



Laserskaneerimise rakendusvõimalused ja eelised rajatava Uus-Kiviõli II kaevanduse markšneideritöodes

Magistritöö

Üliõpilane: Irina Borozdyukhina

Üliõpilaskood: 231978LARM

Juhendaja: Erik Väli, TalTech Geoloogia instituut, vanemlektor, PhD

Kaasjuhendaja: Vaiko Veeleid, Hades Geodeesia OÜ, juhatuse liige

Õppekava: LARM18/23

Autorideklaratsioon

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

Autor: Irina Borozdyukhina
[allkirjastatud digitaalselt]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.
Juhendaja: Erik Väli
[allkirjastatud digitaalselt]

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract	5
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu	6
Kasutatud mõistete ja lühendite loetelu.....	8
1.Sissejuhatus.....	9
2. Uus-Kiviõli kaevevälja mäenduslik iseloomustus	10
2.1. Uus-Kiviõli uuringuväli	10
2.2. Varu suurus	11
2.3. Tootuskihi F ₂ - A ehitus, lasumistingimused ja kvaliteet	11
2.4. Geoloogiliste plokkide kvalitatiivne iseloomustus.....	12
2.5. Põlevkivi tööstuslike kihtide kvalitatiivsed omadused	12
2.6. Kaevevälja hüdrogeoloogiline iseloomustus	15
3. Tehnoloogiline osa	17
3.1. Uus-Kiviõli II kaevevälja avamine.....	17
3.2. Kaevevälja ettevalmistamine. Kaevandamisviisid.	17
3.3. Peakaeveõõned.....	18
3.3.1. Peakaldšahtid.....	18
3.3.2. Kaevandushoov ja peamised avamistrekid	19
3.4. Läbindustööde tehnoloogilised skeemid	19
3.4.1. Läbindustööde tehnoloogiline skeem kui transpordiks kasutatakse laadurveokeid.....	20
3.4.2. Kaeveõõnte läbindamise tehnoloogiline skeem kui laadimiseks kasutatakse laadurveokeid ja kaevis transpordiks kallureid.....	20
3.4.3. Kaeveõõnte läbindamise tehnoloogiline skeem kui laadimiseks kasutatakse laadurveokeid, kaevis transporditakse kalluritega kraap- ja lintkonveierile	21
3.5. Koristustööde tehnoloogia	21
4. Laserskaneerimine	24
4.1. Mobiilse laserskaneerimise tehnoloogia	24
4.2. Mobiilse laserskaneerimise tööpõhimõte	25
4.3. Kaevandustes laserskaneerimise kasutuse varasem kogemus.....	25
5. Lõputöös kasutatud mõõteseadmed	27
5.1. Stonex X120Go SLAM.....	27

5.2. Stonex X70Go SLAM.....	28
5.3. Gexcel HERON Lite	28
5.4. NavVis VLX3	29
5.5. Kasutatud mõõteseadmete tehnilised andmed	30
6. Olemasolev mõõdistusmetoodika	31
6.1. Kambriplukkide markšeiderimõõtmised.....	31
6.2. Kambriplukkide andmetöötlus.....	34
6.3. Läbindustööde markšeiderimõõdistamine	36
6.4. Läbindustööde andmetöötlus.....	36
7. 2023 aasta uue mõõdistustehnoloogia katsetööd Ojamaa kaevanduses.....	39
7.1. Punktpilvede orienteerimine	39
7.2. Traditsioonilise ja laserskaneerimise mõõdistamismeetodite efektiivsuse võrdlus kambriplukkides nr 19 ja 901.....	41
7.3. Tervikute pindala ja kuju hindamine laserskaneerimise andmete põhjal	43
7.4. Mahtude arvutamine ja võrdlemine kambriplukkis 19	44
8. Markšeideritööd allmaa rajatise ehitamisel.....	46
8.1. Kõrgusvõrk	46
8.2. Geomeetriline nivelleerimine	47
8.2.1. Kasutatud mõõteseadmed.....	50
8.3. Allmaa rajatise tahhümeetriline mõõdistamine	50
8.4. Laserskaneerimise rakendamisevõimaluste uuring Uus-Kiviõli II kaevanduse allmaa rajatiste mõõdistamisel.....	53
8.4.1. Punktpilvede orienteerimine	53
8.4.2. Punktpilve kvaliteedi hindamine (NavVis VLX3)	54
8.4.3. Läbindustööde mahtude arvutamine ja võrdlemine	54
8.5. Tõusu mõõdistamine mobiilsete laserskanneritega	56
Järeldused ja kokkuvõte	59
Tänuavaldused	60
Kirjanduse loetelu	61
Lisa 1. Tervikute pindala võrdlev tabel.....	64
Lisa 2. NavVis raport.....	65

Annotatsioon

Tehnoloogia kiire areng mõjutab erinevaid valdkondi, sealhulgas mõõdistamist. Laserskaneerimine on geodeesias muutunud väga levinud mõõdistusmeetodiks, mille täpsus ja kiirus võimaldavad luua detailseid mudeleid. Kaevanduse markšneideri tööülesannete hulka kuuluvad geodeetiliste tugivõrkude projekteerimine, kaeveõõnte mõõdistamine ja kaardistamine, kaevandatud alade mahtude määramine, tervikute mõõtmine ning mäendus-graafilise dokumentatsiooni koostamine.

Viru Keemia Grupi põlevkivikaevandustes on aastaid kasutatud laserkaugusmõõtjaid nurkade ja pikkuste mõõtmiseks, tööde dokumenteerimiseks kasutatakse AutoCAD Civil 3D tarkvara ning mahtude arvutamiseks ArcGIS Pro programmi. Siiski on traditsioonilistel mõõdistusmeetoditel olulisi puudusi – eelkõige ei võimalda need piisavalt täpselt fikseerida ebatasasusi kaeveõõnte ja tervikute seintes, lagedes ja põrandates, mis võib põhjustada märkimisväärsed erinevusi mõõdetud ja tegelike mahtude vahel. Lisaks saab olemasolevate meetoditega koostada mõõdistusplaanid ja jooniseid üksnes kahemõõtmelisel kujul.

Käesoleva magistritöö eesmärk on tõestada, et mobiilsete laserskannerite kasutamine kaevanduskäikude mõõdistamisel on täpsem, kiirem ja ohutum võrreldes seni kasutatavate meetoditega. Uuring viidi läbi Ojamaa kaevanduse 19. kambriplokis ning rajatavas Uus-Kiviõli II kaevanduses, kus kasutati mobiilseid laserskannereid. Kogutud andmeid töödeldi tarkvarade CloudCompare ja Blender abil, mille tulemusel loodi punktipilved ja 3D-mudelid. See võimaldas läbi viia täpsemat analüüsi kaevandatud mahtude kohta ning võrrelda tulemusi varasemate mõõdistusmeetoditega visuaalselt.

Tulemused näitasid, et mobiilne laserskaneerimine võimaldab saada oluliselt detailsemat ja täpsemat ruumilist infot kui traditsioonilised meetodid. Skaneerimise käigus tuvastati kaeveõõnte pindadel ebatasasusi, mida senised meetodid ei võimaldanud märgata. Samuti tõestati, et mobiilsete laserskannerite kasutamine vähendab mõõdistustöödele kuluvat aega ning võimaldab markšneideritel töötada ohutumas kauguses potentsiaalselt ohtlikest piirkondadest.

Kokkuvõtteks võib väita, et mobiilne laserskaneerimine on kujunemas üheks tõhusamaks lahenduseks mitte ainult geodeesias, vaid ka allmaakaevanduste mõõdistamisel tänu oma täpsusele, kiirusele, kasutusmugavusele ja andmete usaldusväärsusele.

Application Possibilities and Benefits of Laser Scanning in Mine Surveying at the Uus-Kiviõli II Mine Under Construction

Abstract

Rapid technological advancements impact various fields, including surveying. Laser scanning has become a widely adopted surveying method in geodesy due to its accuracy and speed, enabling the creation of highly detailed models. The responsibilities of a mining surveyor typically include designing geodetic control networks, surveying and mapping mine excavations, determining mined volumes, measuring pillars, and preparing mining-graphic documentation.

At Viru Keemia Grupp's oil shale mines, laser distance meters have long been employed for angle and length measurements. Documentation tasks utilize AutoCAD Civil 3D software, while volume calculations are conducted with ArcGIS Pro. Nevertheless, traditional surveying methods have significant shortcomings, notably their limited capability to accurately capture irregularities in the walls, ceilings, and floors of mine excavations and pillars. This limitation can lead to considerable discrepancies between measured and actual volumes. Additionally, conventional methods restrict survey plans and drawings to two-dimensional representations.

The primary objective of this master's thesis is to demonstrate that the use of mobile laser scanners for surveying mining tunnels is more accurate, faster, and safer than traditional methods. The research was conducted in the 19th chamber block of Ojamaa mine and in the newly established Uus-Kiviõli II mine, employing mobile laser scanners. Collected data were processed using CloudCompare and Blender software, resulting in detailed point clouds and 3D models. This facilitated a more precise analysis of mined volumes and allowed for visual comparisons with previous surveying methods.

