

Siseruumide ja allmaakaevõõnte ruumikuju määramine mobiilse laserskaneerimisega

Kaia Malberg – REIB, kaia.malberg@reib.ee

Sissejuhatus

Mobiilne laserskaneerimine on mõõdistusmeetod, kus instrument on kinnitatud liikuvale platvormile ning sõiduki asukoht määratakse igal liikumise hetkel GNSS (*Global Navigation Satellite System*) signaali ja IMU (*Inertial Measurement Unit*) seadme abil. Liikuvad platvormid võivad olla erinevad, alustades autodest, laevadest ja lennukitest ning lõpetades inimese endaga. Välistingimustes kasutatakse sellist mõõdistusviisi erinevatel geodeetilistel töödel juba laialdaselt, ent sisetingsimustes, kus GNSS-signaal ei levi, on mobiilne laserskaneerimine alles algstaadiumis.

Siseruumides kasutatakse laserskannereid põhiliselt *stop-and-go* meetodil, kus skaneerimiseks peab aeg-ajalt seisma jääma. Tulemustest saadakse täpne punktipilv, mis on aluseks kolmemõõtmeliste mudelitele ja BIM (*Building Information Modeling*) tehnoloogial põhinevatele projektidele, ent töö on küllaltki ajamahukas. Austraalias asuva North-parkes'i kaevanduse täpse 3D-mudeli genereerimiseks ehitasid CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) teadlased 2011. aastal SLAM (*Simultaneous Location And Mapping*) algoritmil põhineva laserskanneri, millega sõideti läbi ja mõõdistati 17,1 km pikkune tunnel vähem kui kahe tunniga. Kaevanduse mõõdistamise järel analüüsiti tulemusi ja seadme funktsionaalsust ning instrumenti täiendati, et see oleks lihtsam ja kompaktsem edasisteks mõõdistustöödeks. Pika arendustöö tulemusena valmis Inglismaal paikneval GeoSLAMi ettevõtte esimene mobiilne käeshoitav laserskanner ZEB1, mis ei vajanud asukoha positsioneerimiseks GNSS-vastuvõtjat. 2015. aastal toodi välja uus versioon, ZEB-REVO, ning igal aastal on seadet uute versioonide ning tarkvaradega parandanud ja täiendanud.

Eesti kaevandustes ei ole laserskannerid geodeetiliste instrumentidena kasutusel olnud, kuna seadus ei ole neid lubanud. Sellel aastal seadusandlust muudeti, 03.05.2019 võeti vastu uus määrus „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“. 2018. aasta novembri lõpus ja 2019. aasta veebruari lõpus osales töö autor projekti „Markšeideritööde kaugseiremeetodite abil efektiivistamise võimaluste rakendusuuring“ [1] raames Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudi mäeosakonnaga geodeesia uurimiserühma koosseisus Estonia kaevanduse katsetöödel, mille eesmärk oli uute sobivate mõõdistustehnoloogiate leidmine ja juurutamine Enefiti kaevandustes. Üheks katsetatavaks seadmeks oli OÜ-le Hades Geodeesia kuuluv käsiskanner ZEB-REVO. Jalutaja kõnnikiirusel 3D-punktipilve kogumine on mugav ja kiire viis siseruumide mõõdistamiseks, sealhulgas allmaakaevanduse käikude jaoks.

Käesolev artikkel põhineb autori 2019. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud magistritööl „Siseruumide ja allmaakaevõõnte ruumikuju määramine mobiilse laserska-

neerimisega“ [2], mille juhendajaks oli professor Artu Ellmann. Töös analüüsitakse tootmise efektiivistamise ja täpsuse suurendamise eesmärgil laserkaugusmõõtjate asemel GeoSLAM ZEB-REVO sobivust maa-alusteks mõõdistustöödeks ning uuritakse seadme kõlblikkust ka hoonete inventariseerimisjooniste koostamiseks. Analüüsi tegemiseks kasutati tarkvaraprogrammi 3D Reshaper ja mõnel juhul abistavalt AutoCadi tarkvara.

Mõõteseadmed

Estonia kaevanduses mõõdistati käsiskanneriga GeoSLAM ZEB-REVO (tehnilisi andmeid vt tabel 1) kahe kambriploki käike, referentsandmed koguti staatilise laserskanneriga Faro Focus^{3D} X330 (vt tabel 1). Hoonete mõõdistustel kasutati referentsandmete saamiseks nii Faro skannerit kui ka laserskannerit Riegl VZ-400 (vt tabel 1).

ZEB-REVO seadmeks on 2D-laserkiirguse skanner (LIDAR), mis on ühendatud IMUga, ühes tasandis pöörlev laseripea annab edasiliikumise kolmemõõtmelise informatsiooni jaoks vajaliku kolmanda mõõtme (vt joonis 1). 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.

SLAMi algoritm hõlmab kahte omavahel sõltuvuses olevat osa. Ühelt poolt on asukohta määraval robotil vaja kaarti, et oma paiknemine kindlaks teha, teiselt poolt tuleb määrata asukoht, et ümbritsevat kaardistada. Lahendusena on välja töötatud mitmeid erinevaid algoritme sama eesmärgiga. SLAMi põhimõttel liigub robot ruumis ja samaaegselt loob ümbritsevast kaardi (või punktipilve) järgjärguliste 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.

Joonisel 2 on esitatud SLAMi 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 SLAMi 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 tekkiv 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*) vokselite (vähim 3D-element, millele saab omistada tunnuseid) võrgustiku abil (uuritakse punkte, mis erinevatesse vokselitesse satuvad ja seeläbi leitakse vokseli kuju ehk pinnakese parameetrid).

