
5	16,39	16,35	0,04
6	33,49	33,46	0,03
7	64,09	64,12	-0,03
8	116,17	116,15	0,02
9	6,83	6,89	-0,06
10	44,72	44,75	-0,03
11	15,66	15,61	0,05
12	18,74	18,76	-0,02
13	190,76	190,79	-0,03
14	11,78	11,75	0,03
15	13,92	13,92	0,00
16	2,38	2,39	-0,01
17	18,22	18,28	-0,06
18	48,88	48,91	-0,03
19	170,50	179,45	-8,95
20	56,59	56,62	-0,03
21	9,74	9,69	0,05
22	53,86	53,81	0,05
23	49,38	49,30	0,08
<b>Minimaalne</b>	<b>2,38</b>	<b>2,39</b>	<b>-0,07</b>
<b>Maksimaalne</b>	<b>190,76</b>	<b>190,79</b>	<b>0,08</b>
<b>Standardhälve</b>	<b>42,48</b>	<b>42,48</b>	<b>0,04</b>
<b>Keskmine</b>	<b>39,72</b>	<b>39,72</b>	<b>0,00</b>
<b>Mediaan</b>	<b>25,80</b>	<b>25,83</b>	<b>-0,02</b>
<b>Summa</b>	<b>873,73</b>	<b>873,77</b>	<b>-0,04</b>
<b>Erinevus referentsandmetest 0,004 %</b>			

Märkus: Ruum 19 jääb statistilistest arvutustest välja, kuna Faro punktipilves on ruum valesti kokku arvatud ja tekkinud pindala vale väärtusega

## LISA 19. Juhend 3D Reshaperis maa-aluse kaevandamise jaoks vajalike andmete saamiseks

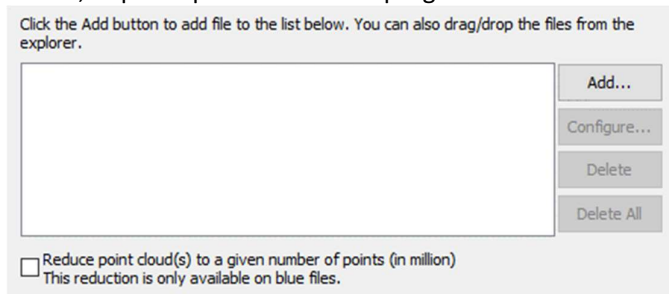
1. Ava ikoon:



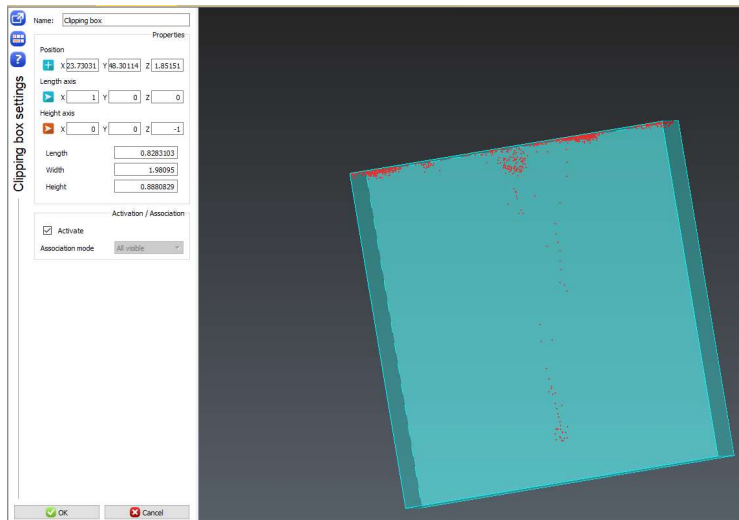
2. Impordi töö programmi **File Menu -> Import -> Import Cloud(s)**:



3. **Add** nupuga lisada vajalik punkt pilv (nt laiendiga *.laz*) ja vajutada **OK**. Väljal *Reduce point cloud(s) to a given number of points (in million)* peaks linnukese ära võtma, et punkt pilved avaneksid programmis maksimaalses mahus:

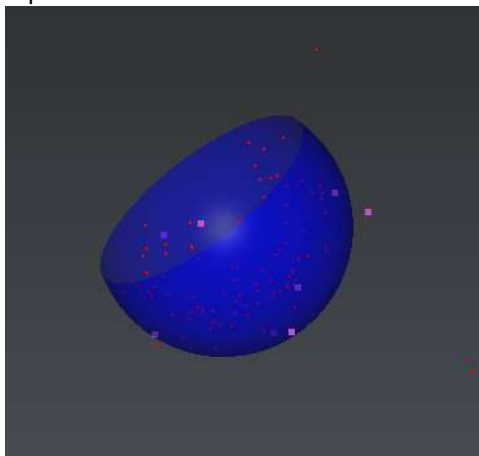


4. Programmis olev punkt pilv on suvalises koordinaatide süsteemis, seega tuleks punkt pilv koordineerida. Mõõtmiste ajal paigaldati koordineeritud punktidesse sfäärilised tähised, need tähised tuleb punkt pilves üles otsida ja koordineeritud punktide järgi paika seada. Kõige lihtsam on tähiste leidmiseks kasutada punkt pilve lõikamist vajaliku koha peal ja asetada sfäär tähise asukohale. Punkt pilve lõikamiseks valida **View -> Clipping box**. Selle abil saab välja otsida tähise asukohta:



Kui tekkiv pilt on sobiv, valida **OK**. Sfääriline tähis peab mingis osas näha olema (helerohelise kasti sees).

Seejärel lisada tähise asukohta sfäär. Valida **Construct** -> **Sphere** -> **Draw**. Edasi vajutada punktipilves sfäärilise keha moodustavatele punktidele, mida rohkem punkte, seda täpsem sfäär tekib:

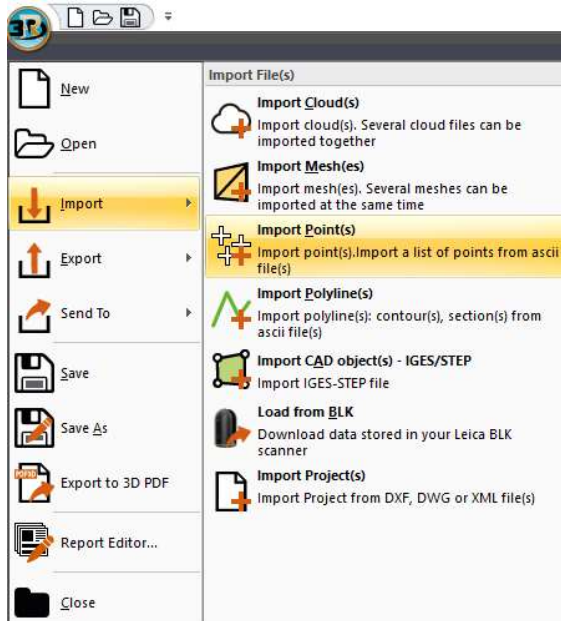


Sfäärile saab ette anda ka läbimõõdu. Kui tekkiv pilt on sobiv, siis käsu kinnitamiseks valida **OK**, **Exit**. Sfääri nimetuse saab topeltklõpsuga enesele sobilikuks muuta. Määrata samal meetodil kõikide tähiste asukohad.

5. Koordineeritud punktid võib ükshaaval programmi sisestada või importida. Vaatame mõlemat meetodit.

Punktide käsitsi sisestamiseks valida **Construct** -> **Point**. Tekkivas menüüreas valida ikoon **XYZ** ja sisestada väljale punkti koordinaadid. Kui kõik punktid on sisestatud, vajutada **End**. Punktid on ekraanil nähtavad. Vasakul menüüribal on **Geometric Group** all punktid, nime muutmiseks vajutada topeltklõps nimel ja sisestada vajalik number või tekst.

Programmi importimisel valida **File Menu** -> **Import** -> **Import Point(s)**:

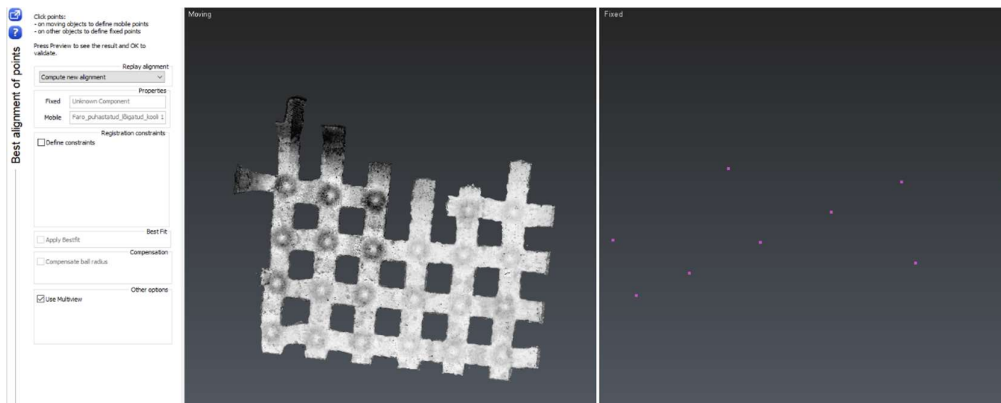


Valida punktide fail ja vajutada **Open**. Avanevas aknas on näha punktid koordinaatidega, siin tuleb paika seada õiged parameetrid olenevalt sellest, mis kujul on etteantud punktide fail. Kui etteantud fail oli .txt formaadis, kus tühikutega eraldatud punkti nimi, x koordinaat, y koordinaat ja kõrgus, siis on valikud alljärgnevad:

Name	X coordinate	Y coordinate	Z coordinate
1501	18353,4972	37334,1378	2,23
1504	18394,6206	37357,7216	2,25
1508	18449,4089	37389,1489	3,40
1512	18504,2761	37420,6076	2,32
1516	18559,0969	37452,0467	2,24
1321	18644,1085	37462,7259	2,01
1115	18578,2299	37386,9142	1,97
1801	18328,8831	37377,0578	2,48
1908	18416,5759	37446,4004	3,72

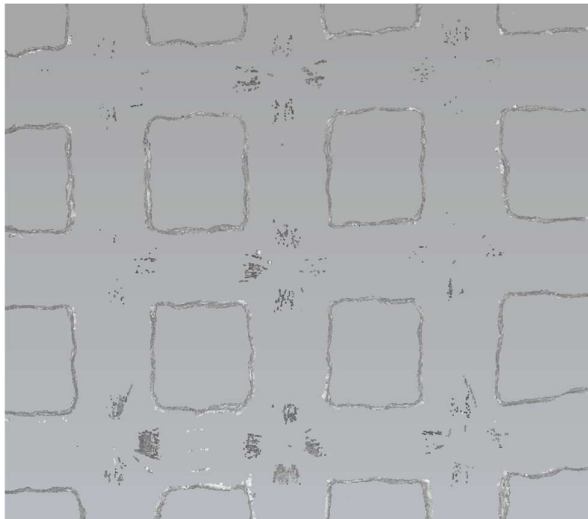
- Nüüd on programmis olemas koordinaatidega punktid ja punkt pilv koos sfääridega. Lõigata punkt pilv nii, et sfäärid oleksid nähtaval (*Clipping Box*). Koordineerimiseks teha punkt pilv sfääridega aktiivseks ja valida **Transform** -> **Best align N points**. Nähtavad peavad olema nii punkt pilv kui ka punktid, millega tahetakse koordineerida. Avanev aken võiks olla midagi taolist nagu alljärgnev väljavõte: vasakul on punkt pilv (*Moving*) ja paremal punktid (*Fixed*).



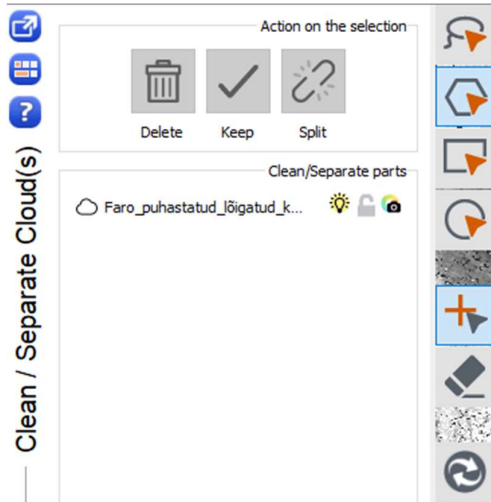


lkoonidest peaks olema aktiivne **Middle/Center** sfääri asukohta määramiseks. Edasi tuleks valida punktipaarid: valida järgemööda mõlemas aknas punktid, mida tahetakse kokku panna (punkte võib olla täpselt niipalju, kui vajalik on, ent vähemalt kolm). Kui punktid on ühildatud, tekivad punktidele samad numbrid nii ühes kui ka teises aknas. Eelvaate jaoks vajutada **Preview**, see näitab, kuidas punkt pilv punktidele asetati (saab ka hülbed teada), kui kõik on korras, vajutada **OK**. Võib juhtuda, et **Preview** ei näita enam punkt pilve, sel juhul vajutada **OK** ja kustutada **Clipping Box**. Kui punkt pilv ei ole õiges kohas, korrata tegevust uuesti.