The results demonstrated that mobile laser scanning provides significantly more detailed and accurate spatial information than traditional methods. During scanning, surface irregularities within mine excavations were identified that previous methods had failed to detect. Additionally, it was proven that the use of mobile laser scanners reduces the time required for surveying tasks and enables surveyors to work at a safer distance from potentially hazardous areas.

In conclusion, mobile laser scanning is becoming one of the most efficient solutions not only in geodesy but also in underground mine surveying, thanks to its precision, speed, user-friendliness, and data reliability.

Jooniste loetelu

- Joonis 1.** Uus-Kiviõli ja Uus-Kiviõli II mäeeraldise piir, mis on märgitud punasega. Uuringuala asukoht Eestis on kujutatud väljalõikekaardil, kus see on tähistatud oranži märgisega (Maa- ja Ruumiamet, 2025).
- Joonis 2.** Kihindi ehitus Uus-Kiviõli kaevevälja piires (Veersalu, 2019).
- Joonis 3.** Peakaldshahtide ja mäeeraldisepiiri plaan (Mazin jt, 2024).
- Joonis 4.** Läbindamise tehnoloogiline skeem laadurveokiga (Mazin jt, 2024).
- Joonis 5.** Läbindamise tehnoloogilise skeem laadurveokiga ja kalluriga (Mazin jt, 2024).
- Joonis 6.** Kambriploki seadmed (Mazin jt, 2024).
- Joonis 7.** Stonex X120Go SLAM laserskanner (Foto: Gennadi Baranov, 2025).
- Joonis 8.** Stonex X70Go SLAM laserskanner (Stonex, i.a).
- Joonis 9.** Gexcel HERON lite (Gexcel, i.a).
- Joonis 10.** NavVis VLX3 (NavVis, i.a).
- Joonis 11.** Laserkaugusmõõtja Leica Disto X310.
- Joonis 12.** Tervikute külgi mõõdetakse nurgast nurka.
- Joonis 13.** Kambriploki markšeidermöödistamise raamat.
- Joonis 14.** Andmete töötlemine AutoCad Civil 3D tarkvaras.
- Joonis 15.** Kambriploki objekt omistatud atribuutidega.
- Joonis 16.** Läbindustööde arvutamise vihk.
- Joonis 17.** ArcGis Pro programmi läbindustööde atribuutide sisestamine.
- Joonis 18.** Laserskanner Heron Lite katsetamine.
- Joonis 19.** Orienteerimiseks kasutatud punktid külj- ja kogumisstrekkidel.
- Joonis 20.** Heron Lite otsik (Gexcel, 2023).
- Joonis 21.** Möödistatud ala on märgitud rohelisega.
- Joonis 22.** Tervikute asümmeetriline vorm.
- Joonis 23.** Võrkumodeli puhastamine ja parandamine mahu arvutuse jaoks.
- Joonis 24.** Kahe möödistusmeetodika võrdlus.
- Joonis 25.** Geomeetrilise nivelleerimise printsiip (Runtal, 2017).
- Joonis 26.** Nivelleerimiskäik.
- Joonis 27.** Nivelliir Sokkia C320 (Sokkia, 2007).
- Joonis 28.** H- kõrgus instrumendi ja lae vahel, Hnael- naela pikkus laest.
- Joonis 29.** Elektrontahhümeetri ekraan. VD ja HD on märgitud punasega.
- Joonis 30.** Tõusu profiil. Sinisega on joonestatud tegelik joon, roosaga projektjoon.
- Joonis 31.** Stonex X120Go perspektiivvaade puhastamata punktipilvest, kus punktide värvus kajastab nende kõrgust Z-teljel.
- Joonis 32.** Lahtitoestatud ala, inimeste viibine keelatud.
- Joonis 33.** Laserskanneri Stonex X120Go SLAM ettevalmistamine möödistustöödeks Uus-Kiviõli II kaevanduses.
- Joonis 34.** Stonex X70GO Slam külgvaade puhastatud punktipilvest. Punktide värvus põhineb RGB-värviantmetel.
- Joonis 35.** Stonex X120GO Slam möödistatud tõusu külgvaade.
- Joonis 36.** Mõõtmete määramine laserskaneeritud 3D-mudelist.

Tabelite loetelu

Tabel 1. Aktiivse ja passiivse tarbevaru suurus plokkide kaupa (Maa- ja Ruumiameti maardlate kaardirakendus, i.a).

Tabel 2. Uus-Kiviõli kaevevälja põlevkivikihindi näitajad (Mazin jt, 2024).

Tabel 3. Peamagistraalkaeveõõnte iseloomustus (Mazin jt, 2024).

Tabel 4. Kasutatud mõõteseadmete tähtsamad tehnilised andmed.

Tabel 5. Elektrontahhümeetrite tehnilised näitajad.

Tabel 6. Laserkaugusmõõtja Leica Disto X310 tehnilised näitajad (Laser measure, i.a).

Tabel 7. Erinevate mõõdistusmeetodite võrdlev tabel kambriplokis 19.

Tabel 8. Kokkuvõttev tabel teostatud töödest kambriplokis 901.

Tabel 9. Erinevate mõõdistusmeetodite võrdlev tabel.

Tabel 10. Kaevandatud mahtude võrdlemine.

Tabel 11. Tehnilisel nivelleerimisel saadud tulemused.

Tabel 12. Nivelliiri Sokkia C 320 tehnilised andmed (Sokkia, 2007).

Tabel 13. Kaevandatud mahtude võrdlemine ja erinevused traditsioonilise meetodiga.

Kasutatud mõistete ja lühendite loetelu

Polügonomeetria – geodeetiliste punktide koordinaatide määramise meetod, mille korral rajatakse maastikul neid punkte ja teada olevate koordinaatidega punkte ühendav murdjoon (polügonomeetriline käik) või sõlmpunktide kaudu omavahel ühendatud polügonomeetriliste käikude süsteem (polügonomeetriline võrk) ning mõõdetakse kõikide lõikude pikkus ja lõikudevahelised nurgad. („Polügonomeetria“, i.a)

Abriss – (sks *Abriss* visand, kavand, joonis). Geodeetistel maamõõdu-välitöödel tehtud skemaatiline joonis, millel on kõik mõõdistatavad objektid ja mõõtmise andmed. („Abriss“, i.a)

Markšeiderimõõdistus – tulenevalt Maapõueseadusest (2016, § 76, Lg 1) markšeiderimõõdistus on maavara kaevandamisel tehtav mõõdistamine ja mõõdistamistulemuste dokumenteerimine.

Allmaa-markšeiderivõrk – Maa- alune geodeetiline võrk. Tulenevalt Ruumiandmete seadusest (2011, § 22, lg 2) on geodeetiline võrk ühtsesse geodeetilisse süsteemi kuuluvate geodeetiliste punktide kogum.

Nivelliir – geodeesiinstrument, mida kasutatakse geomeetrilisel nivelleerimisel. Nivelliiri põhiosad on tõstekruvidega alus, pikksilm ja täpne vesilood või kompensaator (vastavalt pikksilma viseerimiskiire rõhtasendisse seadmiseks või selles hoidmiseks). Nüüdisajal kasutatakse kinniseid (püsttelje ümber pööratava pikksilmaga) optilis-mehaanilisi ja elektronnivelliire ning vastavaid mõõtelatte. Pikksilma suurenduse ja vesiloodi või kompensaatori täpsuse järgi eristatakse kõrgtäpseid, täpseid ja tehnilisi nivelliire. („Nivelliir“, i.a)

Markšeiderivõrkude tasandamine – Markšeiderimõõtmise tulemuste matemaatiline töötlemine, mille käigus leitakse mõõdetud elementide tasandatud väärtused või parandid, mis eemaldavad liigsetest mõõtmistest tulenevad ebakõlad tasandatavate väärtuste või nende funktsioonide vahel. Tasandamise käigus antakse ka hinnang mõõtmistulemuste täpsusele. (Errapart, 2019)

EGF – Eesti Geoloogiateenistuse Geoloogiafond

VKG – Viru Keemia Grupp

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

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

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

1.Sissejuhatus

Uus-Kiviõli II kaevandus on Eesti uusim põlevkivikaevandus, mis alustas tööd 2024. aastal osalise tootismahuga. Täisvõimsuse saavutamine on kavandatud aastaks 2028. Selle rajamine on tihedalt seotud Ojamaa kaevanduse ressursi ammendumisega.

Allmaakaevanduste arendamine ja käigushoidmine nõuab täpset ja ajakohast ruumiinfot, mis on vajalik ohutuse, töö efektiivsuse ning keskkonna- ja tööohutuse nõuete täitmise tagamiseks. Markšeideritööde keskmes on kaeveõõnte mõõdistamine ja dokumenteerimine, geodeetiliste tugivõrkude rajamine ning kaevandatud mahtude arvutamine.