Tabel 1. GeoSLAM, Faro Focus^{3D} X330 ja Riegl VZ-400 tehnilised näitajad

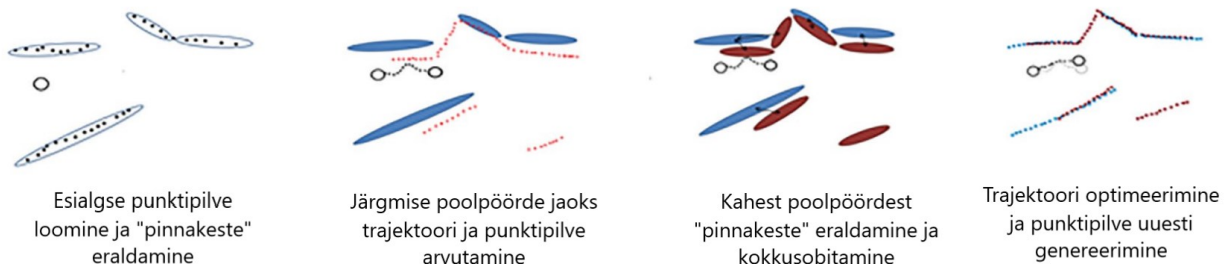
Tehniline näitaja	GeoSLAM ZEB-REVO [4]	Faro Focus ^{3D} X330 [5]	Riegl VZ-400 [6]
Maksimaalne mõõteulatus	30 m optimaalsetes tingimustes 15–20 m tavaliselt	0,6 m kuni 330 m	1,5 m kuni 600 m
Mõõteulatus	270° / 360°	300° / 360°	60° + 40° = 100° kuni 360°
Skaneerimiskiirus (punkti sekundis)	100 joont sekundis 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° Õhuniiskus kuni 85%	Temp 5° kuni 40°	Temp 0° kuni 40° Õhuniiskus kuni 80%
Kaal	2 kg (komplekt)	5,2 kg	9,6 kg
Möödud	Skaneerimispea 80 x 113 x 140 mm	240 x 200 x 100 mm	Ø 180 x 308 mm
Aku vastupidavus	Keskmiselt 4 h	4,5 h	



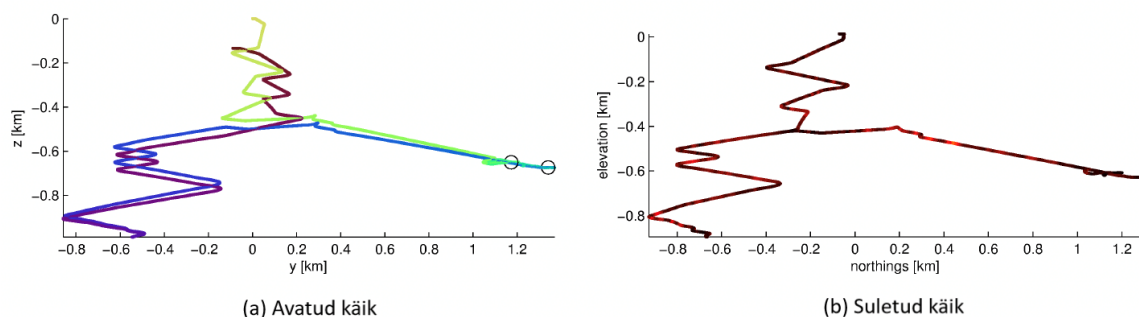
Joonis 1. Käsiskanner GeoSLAM ZEB-REVO (lisana kaamera) [3].

Pöörleva 2D-sensori sümmeetriast tulenevalt piisab kogu vaatevälja skaneerimiseks poolest pöördest (*sweep*), seega esialgne trajektoori lõik ja punktipilve osa arvutatakse ühe poolpöörde andmete alusel. Järgmise poolpöörde jaoks leitakse liikumise trajektoori ja punktipilve 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 ümbritsevast ning punktipilv suureneb.

Käigu sulgedes saab algoritm kogu võimaliku informatsiooni ümbritsevast ja korrigeerib tekkinud trajektoori ning sellega ka punktipilve vastavalt lõplikele andmetele (vt joonis 3). Suletud käik annab geodeesias tuttava sulgemisvea, mis käigu peale ära jagatakse, põhimõtteliselt töötab algoritm samadel alustel, viies käigu alguse ja lõpu omavahel kokku.



Joonis 2. SLAMi algoritmi tööpõhimõtte sammud punktipilvede arvutamisel.



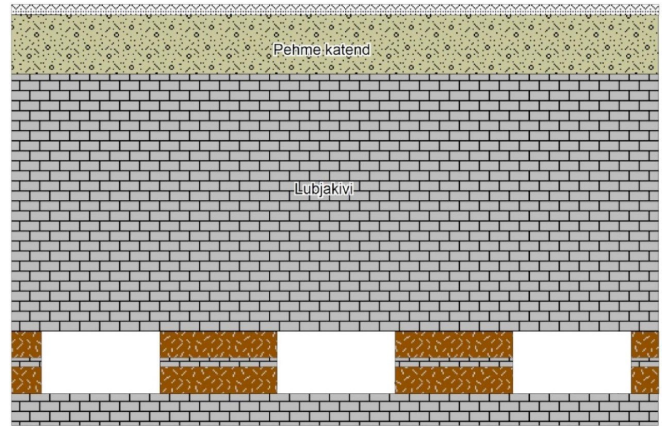
Joonis 3. Avatud käigu trajektoori (nihkes) ja käigu sulgemisega parandatud trajektoori.