7. Edasi oleks vaja punkt pilv puhastada. Selleks muuta punkt pilv aktiivseks ja valida **View -> Clipping box**, punkt pilve ümber tekib kast, mille suurus saab modifitseerida. Punkt pilve puhastamiseks on kõige lihtsam meetod nõ eemaldada lagi ja põrand ning puhastada tervikute vahele jäävad alad. Kui ala on valitud, vajutada **OK**. Avaneb ligikaudu järgmine vaade:

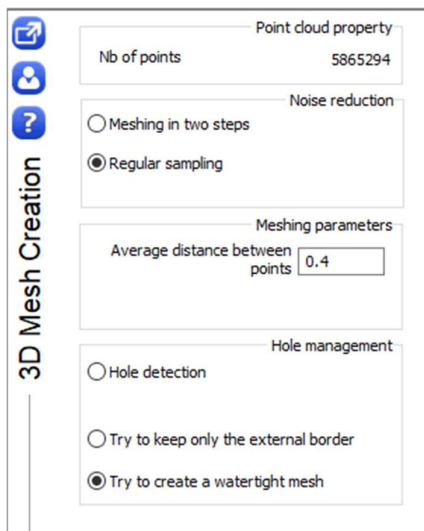


Puhastamiseks teha punkt pilv taaskord aktiivseks (kui punkt pilv ei ole valitav, võib Clipping Box vaate vasakul oleval menüüribal mittednähtavaks muuta vajutades lambipirnilt) ja valida **Cloud -> Clean/Separate**:



Avanevas aknas teha aktiivseks ülevalt teine ikoon **Polyline tool**, sellega saab märkida ala, mida soovitakse kustutada. Kui kustutatavad punktid on valitud, vajutada **Delete** ikoonil ja punktid kustuvad (kiirkäsuna **Ctrl+Delete**). Niimoodi eemaldada kõik ebavajalikud punktid punktipilvest. Kui vajalikud punktid on eemaldatud, vajutada **OK**. Panna tähele, et üleliigseid punkte võib olla ka nõ põrandast madalamal, laest kõrgemal või seintest väljaspool, mis on tekkinud erinevatel põhjustel (nt vee peegeldused), ja mille peaks samamoodi eemaldama. Puhtam punktipilv annab paremaid tulemusi nii lõike tegemisel kui ka mahu arvutamisel.

- Edasi teha punktipilvest 3D pind **Mesh**. Selleks teha punktipilv aktiivseks ja valida **Mesh** -> **3D Mesh**:



Ruumala arvutamise jaoks peab tekkiv pind olema ühtne, st ilma aukude ja avadeta tihe pind. **Preview** abil saab vaadata tekkiva pinna eelvaadet. Tõenäoliselt on mõned avad, aga kui üldjoontes on pind ühtlane, võib vajutada **OK**.