Eestis on seni kasutatud valdavalt traditsioonilisi mõõdistusmeetodeid, mis põhinevad tahhümeetrilistel mõõtmistel, laserkaugusmõõtjatel ning 2D-andmete töötlemisel AutoCADi või GIS-tarkvara abil. Kuigi need meetodid on praktikas laialdaselt levinud, kaasnevad nendega mitmed piirangud. Eelkõige ei võimalda need täpselt kaardistada kaeveõõnte seinte, lagede ja põrandate ebatasasusi. Samuti on piiratud ruumiliste mudelite loomise võimalused, mis raskendab geomeetrilist analüüsi ja andmepõhiste otsuste tegemist. Lisaks võib mõõdistusprotsess olla aeganõudev ning nõuab töötajate viibimist ohtlikes tööpiirkondades.

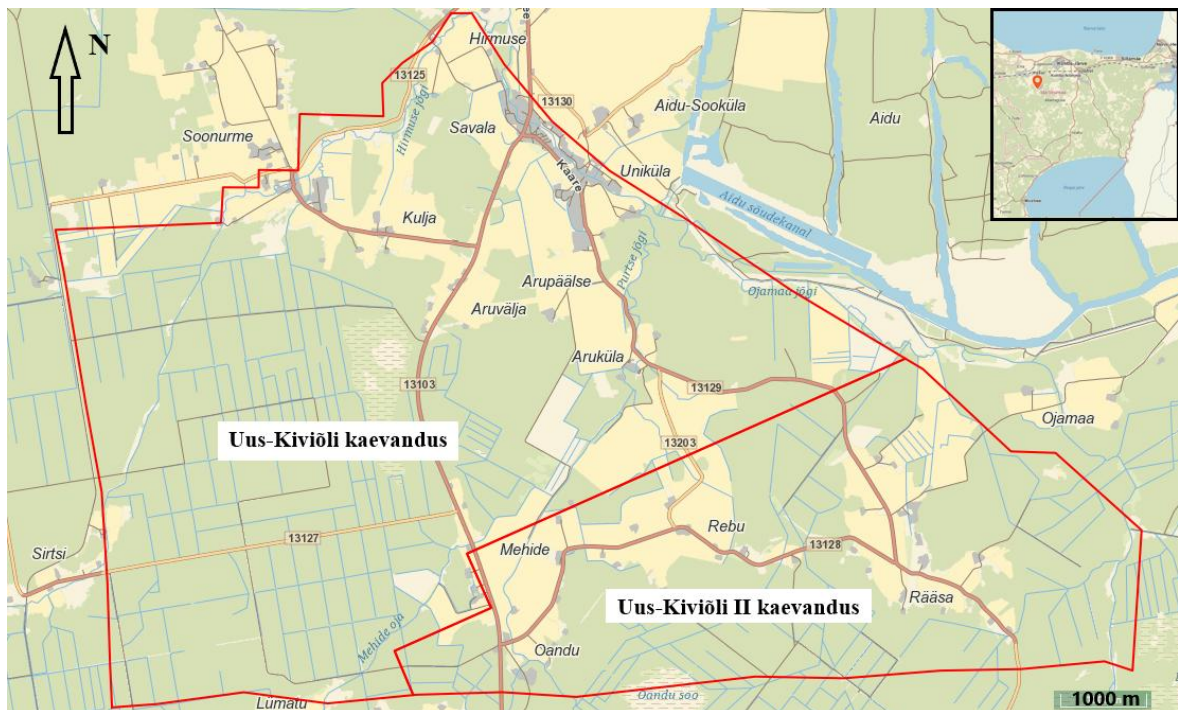
Teadaolevalt on mujal maailmas üha enam kasutusel kaasaegsed ja ohutumad mõõdistusmeetodid, sealhulgas mobiilsed laserskannerid, mis võimaldavad koguda andmeid kiiresti ja täpselt ka keerukates allmaatingimustes. Seetõttu on Uus-Kiviõli II kaevanduse rajamisel sobiv hetk üle minna kaasaegsematele ja efektiivsematele mõõdistustehnoloogiatele.

Käesoleva töö eesmärk on näidata, et kaevanduskäikude ja allmaarajatiste mõõdistamine mobiilsete laserskanneritega on täpsem, kiirem ja ohutum kui senised traditsioonilised meetodid. Töö käigus katsetati nelja erinevat mobiilset laserskannerit Uus-Kiviõli II ja Ojamaa kaevandustes. Saadud andmed töödeldi Hades Geodeesia OÜ kontoris spetsiaalse tarkvara abil, mille tulemusena koostati mäetööde plaan ning visualiseeritud 3D-mudel allmaakäikudest ja nende seisukorrast. Seejärel analüüsisin ja võrdlesin tulemusi traditsiooniliste mõõtmismeetodite tulemustega.

2. Uus-Kiviõli kaevevälja mäenduslik iseloomustus

Uus-Kiviõli (Enefit Industry AS) ja Uus-Kiviõli II (VKG Kaevandused OÜ) kaevandused paiknevad Ida-Virumaal Lüganuse valla Savala, Uniküla, Kulja, Arupäälse, Aruküla, Aruvälja, Mehide, Hirmuse, Sirtsu, Aidu, Lümatu, Veneoja, Soonurme, Rebu, Rääsa, Oandu ja Ojamaa külates, lisaks ulatub Uus-Kiviõli II kaevandus Alutaguse valla Kiiikla ja Võrnu küla territooriumile (Joonis 1). Mõlemad kaevandused on osa Eesti põlevkivimaardlast. (Alkranel OÜ, 2022)

VKG-I (Viru Keemia Grupp) on käesoleval ajal kaks töötavat kaevandust. Uus-Kiviõli II kaevandus alustas alates 2024. aastast töötamist osalises mahus ja 2028. aastaks on planeeritud saavutada maksimaalne tootmiskaht, pärast seda, kui Ojamaa kaevandus lõplikult ammendub. Esimesed kambriplokid alustavad tööd 2027. aastal. Uus-Kiviõli II kaevandus, mis asub 30 meetri sügavusel, hakkab suures osas kasutama Ojamaa kaevanduse töötajaid, tehnikat ja taristut.



Joonis 1. Uus-Kiviõli ja Uus-Kiviõli II mäeeraldise piir, mis on märgitud punasega. Uuringuala asukoht Eestis on kujutatud väljalõikekaardil, kus see on tähistatud oranži märgisega (Maa- ja Ruumiamet, 2025).

2.1. Uus-Kiviõli uuringuväli

Uuringuväljal on kaks mäeeraldist, põlevkivi kaevandamise load on kehtivad 2019. aastast:

L.MK/329491 – Uus-Kiviõli kaevandus, kaevandamisloa omanik on Enefit Industry AS (Keskkonnakaitselubade register, i.a).

L.MK/333343- Uus-Kiviõli II kaevandus, kaevandamisloa omanik on OÜ VKG Kaevandused (Keskkonnakaitselubade register, i.a).

EGF-i (Eesti Geoloogiateenistuse Geoloogiafond) andmetel on Uus-Kiviõli UV piirkonnas tehtud geoloogilisi uuringuid alates aastast 1948. Geoloogiline detailuuring tehti Uus-Kiviõli UV alal aastatel 1952 – 1953 ja täiendav uuring 1968. Hiljem on uuringuvälja põlevkivivaru põhjalikumalt ümber hinnatud aastatel 1995 ja 2007. (Tamm jt, 2021)

Uus-Kiviõli UV põhjapiiriks on endise Kiviõli ja Kütte-Jõu kaevanduse altkaevandatud ala, läänes piirneb uuringuväli Sonda UV-ga ja lõunas Oandu UV-ga. Idapiiriks on Purtse mattunud ürgoru lääneserv, kus põlevkivikiht on ära kulutatud. (Tamm jt, 2021)

2.2. Varu suurus

Uus-Kiviõli kaevanduse mäeeraldise pindala on 4130,54 ha ning mäeeraldise teenindusmaa pindala on 169,8 ha, põlevkivi aktiivse tarbevaru (kaevandatava varu) kogus on ca 138,5 miljonit tonni. Uus-Kiviõli II kaevanduse mäeeraldise pindala on 2076,06 ha ning põlevkivi aktiivse tarbevaru kogus on ca 69,4 miljonit tonni (Tabel 1).

Tabel 1. Aktiivse ja passiivse tarbevaru suurus plokkide kaupa (Maa- ja Ruumiameti maardlate kaardirakendus, i.a).

Nimetus	Ploki liik	Varu suurus, tuh.t	Pindala, ha
Uus- Kiviõli kaevandus (nr. L.MK/329491)			
1 plokk	aT- aktiivne tarbevaru	54155.0	1617,15
2 plokk	aT- aktiivne tarbevaru	65098.73	1937.47
3 plokk	aT- aktiivne tarbevaru	19229.867	575.92
Kokku		138483.597	4130.54
Uus- Kiviõli II kaevandus (nr. L.MK/333343)			
5 plokk	pT- passiivne tarbevaru	97.0	2.88
6 plokk	aT- aktiivne tarbevaru	9485.27	282.3
7 plokk	aT- aktiivne tarbevaru	59797.133	1790.88
Kokku		69379.4	2076.06

Uus-Kiviõli II mäeeraldisel (keskkonnaluba L.MK/333343), mis kuulub VKG-le, võib kaevandada kuni 5 miljonit tonni aastas. See on aga lubatud ainult juhul, kui Enefit Industry kuuluval Uus-Kiviõli mäeeraldisel (keskkonnaluba L.MK/329491) samal ajal kaevandamist ei toimu. Kui maavara kaevandamise aruande alusel selgub, et Enefit Industry on Uus-Kiviõli kaevanduses alustanud kaevandamist, siis rakendub Uus-Kiviõli II kaevandusele vähendatud maksimaalne aastane kaevandamismäär – 2 miljonit tonni.