Estonia kaevanduse allmaa mõõdistustööd

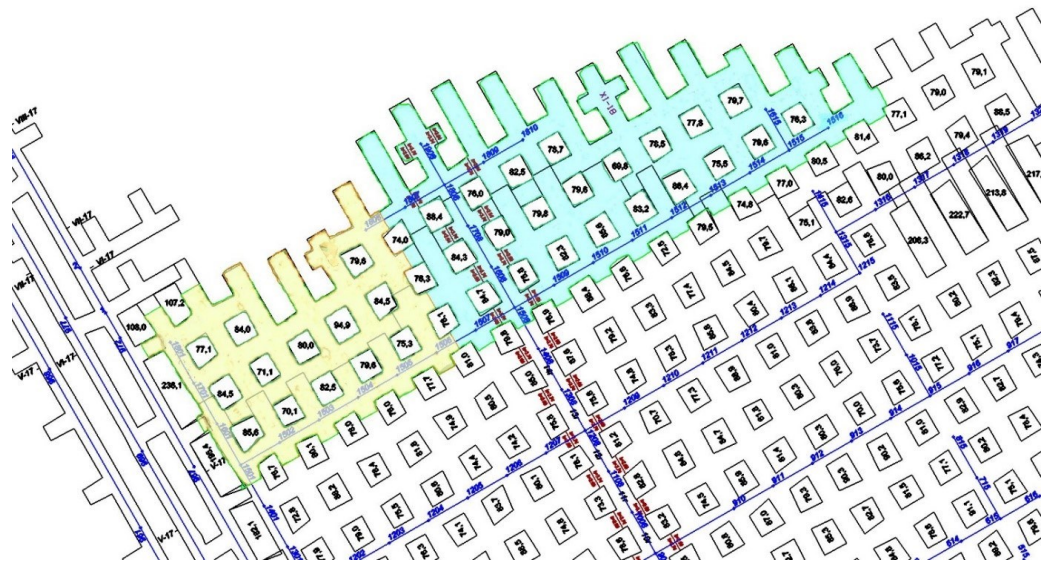
Põlevkivi allmaakaevandamiseks on mitu erinevat tehnoloogiat. Eestis kasutatakse põhiliselt kamberkaevandamist puur-lõhketöödega keskmiselt 20–70 m sügavusel. Sellisel meetodil jäetakse põhilae püsivuse tagamiseks alles sambakujulised tugitervikud ja põhilagi lisatoestust ei vaja. Skeem kamberkaevandamise ristlõikest on joonisel 4.

Läbiviidud projekti katsetööde esimeses osas uuriti Estonia põlevkivikaevanduse kambriplokki nr 1214 (vt joonisel 5).

Kontrollala (u 5200 m², joonisel 5 kollasega) mõõdistati terrestrialilise laserskanneriga Faro Focus^{3D} X330 23 seisus, iga seis ca 4 minutit, kokku poolteist tundi. Kahe käiguna mõõdistati 40 minuti jooksul käsiskanneriga peaaegu kolm korda suurem ala (ca 14500 m²).



Joonis 4. Kamberkaevandamise ristlõike põhimõtteline skeem.



Joonis 5. Kambriplokki mõõdistusala skeem. Kollasega on kahe skanneriga mõõdistatud ala (kontrollala), sinisega vaid GeoSLAMiga mõõdistatud ala. Tumesiniste numbritega on tähistatud märkseidermõõdistusvõrgu punktid, mida saab kasutada ülesriputatavate skaneerimistähiste asukohtadena.

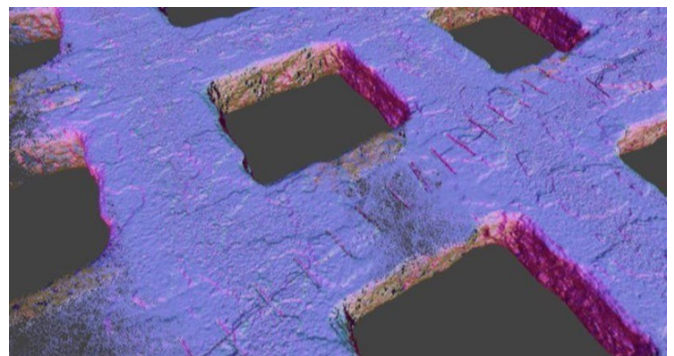
Punktipilvede võrdlused

Faro punktipilv on täpne, selge ja detailne (vt joonisel 6).



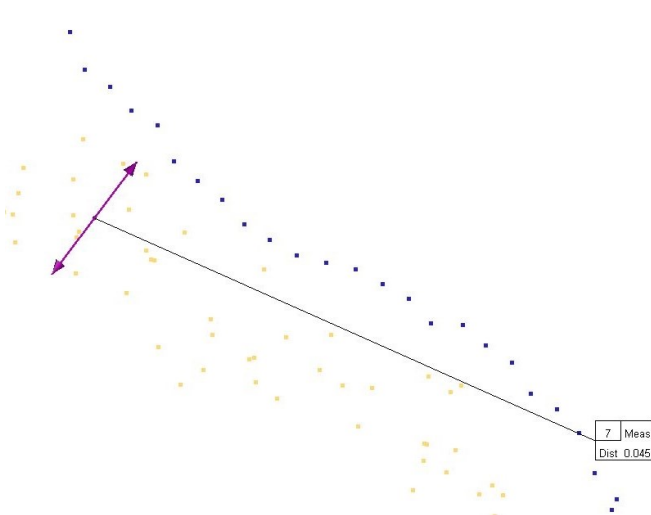
Joonis 6. Staatilise skanneriga tehtud värviline punktipilv, valge C/D vahekiht on tootuskihi keskosas asuv selgelt eristuv ja jälgitav kiht, mida kasutatakse maa-alusel kaevandusel markeeringuna.