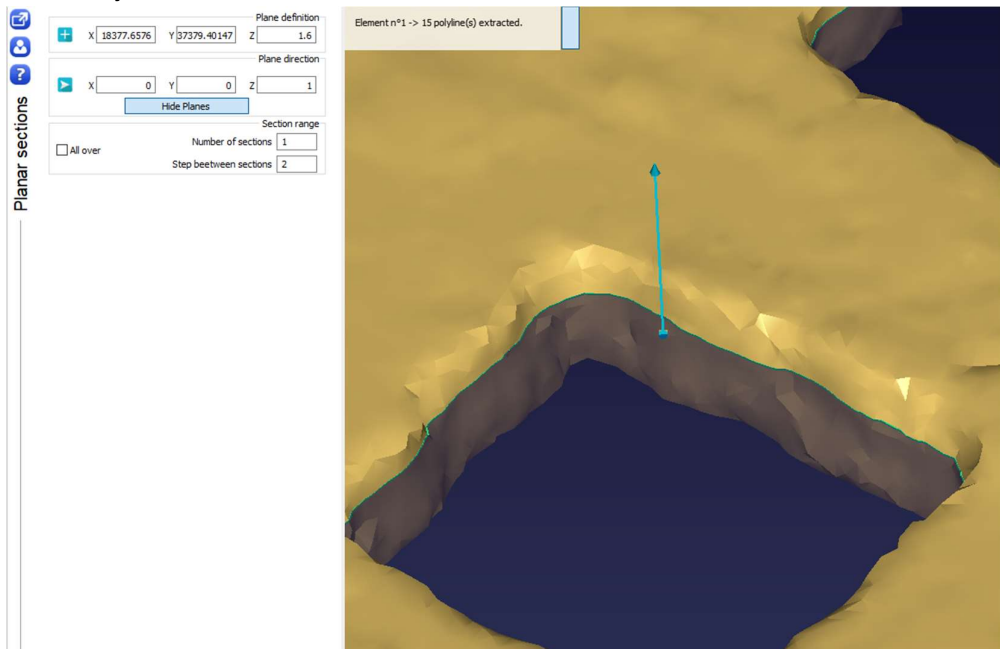
- Kui pinnal on näha avasid, tuleks need avad täita. Kui avad on väga suured, siis peaks alget punktipilve niipalju korrigeerima, et punktipilves endas ei oleks näha liiga suuri nõ tühje auke, kohti, kus skanner ei möötnud. Väiksemate avade täitmiseks teha pind aktiivseks ja valida **Mesh** -> **Fill holes**:



Siin vajutada **Select all**, mis valib kõik avad automaatselt välja. Seejärel valida **OK**. Nüüd tekkinud pind peaks olema tihe ilma avadeta pind.

10. Kui on tekkinud tihe pind, saab arvutada ala mahu. Selleks teha pind aktiivseks ja valida **Measure** -> **Volume** -> **Volume**. Valides **Preview**, saab näha ala mahtu, vajutades **OK**, kuvatakse ala maht ka ekraanile.

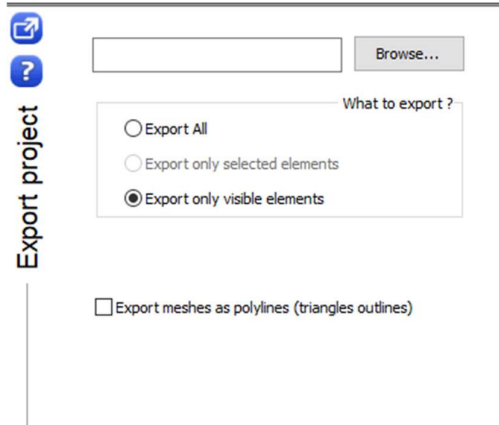
11. Edasi tuleks teha lõige etteantud kõrgusele. Lõike tegemiseks teha pind aktiivseks ja valida **Polyline** -> **Planar Sections**:



Kui nõ maapind on x-telje suunas sirge, siis on kõige parem lõike tegemiseks määrata nõ alguspunkt punktipilve keskele. Selleks vajutada tähisele **+** ja tekkinud menüüs ikoon **Point on selection**. Seejärel vajutada punktipilvel keskele maapinnale. Kui lõiget tahetakse teha kõrgusele 1.6m, siis sisestada Z koordinaadiks 1.6. Lõige tuleb paralleelselt alusega, kui *Plane direction* väljal on z-koordinaadi kohal 1, teistel 0. *Show Planes* kuvab ekraanile

lõike pinna. Kui tahetakse ühte lõiget, määrata *Number of Sections* 1. Valikute kinnitamiseks valida **OK, exit**, misjärel tekib ekraanile pinna lõige. Ainult lõike nägemiseks vajutada pind mitternähtavaks (vasakul menüüs vajutada pinna järel olevale lambile).

12. Lõike salvestamiseks *.dxf* formaadis jätta ekraanile ainult lõike pind, valida **3D** all **Export** -> **Export Project in DXF file**:



**Browse** abil valida salvestuskoht, **Export only visible elements** salvestab ainult lõike, mis on ekraanil avatud. Kinnitamiseks vajutada **OK**. Seejärel saab lõike avada nt AutoCAD programmis.