2.3. Tootuskihi F₂- A ehitus, lasumistingimused ja kvaliteet

Tootus põlevkivikiht koosneb 8 põlevkivikihist ja nende vahel olevatest paekihtidest. Tootuskihi lasumissügavus kaeveväljal on 10,53 meetrist põhjas kuni 52,51 meetrini lõunas. Lasumissügavuse suurenemine toimub lõuna ja edela suunas. Tootuskihi põhja absoluutsed kõrgusmärgid on 8,63 meetrist 32,16 meetrini. Tootuskihi paksus koos paekivi vahekihtidega kõigub 2,30 kuni 3,05 meetrini, keskmine paksus kaeveväljal on 2,69 meetrit. Põlevkivikihtide paksus kõigub 1,72 kuni

2,59 meetrini, keskmiselt 2,17 m. Domineeriv tootuskihi paksus mäemassi jaoks on 2,50 – 2,90 m (87%) ja põlevkivikihtide summa on 2,00 – 2,40 m (87%). (Mazin jt, 2024)

Tootuskihile on omane ühtlane kütteväärtus. Tootuskihi kütteväärtus kõigub 7,17 MJ/kg kuni 10,69 MJ/kg, keskmine 8,3 MJ/kg. Ülekaalus (72% proovidest) on tootuskihi kütteväärtus 7,53 – 8,79 MJ/kg. Põlevkivikihtide kütteväärtus tootuskihis kõigub 8,72 kuni 13,47 MJ/kg, kaevevälja keskmine 10,64 MJ/kg. Tootuskihi kõigi põlevkivikihtide domineerivaks (72%) kütteväärtuseks on 9,63 – 11,72 MJ/kg. (Mazin jt, 2024)

Põlevkivi varu arvutus põhineb Vello Kattai 1995. aasta aruandel „Eesti põlevkivimaardla varu ümberarvutamine (seisuga 01.01.1995)“. Põlevkivikihi kvaliteet ja varu on arvutatud kihtides A–F₁. Kiht F₂ jäeti madala kütteväärtuse tõttu varu arvutusest välja (Kattai jt, 1995, viidatud Veersalu, 2019 kaudu).

2.4. Geoloogiliste plokkide kvalitatiivne iseloomustus

Tootsa kihindi keskmised kvaliteedinäitajad plokkide kaupa on toodud tabelis 2. Esitatud on kolme ploki andmed, sealhulgas keskmine tootuskihi paksus, põlevkivikihtide summaarne paksus ning kaevis ja põlevkivi kütteväärtused. Näitajad on plokkide lõikes üsna sarnased, viidates geoloogiliste tingimuste ühtlusele.

Tabel 2. Uus-Kiviõli kaevevälja põlevkivikihi näitajad (Mazin jt, 2024).					
Ploki nr	Kihi indeks	Keskmine tootuskihi paksus, m	Põlevkivikihtide summaarne paksus, m	Kaevis kütteväärtus, MJ/kg	Põlevkivi kütteväärtus, MJ/kg
1	F1-A	2,60	2,08	8,60	11,10
2	F1-A	2,58	2,10	8,84	11,31
3	F1-A	2,60	2,10	8,87	11,68

2.5. Põlevkivi tööstuslike kihtide kvalitatiivsed omadused

Kiht A lasub põlevkivikihi allosas ja kujutab endast nõrgalt savikat pruuni põlevkivi peeneteralise fauna jäänustega ja ilma pae konkretsioonideta. Kihi alumine piir on terav, ülemine veidi laialivalgus sujuva üleminekuga lubjakiviks. Kihi paksus on 8 kuni 30 cm. Kiht lasub peaaegu ühtlaselt. Kütteväärtus on vahemikus 10,08 – 21,17 MJ/kg (2409 – 5058 kcal/kg), ülekaalus 13,40 – 17,58 MJ/kg (3200 – 4200 kcal/kg).

Kiht A/A' – hall lubjakivi. Kihi paksus on ebaühtlane ja kõigub 2 kuni 7 cm, keskmine 7 cm. Mõnikord see kiht puudub. Kütteväärtus – 2,15 MJ/kg (515 kcal/kg).

Kiht A' – rohekaspruun merglisaldusegaga põlevkivi, sisaldab peeneteralisi bituminoosse lubjakivi mugulaid, raske ja tihe. Kihi paksus on 3 kuni 14 cm, keskmiselt 8 cm. Kütteväärtus on vahemikus

2,87 kuni 13,35 MJ/kg (685 – 3189 kcal/kg), keskmine 7,15 MJ/kg (1708 kcal/kg). Lõunasuunas kvaliteet langeb.

Kiht A'/B ehk „sinine paas“ – savikas lubjakivi, sinakashalli värvi, nõrgalt kerogeenne, piirid põlevkivikihtidega selged ja sirged. Kihi paksus on 4 kuni 22 cm (ülekaalus paksus 5 – 15 cm), keskmiselt 12 cm. Kütteväärtus on vahemikus 0 – 2,20 MJ/kg (0 – 527 kcal/kg). Keskmine kütteväärtus on 1,26 MJ/kg (302 kcal/kg).

Kiht B – helepruun põlevkivi, kergelt savikas, milles on palju fauna jäänuseid, mis põhjustab peenekihtilisuse. Kihi keskosas, harvem ülemises ja alumises osas esineb üksikuid õhukesi vahekihte koos suurte kerogeensete lubjakivi suletistega. Fauna jäänuseid esineb nii põlevkivis kui ka lubjakivi suletistes. B kihi paksus on vahemikus 25 kuni 59 cm, enamasti 35 – 50 cm, keskmine paksus 42 cm. Kihi kütteväärtus on piirides 9,87 MJ/kg (2657 kcal/kg) kuni 22,58 MJ/kg (5393 kcal/kg), enamasti 14,65 – 20,10 MJ/kg (3500-4800 kcal/kg), keskmiselt kaeveväljal 16,46 MJ/kg (3932 kcal/kg).

Kiht B/C „Rusikas“ – detriitsed lubjakivid, hallid, kerogeenisisaldavad, tihedad. Keskosas on mõnikord põlevkivi vahekiht 6 – 7 cm. Kihi paksus kõigub suurtes piirides 2 kuni 25 cm, keskmiselt 9 cm. Keskmine kütteväärtus – 3,34 MJ/kg (845 kcal/kg).

Kiht C – põlevkivi on tumepruun, savikas, lõheline. C kihile on iseloomulik kerogeense lubjakiviga täidetud ussikäikude esinemine kihi ülemises osas, millede ristlõige on kas ümar või ovaalne diameetriga kuni 1 cm. Kihis esinevad piklikud ja hobuserauakujulised lubjakivimugulad. Harvem esineb üksikuid lubjakivi vahekihte paksusega 1 – 5 cm. Lubjakivi suletised on täheldatavad kogu kihi ulatuses. Kihi paksus on vahemikus 10 kuni 64 cm. (ülekaalus 20 – 40 cm), keskmine 34 cm. Kihi paksuse kõikumine on tingitud sellest, et lubjakivi vahekihti kohati ei ole ja seepärast on ka kihi piirid ebaühtlased. Kihi väikseim kütteväärtus on 3,92 MJ/kg (937 Kcal/kg), levinum 7,11 – 11,30 MJ/kg (1700 – 2700 kcal/kg). Kütteväärtus suureneb ida suunas. Kihi C keskmine kütteväärtus on 10,13 MJ/kg (2421 kcal/kg).

Kiht C/D nn. kaksikpaas on tumehall, tihe, peeneteraline lubjakivi. Kaksikpaas esineb kõigis kihindi läbilõigetel. Kihi paksus on 15 kuni 33 cm, keskmine 21 cm. Kihi **C/D** ülemine kontakt on ebaühtlane.

Kiht D – hästi savikas põlevkivi (mõnikord kerogeenisisaldav mergel) pruunikas-hall roheka varjundiga, raske, löögi puhul puruneb plaatideks. Kihil on tugev kontakt alumise ja pealmise lubjakivi kihtidega ja eraldub nendest raskelt. Paksus on 5 kuni 20 cm, (levinum 5 – 10 cm) keskmiselt 10 cm. Kütteväärtus 5,18 MJ/kg (1238 kcal/kg) kuni 14,85 MJ/kg (3548 kcal/kg), keskmiselt 9,47 MJ/kg (2262 kcal/kg).

Kiht D/E – „roosa paas“ – kerogeeni sisaldav lubjakivi, värvus hallist kuni tumehallini koos roosa varjundiga. Paksus 3 – 5 cm (levinum 5 – 10 cm). Keskmine paksus 8 cm. Kütteväärtus 1,85 MJ/kg kuni 3,29 MJ/kg (442 – 786 kcal/kg), keskmine kalorsus – 2,5 MJ/kg (601 kcal/kg).