GeoSLAMi punktipilv on mõnevõrra hajusam, ent olulised elemendid, nagu n-ö õmbelused laes (lage läbivad lõhed, mis on poolpalkidega toetatud) või suurematel varingetel tekkinud lohud lagedes on eristatavad (vt joonisel 7).

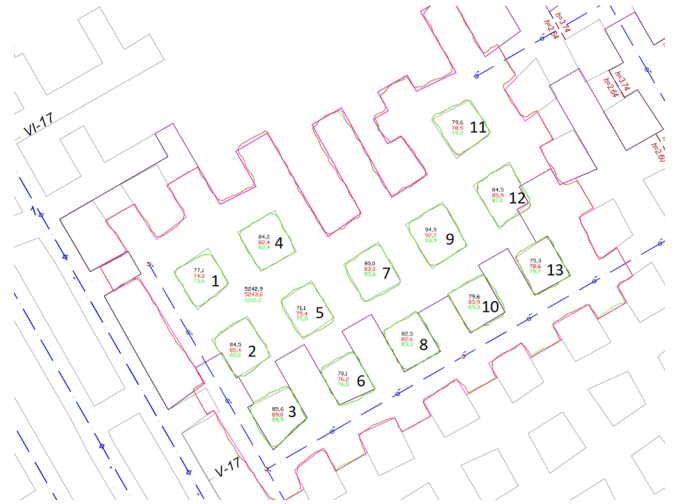


Joonis 7. Mobiilse skaneerimise kujutis kambriplokki lage läbivatest lõhedest (toetatud poolpalkidega). Kõrgemad õnarused kambrite lagedes tähistavad varisenud (või varisemisohhtikuna eemaldatud) materjali.

Faro skanneri punktipilv on korrektne ja ühtlane, joonisel 8 tähistatud sinisega. GeoSLAMil tekib hajus ja laialivalguv punktipilv (joonisel 8 kollasega), mis on valitud näite puhul kohati 45 mm laiune.



Joonis 8. GeoSLAM ZEB-REVO punkt pilv kollasega ja Faro punkt pilv sinisega 1 cm läbilõikes, joonisel on Faro pilvest üks punktirida, ZEB-REVO hajub 4,5 cm.



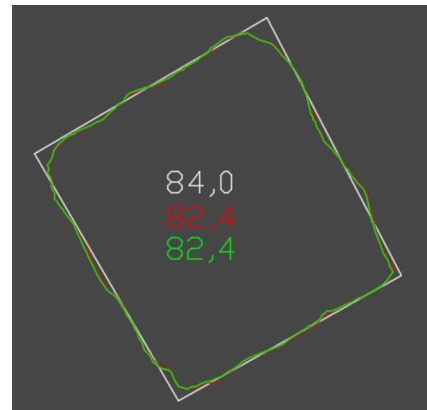
Joonis 9. Faro, GeoSLAMi ja kaevanduse tervikute andmed. Punase kontuuriga Faro mõõteandmete ulatus, rohelisega GeoSLAMi andmed, mustaga kaevanduse andmed.

Tervikute pindalad ja kaevemahud

Kamberkaevandamisel alles jäävad tugitervikud toetavad lage ja tagavad seeläbi kambriplakkide stabiilse püsivuse. Nende mõõtmed ja asukoht on olulise tähtsusega. Tervikud mõõdistatakse ligikaudu 1,6 m kõrgusel põrandast mööda C/D vahekihti (tootuskihi keskosas asuv selgelt eristuv ja jälgitav kiht, mida kasutatakse maa-alusel kaevandusel markeeringuna) laserkaugusmõõjtajega. Samba pikkus mõõdetakse igast neljast küljest, asukoha ja kuju määramiseks võetakse lisamõõdud tervikute nurkadesse varem koordineeritud mõõdistusvõrgu punktide suhtes. Mõõdetud suurused kirjutatakse väliraamatusse ja lõplik kuju ning asukoht joonestatakse Cad-põhises CREDO joonestusprogrammis.

Võrdluseks moodustati ka Faro ja GeoSLAMi pinnamudelil 1,6 m kõrgusel ristlõige ja määrati tervikute pindalad. Joonisel 9 on toodud 13 tugitervikut kontrollalal.

Joonisel 10 suurendatud tugitervikul on valgega toodud nelinurk markšeideri mõõteandmete alusel saadud tugiterviku kontuur, punase ja rohelisega on vastavalt Faro ja GeoSLAMiga saadud terviku lõige.



Joonis 10. Väljavõte tervikust, kus punase kontuuriga on Faro andmed, rohelisega GeoSLAMi andmed ja valgega kaevanduse andmed.

Tabelis 2 on esitatud kokkuvõtte tugitervikute pindalade kohta. Markšeideri mõõdistustulemuste põhjal on tugitervikute kogupindala Faro andmetega võrreldes 1,8% väiksem, mis tähendab, et maavara on välja kaevatud justkui rohkem. GeoSLAMi kogupindala on 0,5% suurem Faro andmetega võrreldes, seega langevad andmed nii asukohaliselt kui ka pindaladelt hästi kokku. Kui võrrelda markšeideri ja Geo-SLAMi andmeid, siis 2,3% on markšeideri tulemused väiksemad.

Tabel 2. Tervikute võrdlused Faro, GeoSLAMi ja kaevanduses mõõdetud andmete vahel

Tervikud/Pindalad m ²	Faro m ²	GeoSLAM m ²	Kaevandus m ²
Tervikute summa, m²	1068,0	1073,6	1048,8
Erinevus Faro tulemusest m²		-5,6	19,2
% Faro tulemusest		0,5	1,8
Erinevus GeoSLAMi tulemusest m²			24,8
% GeoSLAMi tulemusest			2,3

Tabelis 3 on toodud mõõdistusandmed teises kambriplakis, 1707. Vaatluse all on 22 tugitervikut. Markšeideri andmed tervikute osas näitavad, et 1,8% on kogupindala suurem kui GeoSLAMiga mõõdetud.

Tabel 3. Tervikute pindalade võrdlus kambriplakis 1707

Tervikud/Pindalad m ²	GeoSLAM	Kaevandus
Tervikute summa m²	1013,2	1031,7
Erinevus m²		18,5
% GeoSLAMi tulemusest	-	1,8

Kuna ühel juhul oli kogupindala väiksem ja teisel juhul suurem, siis võib eeldada, et tervikute mõõdistamine traditsiooniliste meetoditega on subjektiivne ja sõltub mõõdistuspunktide valikust. Skaneerimistulemused on aga sõltumatud, sest kõik pinnad mõõdistatakse ühtlaselt.

Allmaakaevanduses on oluline arvutada ka väljaveeta-va maavara maht. Tabeli 4 põhjal on markšeideri ja ka Geo-SLAMi arvutatud mahud 0,7% väiksemad referentsmahust, st et välja on veetud justkui vähem maavara, kui Faro andmed näitavad. GeoSLAMiga võrreldes on markšeiderite maht 0,04% suurem.

Tabel 4. Kaevandatud mahtude võrdlemine kontrollalal

	Faro	GeoSLAM	Kaevandus
Maht kontrollalal m³	11 067,7	10 984,2	10 988,5
Erinevus Faro tulemusest m³	–	83,6	79,2
% Faro tulemusest	–	0,7	0,7
Erinevus GeoSLAMi tulemusest m³			4,4
% GeoSLAMi tulemusest			0,04

Tabel 5 näitab kambriploki 1707 andmeid. Siin on erinevus GeoSLAMi ja markšeideri andmete vahel ainult 0,2%.

Tabel 5. Kaevandatud mahud kambriplokis 1707

GeoSLAMi mõõdistatud maht	29 187,63 m³
Markšeideri mõõdistatud maht	29 140,52 m ³
Markšeideri tulemuste erinevus GeoSLAMist	47,11 m ³
Erinevus %	0,2

Erinevused mahtude osas on väga väikesed ja kuni 10 korda väiksemad seaduses toodud lubatavast väärtusest (määruse [7] alusel võib kordusmõõtmistel mõõtesuuruse väärtuse erinevus kuni 20 000 m³ mahu korral olla kuni 10%).

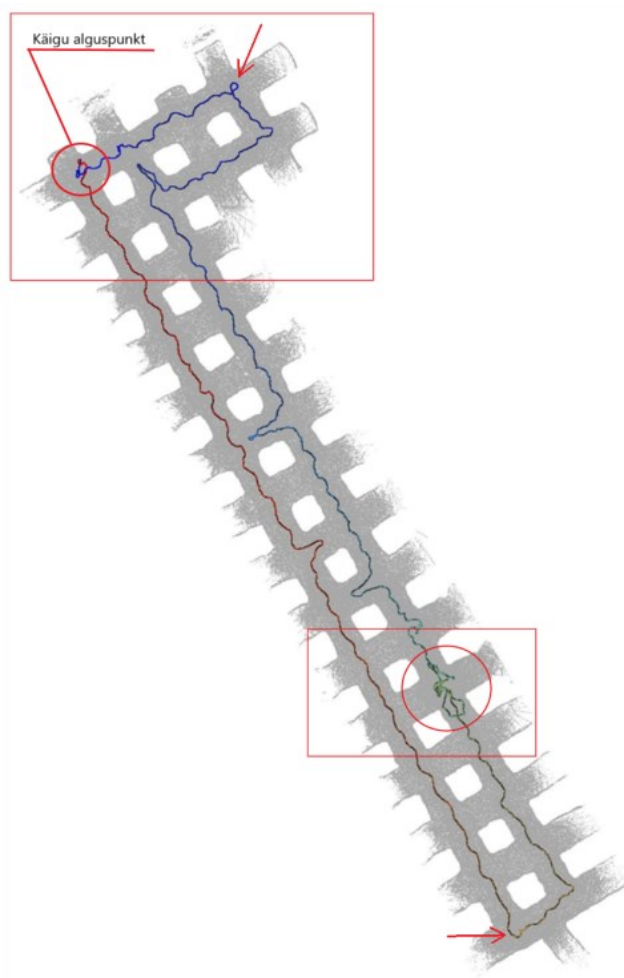
Liikumistrajektorid

Mõõdistusprotsessi illustreerimiseks ja andmete kvaliteedi hindamiseks saab joonisele lisada ka seadme liikumise trajektoori. Joonisel 11 on sinisest värvist punaseni liikumise suund algusest lõpuni, käigu alguspunkt asub joonisel üleval vasakul, tähistatuna ringiga. Noolega tähistatud kohas asus laes skaneerimistähis, mis täpsema tulemuse saamiseks igast küljest täiendavalt skaneeriti. Trajektoori-joon näitab, kus on tehtud n-ö haake või kõrvale mõõdistamisi, keskel olev pundar (ringiga) tähistab kohta, kus näitlikustamise huvides tiirutati sama koha peal, et tööd jälgivad inimesed punktipilve skaneerida.