Kiht E – savikas, pruun põlevkivi. Kihi ülemises osas kerogeensed lubjakivi konkretsioonid mõõtmatega mürdosadest kuni 4 – 7 cm. Lubjakivi konkretsioonides esinevad püriidi ääristused ja väikesed üksikud lohud. Harvem esineb üksikuid lubjakivi vahekihte paksusega kuni 4,5 cm. Kihi paksus on 40 – 55 cm, keskmiselt 47 cm. Alumine kihi **E** puutepind on ebaühtlane. Kihi kütteväärtus

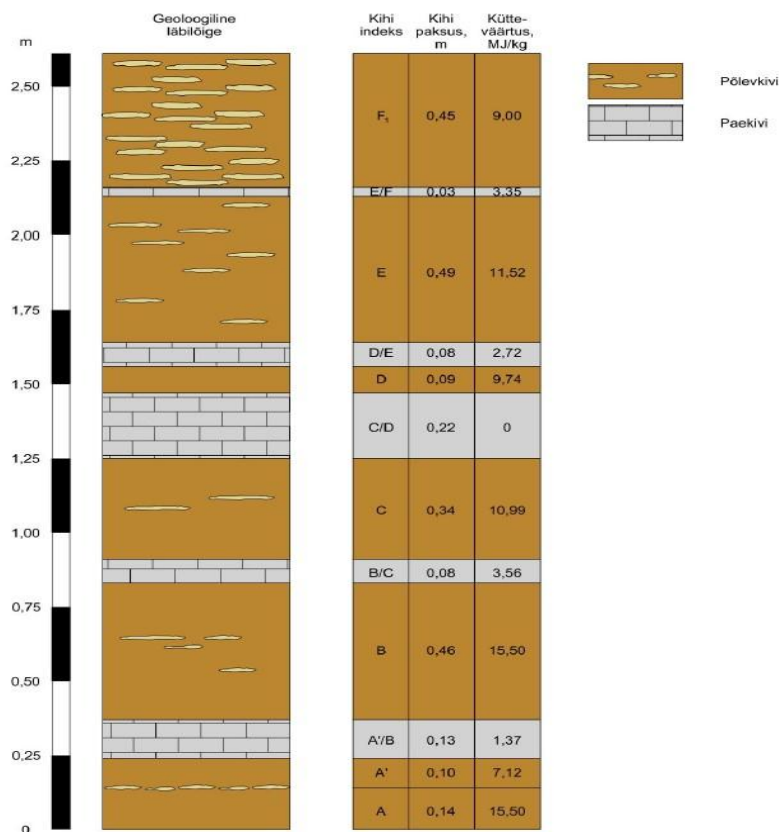
on vahemikus 5,95 MJ/kg (1421 kcal/kg) kuni 16,65 MJ/kg (3978 kcal/kg), keskmiselt 10,88 MJ/kg (2598 kcal/kg).

Kiht E/F₁ kujutab endast helehalli kerogeenset lubjakivi, ebaühtlase kontaktiga. Keskmine kihi paksus on 6 cm, kütteväärtus on 2,98 MJ/kg (712 kcal/kg).

Kiht F₁ – tumepruun põlevkivi paljude konkretsioonide ja kerogeensete lubjakivi vahekihtidega (30 – 45%). Põlevkivi on savikas, raske, fauna jäänustega. Kihi paksus on 17 kuni 62 cm, keskmine – 41 cm (levinud kihi paksus 35 – 50 cm). On täheldatav mõningane kihi paksuse vähenemine lõunasuunas. Kütteväärtus oleneb lubjakivi sisaldusest ja on 4,54 MJ/kg kuni 11,76 MJ/kg (1084 – 2809 kcal/kg), keskmiselt 8,79 MJ/kg (2100 kcal/kg). Kihi levinud kütteväärtus 1800 – 2800 kcal/kg. Kütteväärtuse halvenemine toimub lõuna suunas.

Kiht F₂ lasub tootsa kihindi laes ja kujutab endast väga savikat põlevkivi, mille värvus jääb rohekaspruuni ja tumepruuni piiridesse. Kiht F₂ on analoogne kihiga F₁. Kihtide vaheline piir on tinglik, kihtide jaotus toimub suurema arvu lubjakivi suletiste järgi (kuni 50 – 65%). Lubjakivi vahekihtide paksus on kuni 7 cm, konkretsioonide mõõtmed kuni 6x7 cm ja nad on ebakorrapärase kujuga. Kihi paksus varieerub vahemikus 12 – 41 cm, keskmine – 23 cm. Kihi F₂ keskmine kütteväärtus – 4,64 kcal/kg. Bilansiliste varude hulka kiht F2 ei kuulu. (Mazin jt, 2024)

Põlevkivikihindi ehitus on kujutatud joonisel 2.



Joonis 2. Kihindi ehitus Uus-Kiviõli kaevevälja piires (Veersalu, 2019).

2.6. Kaevevälja hüdrogeoloogiline iseloomustus

Kaevandusse tungiva põhjaveevoolu moodustavad Kvaternaari, Ordoviitsiumi, Ordoviitsiumi – Kambriumi ja Kambrium – Vendi veekompleksid. Pinnaseveetase on vabapinnaline ning on keskmiselt 1 – 2 m maapinnast. Veetase sõltub suuresti maapinna reljeefist ja ilmastikust.

Ordoviitsiumi veekompleksi vettandvateks kihtideks on valdavalt lõhelised paekivid. Ordoviitsium – Kambriumi veekompleksi vettandvaks kihiks on tsementeerunud liivakivi.

Kvaternaarisetete vesi on esindatud jääjärveliste, jõe- ja mattunud orgude setete ja saviliiva- ja kruusaläätsede ning vahekihtide veest.

Soosetete vesi on alal laia levikuga. Suuremates turbarabades on turbakihi keskmine paksus 3,0 m ja väiksemates 2,0 – 2,5 m. Turvas lasub jääjärvelise ja järvelise päritoluga liivsavil, savil ja peeneteralisel liival. Kevadeti langeb veetase kokku maapinnaga, kuivemal aastaajal veetase langeb 0,5 – 1,0 m maapinnast. Filtratsioonikoefitsient on 1 m/ööp.

Jääjärveliste setete vesi on levinud 0,5 – 4,0 m paksusega keskmise-, peene- ning pisiteralistes liivades. Veetase on maapinnast 0,5 – 2,0 m sügavusel.

Jõe- ja mattunud orgude setete vesi levib kuni 500 m laiuse ribana Purtse ja Ojamaa jõe orus ning Savala mattunud orus. Purtse ja Ojamaa kaasaegsed setted lamavad Savala mattunud oru iidsetel setetel ning need on omavahel hüdrauliliselt seotud. Vettandva kihi paksus on 10 – 30 m ning veekiht levib 500 m ribana, mis moodustab kaeveväljale loodusliku idapiiri, lõikudes aluspõhjakiivimitesse ja lõhkudes geoloogilis-hüdrogeoloogilise läbilõike. Kaasaegsete jõe setete paksus jääb vahemikku 0,5 – 2,0 m. Vettandvad kivimid on kruus ja aleuriidid. Filtratsioonikoefitsient on 3,6 m/ööp ja veetaseme sügavus maapinnast on 2,0 – 3,0 m, veetase alaneb põhja suunas.

Saviliiva- ja kruusaläätsede ning vahekihtide vesi levib moreenis. Moreen on vähese veeandvusega, veekihi paksus on kuni 3,0 m ning veetase on maapinnast 1,5 m sügavusel. Moreen lasub aluspõhjakiivimitel ning koosneb jädepurdsest väheümardunud karbonaatmoreenist. Filtratsioonikoefitsient on 0,2 – 4,0 m/ööp.

Kvaternaarseadmed ladestavad sademevett ning avaldavad reguleerivat mõju alumiste veekihtide toitumisele.

Ordoviitsiumi veekompleks

Nabala-Rakvere veekiht – vettandvateks kivimiteks on savikad ja kavernoossed lõhelised lubjakivid. Veekiht levib kaevevälja lõunaosas ning kiildub välja ala edelaosas. Veekihi paksus kaevevälja edelaosas on 7,0 m, suurenedes lõunaosas kuni 25 meetrini. Alumiseks veepidemeks on Oandu ja Keila lademe ülemise osas mergel ja savikas lubjakivi ning ülemine veepide praktiliselt puudub, veekiht on seotud Kvaternaari setete veega. Filtratsioonikoefitsient on vahemikus 2,0 – 7,0 m/ööp.

Keila-Kukruse veekiht – vettandvate kivimite keskmiseks paksuseks on 18 – 30 m ning selle moodustavad Ülem-Ordoviitsiumi Keila, Jõhvi, Idavere ja Kukruse lademe lõhelised, kohati kavernoossed ja dolomiidistunud lubjakivid. Kaevevälja põhjaosas veekihid väljuvad Kvaternaari setete alla, Oandu lademe savikas lubjakivi moodustab ülemise veepideme ala lõunaosas. Alumise veepideme moodustab Uhaku lademe savikas lubjakivi, mis katkeb Savala mattunud ürgoru keskosas. Veekihi veerikkus on ebaühtlane, mis sõltub kivimite purustusastmest ning teine lõhelisusest. Kindlaks on tehtud kaks lõhede süsteemi, üks on kirdesuunaline 60 – 70° ning loodesuunaline 320 – 330°, esineb kihindumislõhesid. Keskmine filtratsioonikoefitsient on 16 m/ööp.