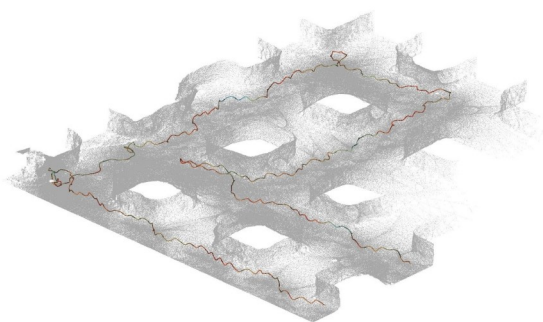
Lisaks võib tähele panna, et trajektoori lähedal on punktipilv tihedam kui eemal. Selle põhjal saab analüüsida, kui kaugetele instrument tegelikult mõõdistab ja punkte kogub ning milliste mõõdistuskauguste ja liikumistrajektooriga peaks skaneerimisel arvestama.

Samasuguse trajektoori saab lisada ka skaneerimise tingimuste illustreerimiseks joonisel 12, eristamaks kohti, kus SLAMi algoritm leiab ühiseid punkte kergesti ja kus kehvemini. Kehvemad registreerimise tingimuste kohad on tähistatud punasega, paremad kohad sinisega.

Siin võib järeltada, 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 tootja nõuandeid ja soovitusi parima tulemuse saamiseks.



Joonis 11. Koos trajektooriga GeoSLAMi punktipilv. Toonid sinisest läbi vikerkaarevärvide punaseni näitavad liikumise suunda. Punased kastid näitavad väljavõtete asukohti, mida antud töös ei ole esitatud.



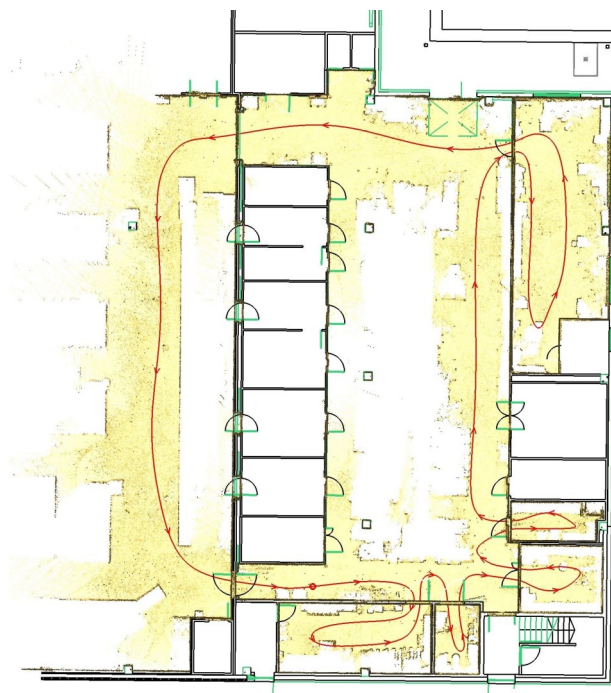
Joonis 12. GeoSLAMi kolmemõõtmeline punktipilv trajektooriga punktipilve registreerimist näitavate värvitoonidega sinisest punaseni. Sinised toonid ütlevad, et registreeringu tingimused on head, punased näitavad kehvemaid tingimusi.

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

Hoonete mõõdistamine käsiskanneriga

Hoonete inventariseerimisjooniste tegemiseks oleks mobiilne laserskanner mugav instrument, kiire ja detailne erinevate elementide joonestamisel. Töös katsetati GeoSLAM ZEB-REVO kasutusvõimalusi kaubanduskeskuse lao- ja tagaruumide mõõdistamiseks ning Maa-ameti hoonel näitel uuriti ruumide pindalade mõõtmistulemusi.

Kaubanduskeskuse ruumide jaoks saadi referentsandmed laserskanneriga Riegl VZ-400. Umbes 950 m² ala mõõdistati staatilise skanneriga 32 seisus, iga seis 4 minutit. GeoSLAM ZEB-REVO käik sama ala peale oli ca 15 minuti pikkune. Joonisel 13 on mõõdistatud ala ZEB-REVO punktipilvest, punane joon markeerib liikumise trajektoori.



Joonis 13. 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.

Analüüsi läbiviimiseks tekitati ruumide seintele, põrandatele ja lagedele pinda kujutava punktipilve asemele parima sobivuse alusel tasapinnad, mille abil viidi läbi punktipilvede võrdlused. Ruumide pikkuste/laiuste ja kõrguste kokkuvõtvad tulemused on esitatud tabelis 6.

Tabel 6. Kaubanduskeskuse ruumide andmed GeoSLAM REVO ja Riegl punktipilvede põhjal

Mõõt	Riegl VZ-400 m	ZEB-REVO m	Erinevus m
Pikkused (17 tk)			
Minimaalne	0,40	0,40	-0,104
Maksimaalne	29,16	29,14	0,021
Standardhälve	8,47	8,46	0,028
Keskmine	8,46	8,47	-0,003
Mediaan	4,91	4,90	0,001
KRV			0,028
KRV täpsus			0,005
Kõrgused (7 tk)			
Minimaalne	2,41	2,39	-0,007
Maksimaalne	3,47	3,47	0,019
Standardhälve	0,44	0,45	0,010
Keskmine	3,12	3,12	0,001
Mediaan	3,45	3,46	-0,003
KRV			0,010
KRV täpsus			0,003

Tabeli põhjal on mõõdistatud 17 vahemaad. Kauguste erinevus tasapindade vahel on keskmise ruutveaga 28 mm, kõrguste erinevus 10 mm. Leitud ruutvigade põhjal võib eeldada, et vaatluse all olevate ruumide mõõdistamine käsi-