Lasnamäe-Kunda veekiht – levib Kesk-Ordoviitsiumi ajastu Lasnamäe lademe ja Aseri kihtide ning Alam-Ordoviitsiumi Kunda lademe lubjakivides ning dolomiidistunud lubjakivides. Veekiht on üldise levikuga ja keskmine paksus on 20 m. Ordoviitsiumi veekompleksi vettpidavaks lasumiks on Uhaku lademe savikad lubjakivid. Alumise veepideme moodustavad Volhovi ja Leetse lademe savikad glaukoniitlubjakivid ja liivakivid ning Pakerordi lademe graptoliitargilliit. Filtratsioonikoefitsient on 0,3 – 2,5 m/ööp.

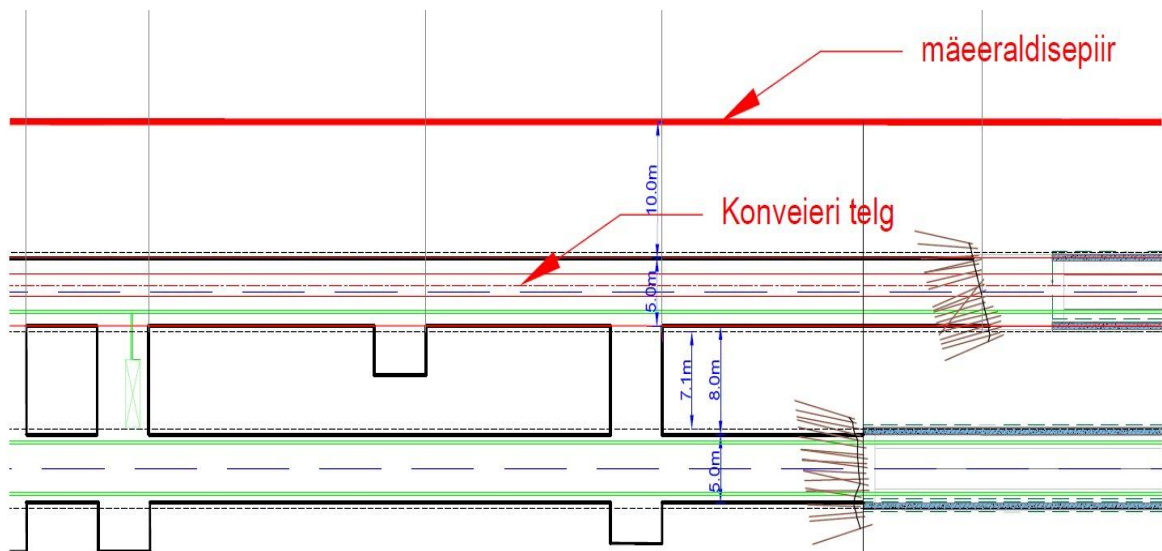
Ordoviitsiumi – Kambriumi veekiht – vettandvate kivimite keskmine paksus on 22 m ning need koosnevad peamiselt Alam-Ordoviitsiumi Pakerordi lademe ja Kesk-Kambriumi Tiskre ning Pirita kihistu peeneteralistest ja keskmiseteralistest liivakividest. Harva esineb ka aleuriidi vahekihte. Kambriumi savid moodustavad vettpidava lamami. Tegemist on survele veekihiga, mille tase alaneb kaevevälja põhjaosas. Filtratsioonimoodul 2,0 – 3,0 m/ööp. (Veersalu, 2019)

3. Tehnoloogiline osa

3.1. Uus-Kiviõli II kaevevälja avamine

Uus-Kiviõli kaevevälja avamine toimub maapinnalt kahe šahtiga: konveieri kaldšahtiga ja transpordi kaldšahtiga. Kaldšahtid asuvad kaevanduse tööstusterritooriumil- mäeeraldis katastri nr 43801:001:0126 (Uus-Kiviõli kaevandus) Uus-Kiviõli kaevevälja põhjapiiril. Šahtide suund on kirdest edela suunas asimuudiga 246°. (Mazin jt, 2024)

Peakonveieri telg asub 12,5 m kaugusel Uus-Kiviõli I ja Uus-Kiviõli II vahelisest piirist. Tulevase barjäärterviku formeerimiseks Uus-Kiviõli I ja Uus-Kiviõli II vahel on kaeveväljade eraldusjoonest kantud maha 10,0 m laiune joon (Joonis 3). Kaeveõõned Uus-Kiviõli kaeveväljal läbindatakse selle joone järgi. See ei takista võimalust kaevandada kaevevälju eraldi või koos. Peašahtide vahelise terviku laius on 7,0 meetrit. Šahtid on omavahel ühendatud lõõridega. Šahtides on ette nähtud tehnoloogilised nišid. (Mazin jt, 2024)



Joonis 3. Peakaldšahtide ja mäeeraldisepiiri plaan (Mazin jt, 2024).

3.2. Kaevevälja ettevalmistamine. Kaevandamisviisid.

Kaevevälja ettevalmistus sisaldab mäetöid, mis on seotud kaeveõõnte läbindamisega kivimites ja kasulikus kaevis kihis, mis kindlustavad järgnevate ettevalmistus- ja koristustööde läbiviimise. Kaevevälja ettevalmistamise käigus luuakse tuulutuse, veekõrvalduse, elektrivarustuse, inimeste ja veoste transpordi kommunikatsioonid. (Mazin jt, 2024)

Kaeveväli on jagatud erinevate kaevandusloa omanike vahel. See asjaolu paljuski määrab kaevevälja avamisviisi. Kaevevälja avamisviis on ühetiivaline. Peastrekid läbindatakse piki kaeveväljade piiri. (Mazin jt, 2024)

Paneelide väljamine on vastupidine- peastrekkidest kaevevälja lõunapiiri poole. Omavahel eraldatakse paneelid tinglikult paneeli transpordi- ja tuulutustrekkidega. Konveierpaneelstrekid planeeritakse üle ühe paneeli (piki esimest ja kolmandat paneeli). (Mazin jt, 2024)

Paneelide väljamiseks kasutatakse kamber kaevandamist tulptervikutega ja kamberplokkide väljamist kahe poolplokiga ühisele kogumisstrekkile. Kamberplokki ettevalmistamiseks läbindatakse ettevalmistuskaeveõõned- üks kogumisstrekk ja üks või kaks külgstrekki. Samuti paralleelselt magistraalstrekkidega läbindatakse lõigustuskaeveõõned. Ploki laius tavalises situatsioonis valitakse lähtudes tehnilis-majanduslikust põhjendusest arvestades optimaalset kaevise veokaugust eest kuni konveierini, kopplaadurite marki ja kambrite ja tervikute mõõtmeid. Konkreetsetes situatsioonis sõltub iga ploki laius karstirikete asukohast. Kaevanduse töö algperioodil, läbindustööde mahu vähendamiseks on, esimesel kahel paneelil kasutusel paneel-plokk väljamissüsteem, kus väljatav ala on piiratud paneelstrekkidega ja karstirikete tinglike joontega. Ettevalmistuskaeveõõned (algloõrid, laadimispunktide kaeveõõned) läbindatakse tavalisel meetodil enne koristustöid. Järelkaeveõõned (külgstrekid) formeeritakse vahetult koristustöödega koos tuulutustöke rajamisega ee edasiliikumise järel. Kasutatakse puur-ja lõhketöödega raimamist. (Mazin jt, 2024)

3.3. Peakaeveõõned

3.3.1. Peakaldšahtid

Uus-Kiviõli II kaevanduse kaldšahtid kujutavad endast kaldkaeveõõsi, mis väljuvad maapinnale. Üks kaldšahtidest (transpordikaldšaht) on ette nähtud iseliikuvate mäemasinate maa alla transportimiseks, samuti inimeste ja materjalide transpordiks spetsiaalsete masinatega. Teine (konveieri) šaht on ette nähtud lintkonveieri paigutamiseks. Lintkonveieriga hakkab toimuma kaevise transport maa peale ja sealt edasi rikastusvabrikusse. Transpordikaldšahti pikkus on 248 m, kaldenurk 6,5°. (Mazin jt, 2024)

Konveierikaldšahti kaldenurk muutub vastavalt lintkonveieri konstruktsioonile. Maksimaalne kalle 8° on šahti ülemises osas, järgmise osa kalle on 4,5° ja pikkus 42,6 m, ülejäänud osa kalle kuni kihindi põhjani on 6,5°, pikkusega 135,4 m. Konveierikaldšahti kogupikkus on 245 m. (Mazin jt, 2024)

Ehituslikud osad kvaternaarsestes ehitatakse avatud meetodil puur- ja lõhketööde ja ekskavaatori abil (kaevik maapinnal). Ülejäänud osad (maa-alused) läbindatakse puur-ja lõhketöödega ülevalt alla kuni kihi põhjani. Mäemassi laadimine ja transport eest toimub ca 10-tonnise kandevõimega kopplaaduriga. Raamtoestiku paigaldamine toimub selleks sobiva kopplaaduriga. Puuraukude puurimine ette ja lakke toimub puurmasinatega, mis sobivad selle protsessi jaoks. Aheraine šahtidest veetakse maapinnale vahelattu. Šahtide toestamine sõltub laekivimite kandevõimest. Püsivate kivimite puhul kasutatakse ankurtoestust, ebapüsivates kivimites ja keerukates lae üleminekutes metallraame koos ankurtoestusega. Kaldšahtide suudmed (šahtide lahtine osa) toestatakse monoliitse raudbetoontoestikuga, mis koosneb monoliitsetest seintest ja raudbetoonist kattest. (Mazin jt, 2024)

3.3.2. Kaevandushoov ja peamised avamisstrekid

Peamised magistraalsed kaeveõõned on: peakonveieristrekk, peatranspordistrekk nr 1, peatranspordistrekk nr 2 (vastassuunas). Kaeveõõned asuvad piki kaeveväljade piiri ja on suunatud põlevkivikihi laskumise suunas. Kaeveõõnte suuna asimuut on 246° edelasse. Kaeveõõnte mõõtmed, läbinduse mahud ja toestiku liigid tuuakse välja allpool tabelis 3. Arvutuslikud parameetrid on võetud kooskõlas projekteerimisülesandega. (Mazin jt, 2024)

Tabel 3. Peamagistraalkaeveõõnte iseloomustus (Mazin jt, 2024).

Jrk nr	Kaeveõõnte nimetus	Pikkus, m	Laius, m	Kõrgus, m	Ristlõige, m ²	Toestuse liik
1	Peakonveieristrekk	360*	5,5	3,2	17,6	Ankurtoestik, karstiriketes puit ja metallraamid
2	Peatranspordistrekk (nr 1)	360*	5,5	4,58** (3,90)	25,19 (21,45)	Ankurtoestik, karstiriketes puit ja metallraamid
3	Tagasilikumise transpordistrekk (nr 2)	360*	5,5	4,58** (3,90)	25,19 (21,45)	Ankurtoestik, karstiriketes puit ja metallraamid

*- Arvestades kaevevälja avamise iseärasustega, vajadusega vähendada läbindustööde mahtusid projektvõimsusele väljumise perioodil, peamagistraalkaeveõõsi ei läbindata kogupikkuses vaid formeeritakse koristustööde käigus paneel – plokis nr 2.1 ja 2.2 (peakaevõõnte kogupikkus on 4916 m)

** - kaeveõõne kõrgus võetakse sõltuvalt mäegeooloogilistest tingimustest ja võimalusel formeeritakse püsiv lagi kõrgusel 3,90 m.

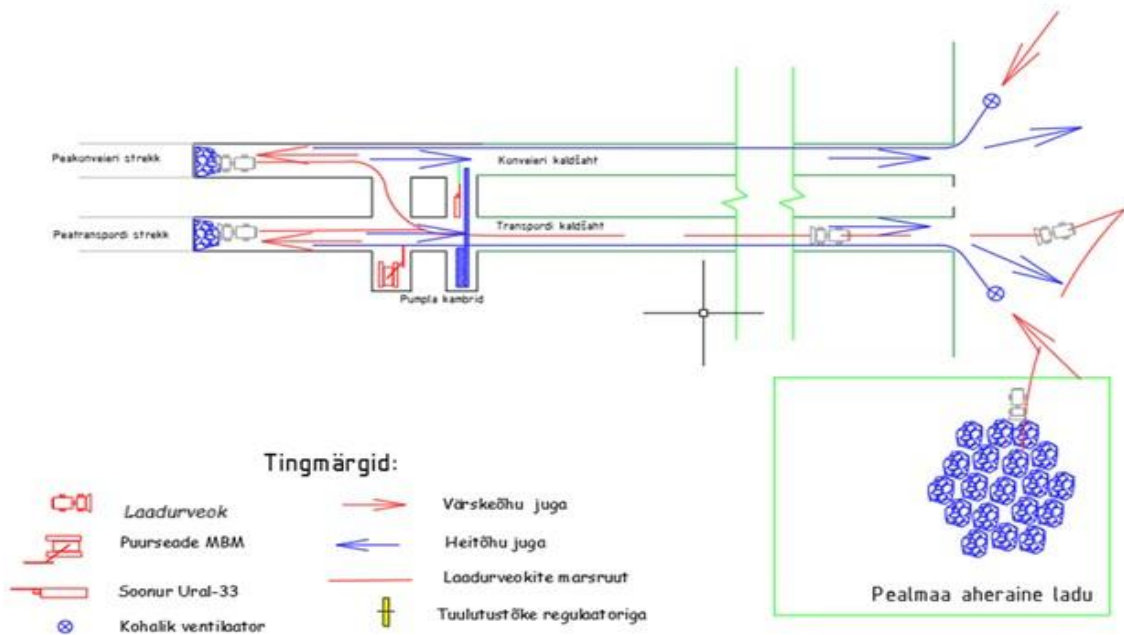
Peamine kaeveõõnte läbindamise meetod- puur-ja lõhketöödega. Kaevandushoovi kaeveõõnte läbindamise meetod on analoogne magistraalkaeveõõnte läbindamise meetodiga. (Mazin jt, 2024)

3.4. Läbindustööde tehnoloogilised skeemid

Läbindustööde tehnoloogia näeb ette puur-ja lõhketöödega kaevisel raimamise, kaevisel laadimise laadurveokiga kalluritele või kaevisel transportimisel laadurveokiga ladustamiskohta, ankurtoestiku kasutamise. Konkreetne tehnoloogiline skeemi valiku variant sõltub kaevanduse kaeveõõnte võrgu arenguetapist, tuulutuskeemist ja läbindusseadmete olemasolust. (Mazin jt, 2024)

3.4.1. Läbindustööde tehnoloogiline skeem kui transpordiks kasutatakse laadurveokeid

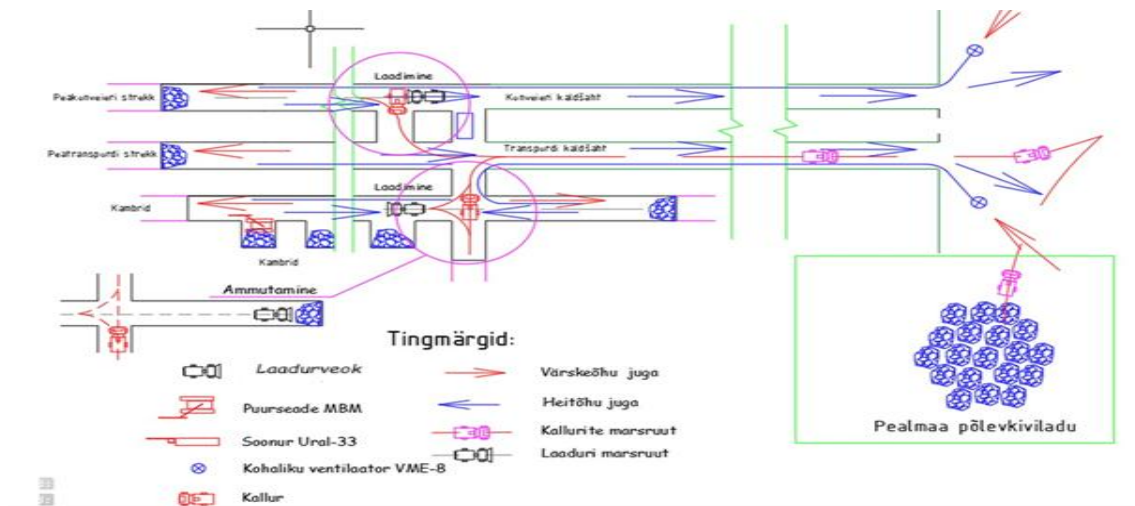
Kaldšahtide ja kaevandusõue kaeveõõnte läbindamise algetapil kasutatakse laadurveokitega transportimise tehnoloogiat (Joonis 4). Lõhatud kaevis laaditakse ja transporditakse maapinnale. Puuraukude puurimine etes toimub iseliikuva puurmasinaga. Ankurtoesiku jaoks puuritakse lakke puuraugud puurmasinaga või käsielektripuurmasinaga SER-1M. (Mazin jt, 2024)



Joonis 4. Läbindamise tehnoloogiline skeem laadurveokiga (Mazin jt, 2024).

3.4.2. Kaeveõõnte läbindamise tehnoloogiline skeem kui laadimiseks kasutatakse laadurveokeid ja kaevis transpordiks kallureid

Selle skeemi erinevus eelmisest seisneb selles, et laadurveokiga laaditakse kaevis kalluritele (Joonis 5). Kallurid omakorda viivad kaevis maapinnale. Selleks läbindatakse läbindusete vahetus läheduses kõrge laega ümberlaadimispunktid, kus laadurveok laadib kallurit. Selline skeem võimaldab suurendada läbindustranspordi läbilaskevõimet, väheneb laadurveoki läbisõit. Seda skeemi soovitatakse kasutada, kui kaeveõõned on šahtidest enam kui 200 m kaugusel. (Mazin jt, 2024)



Joonis 5. Läbindamise tehnoloogilise skeem laadurveokiga ja kalluriga (Mazin jt, 2024).