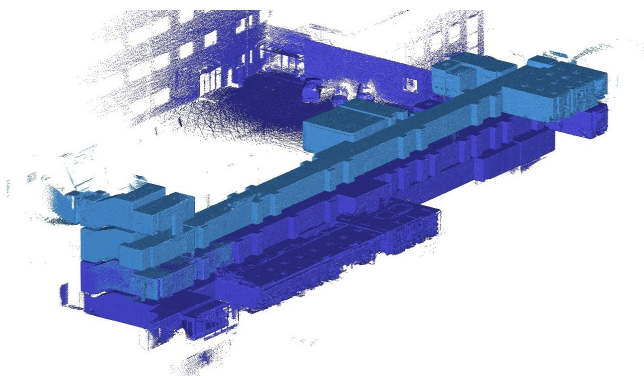
skanneriga tulemusi palju ei mõjuta ja seade on antud töö jaoks sobilik. Samas olid vaatluse all pigem väiksemad ruumid, kus joonepikkused ruumi pindalale ei mõjugi, suurema-

te ruumide puhul oleks vaja läbi viia täiendavad uurimised.

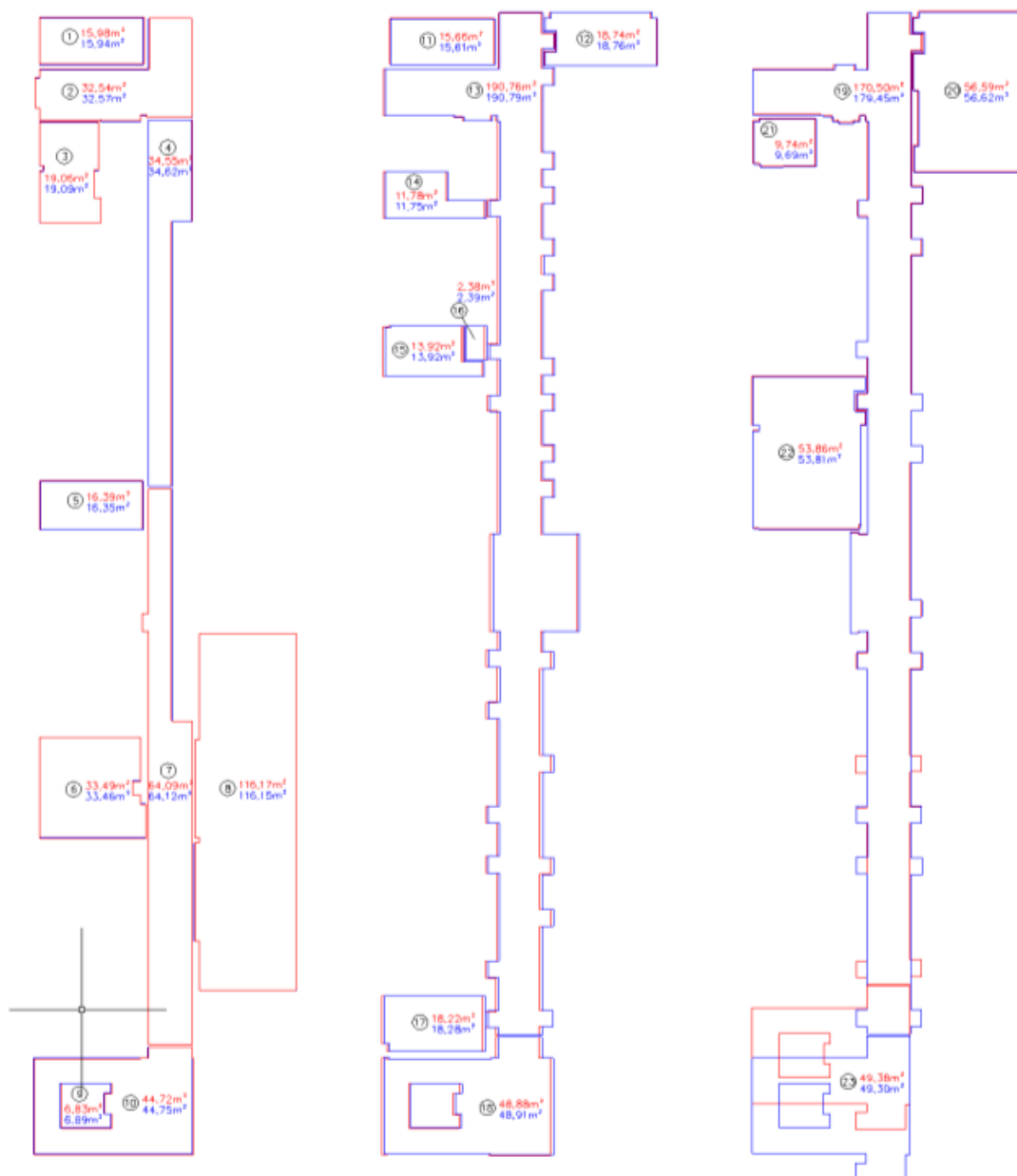
Maa-ameti hoone (vt joonis 14) mõõdistustulemuste põhjal analüüsiti peamiselt ruumide pindalasisid, mis on inventariseerimisjooniste põhieesmärk.

Käsiskanneriga mõõdistati hoone kahe käiguna kolme korruse vahel, referentsandmed saadi laserskanneeriga Faro Focus^{3D} X330.

Antud hoone puhul moodustati punktipilvedes iga korruse peal 1,6 m kõrgusel lõige ja AutoCadi tarkvaraga joonestati välja korruse plaan (arvesse võeti ainult need ruumid, mis olid mõõdistatud mõlema skanneriga). Võrdluseks loendati kokku 23 ruumi, mis on esitatud joonisel 15.



Joonis 14. Maa-ameti hoone puhastamata punktipilv, mõõdistatud GeoSLAM ZEB-REVO-ga. Tumedam sinine toon on üks käik, heledam sinine toon kolmanda korruse osas teine käik.



Joonis 15. Maa-ameti hoone plaanid ruumide kontuuride ja pindaladega, punasega on tähistatud referentsandmed, sinisega käsiskanneri andmed.

Tulemused on kokku võetud tabelis 7.

Tabel 7. Maa-ameti hoone ruumide pindalad kolme korruse lõikes

Ruumi nr	Faro pindala m ²	GeoSLAMi pindala m ²	Erinevus m ²
Minimaalne	2,38	2,39	-0,07
Maksimaalne	190,76	190,79	0,08
Standardhälve	42,48	42,48	0,04
Keskmine	39,72	39,72	0,00
Mediaan	25,80	25,83	-0,02
Summa	873,73	873,77	-0,04
Erinevus referentsandmetest 0,004 %			

Keskmiselt olid ruumide pindalad erinevusega, suurimad erinevused ulatusid 0,08 m² juurde ehk ümardatuna „ruutmeetritesse täpsusega üks koht peale koma“ (ehitisregistrisse kandmise täpsus) on erinevus 0,1 m². Kõikide ruumide pindalad kokku saadi erinevusega 0,04 m² ehk 0,004% erines käsiskanneriga saadud tulemus referentsandmetest ning summaarselt ei teki ka ümardamisel suurt viga. Saadud erinevused mõjutavad pindala määramise täpsust vähesel määral, ent mõnel juhul võib erinevus oluliselt osutada, sest pindalad määratakse 0,1 m² täpsusega, mistõttu ümardamisel tekkivad vead võivad olla määrava tähtsusega üksikute ruumide kujutamisel.

Kokkuvõte

Laserskaneerimine on mujal mäetööstuses laialdaselt kasutusel, otsitakse uusi ja paremaid võimalusi tööde lihtsamaks ja ohutumaks läbiviimiseks ning katsetatakse erinevate mobiilsete laserskannerite ning droonide kasutusvõimalusi. GeoSLAMi ettevõtte 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 kinnitatav) laserskanner sobilik instrument maa-alusteks mõõdistustöödeks, mis asendaks hetkel kasutuselolevaid laserkaugusmõõtlajaid.

Töös analüüsitud ZEB-REVO andmete täpsus referentsandmetega andis häid tulemusi, maa-aluse mõõdistuse punktipilvede erinevused jäid maksimaalselt 5 cm piiridesse, tugitervikute pindalad erinesid 0,5% ja väljakaevemaht 0,7%. Mõõdistamine on kiire (40 minutiga mõõdistati 14 500 m²,

samas kui terestriilise laserskanneriga kulus tund aega 5200 m² ehk peaaegu 3 korda väiksema ala skaneerimiseks) ja skaneerimise meetodit võib lugeda usaldusväärseks (tugitervikute pindalade mõõdistamise tulemuste üle järeldades). Lisaks täpsetele tulemustele saab ühtsesse andmebaasi kogutud punktipilvi uuesti üle vaadata, arvutusi teha, ohtlikuks muutunud alade kohta (lahitioestatud 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 laserskanneriga töötamine võtab kaua aega ja kõikidesse kohtadesse ligi ei pääse. Väikeste ruumide mõõdistamisel kaubanduskeskuse näitel jäid vertikaalpindade vahelised erinevused, võrrelduna terestriilise laserskanneriga keskmise ruutveaga 28 mm juurde, horisontaalpindade erinevused keskmise ruutveaga 10 mm juurde. Ilma mudeldamiseta käsitsi punktipilvest plaanide joonestamine Maa-ameti hoone näitel pindalad keskmiselt ei erinenud, ent maksimaalsed erinevused jäid ka siin ca 0,1 m² juurde, mis üksikute ruumide pindala mõjutab. Seega võiks eeldada, et väikeste ruumide pindala ZEB-REVOga 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. ZEB-REVO seadet võiks inventariseerimisjooniste koostamiseks kasutada eelkõige väikeste ruumide juures. Suuremate ruumide puhul tuleks teha täiendavaid kontrollmõõtmisi näiteks laserkaugusmõõtlajaga, et tulemusel veenduda ja jooniste koostamiseks kasutada mudeldamise meetodit.

Viidatud kirjanduse loetelu

- [1] Väli, E., Kanter, S., Karu, V., Ellmann, A., Julge, K. Varbla, S., Malberg, K. (2019). *Markseidertööde kaugseiremeetodite abil efektiivsustamise võimaluste rakendusuuring*. II etapi aruanne. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [2] Malberg, K. (2019). *Siseruumide ja allmaakaevanduste ruumikuju määramine mobiilse laserskaneerimisega*. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [3] GeoSLAM Ltd. (2019) GeoSLAM kodulehekül. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://geoslam.com/>
- [4] 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>
- [5] Faro. (2016). *Faro Laser Scanner Focus3D X330 Tech Sheet*. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://faro.app.box.com/s/kaeo5jwguxe1tacvzea7berpzm0phofp/file/441644006961>
- [6] Riegl. (2017) *DataSheet VZ-400. 3D Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing*. Loetud 28.05.2019 aadressil http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf
- [7] Markseidermõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord. (2019). RT I, 07.05.2019, 5. Loetud 28.05.2019 aadressil <https://www.riigiteataja.ee/akt/107052019005>