3.4.3. Kaeveõõnte läbindamise tehnoloogiline skeem kui laadimiseks kasutatakse laadurveokeid, kaevis transporditakse kalluritega kraap- ja lintkonveierile

Sellist tehnoloogilist skeemi saab kasutada pärast mäetööde lõppemist kaevandushoovis, pärast lintkonveieri paigutamist peakonveierstrekki, paneelkonveierstrekki või pärast lintkonveieri paigutamist ükskõik millisesse kambriplokki. Lintkonveieri külje peale või otsa monteeritakse kraapkonveier kompleksis purustiga. Kalluri kasti tühjendamine (või laadurveoki kopa tühjendamine, kui on sobiv transpordikaugus eest) toimub kraapkonveierile. Purustis suured kaevis tükid purustatakse ühtlaseks ja suunatakse lintkonveierile. Lintkonveier transpordib kaevis kaevanduse rikastusvabrikusse. Ülejäänud protsessid on analoogsed. Puuraukude puurimine etes toimub iseliikuvate puurvankritega. Samuti puuritakse puurvankritega lakke puuraukud ankurtoestiku paigaldamiseks. (Mazin jt, 2024)

Erinevad transpordiskeemid on vajalikud suure läbinduskiiruse säilitamiseks peastrekkides ee kauguse suurenemisel. Keskmine prognoositav läbinduskiirus ühe ee puhul koos niššidega on 14 m ööpäevas ehk 294 m kuus. Karstisoonides strekkide läbinduskiirus väheneb. (Mazin jt, 2024)

3.5. Koristustööde tehnoloogia

Koristustöödeks planeeritakse tulptervikutega kamberkaevandamisviisi põhilae tervikutel ülalhoidmisega ja ankurtoestusega vahelae ülalhoidmisega. Põlevkivikihi raimamine toimub puur- ja lõhketöödega, ee edasinihe ühe lõhkamisega on 3,6 – 3,8 m. Lõhatud kaevis laadimine toimub laadurveokiga. Lae toestamine, ee puurimine ja lõhkeaukude laadimine lõhkeainega on mehaniseeritud. (Mazin jt, 2024)

Oodatav keskmine tööviljakus ühe koristuseetoolise kohta on vahemikus 100 – 120 m³/inim/vahetus.

Antud tehnoloogilist skeemi kasutatakse normaalsete mäe-geoloogiliste tingimuste korral ja karstilähedastes piirkondades horisontaalse (või väikse kaldega) kihindi lasumise korral, kihi paksus mitte väiksem kui 2,6 m, 10 kuni 80 m sügavusel lõhelistes, kuid püsivates karbonaatsetes lae ja põhja kivimites. (Mazin jt, 2024)

Kambriploki mõõtmeteks on: laius – see on laius külgstrekkide vahel, pikkus – see on paneeli laius. Uus Kiviõli kaevanduse kambriplokkide parameetrid võetakse järgnevad: laius - 500 m, pikkus - 1000 m. Kambriplokkide laius sõltub paljuski karstianomaaliade asukohast. (Mazin jt, 2024)

Kõik protsessid toimuvad kooskõlas lae juhtimise ja toestuspassiga. Kambrite toestamise järjekord peab vastama kaevise laadimise suunale, külgstrekkist kogumisstreki poole. (Mazin jt, 2024)

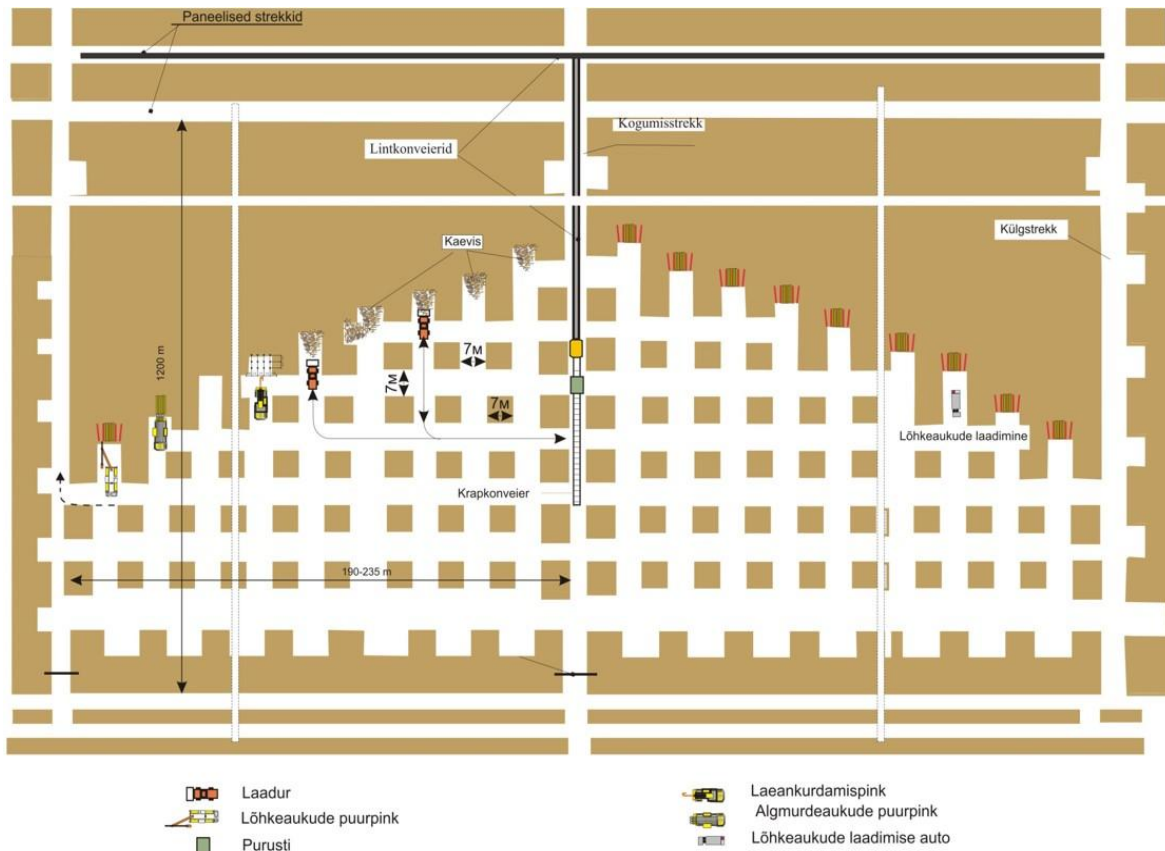
Pärast lae toestamist alustatakse algmurdepuuraukude puurimist. Algmurdepuuraukude puurimiseks kasutatakse ratastel puurmasinat. Selle masinaga saab ühekorraga puurida kolm $\varnothing$ 280 mm ja sügavusega kuni 4,7 m puurauku. Vastavalt puur-ja lõhketööde projektile puuritakse ette kuni 9 algmurde puurauku sügavusega 4,0 m. (Mazin jt, 2024)

Pärast puurimistõid puhastatakse esi puurpurust frontaallaaduriga ja viiakse see kas kraapkonveierile või lähimasse tühjendamata kambrisse. (Mazin jt, 2024)

Lõhkeaukude puurimine toimub iseliikuva puurmasina abil. Puurimissügavus on 4,0 m, puurvarda puurkrooni $\varnothing$ 35 – 37 mm (sissepumbatava lõhkeaine kasutamisel). Lõhkeaukude paigutus ja sügavus on näidatud kambriploki lõhketööde passi projektis. Lõhkeaukude puurimine toimub vastavalt antud puurmasina kasutamise juhendile. (Mazin jt, 2024)

Kirjeldatud tehnoloogilises skeemis kasutatakse sissepumbatavat emulsioonlõhkeainet. Lõhkeaukude laadimine toimub mobiilse laadimisseadme abil, mis on paigutatud autole ja mille kasutamise eeskirjad peavad vastama allmaatööde nõuetele. Emulsioonlõhkeaine valmimine ja lõhkeaukudesse sissepumpamine toimuvad üheaegselt läbi laadimisseadme. (Mazin jt, 2024)

Kaevise transport kambriplokis toimub laadurveokitega, kraap-ja lintkonveieritega. Kaevise transporditakse kambrist toituri-purustile. Toituri-purusti laeb kaevise lintkonveierile. Toituri-purusti asub kogumisstrekis ühel teljel lintkonveieriga. Lintkonveieriga kaevise transporditakse paneelstrekis asuvale lintkonveierile. (Mazin jt, 2024)



Joonis 6. Kambriploki seadmed (Mazin jt, 2024).

4. Laserskaneerimine

Laserskaneerimine jaguneb kaheks põhikategooriaks: aerolaserskaneerimiseks ja terrestriliseks ehk maapealseks laserskaneerimiseks. Aerolaserskaneerimise puhul toimub andmete kogumine õhust. Terrestrilisel laserskaneerimisel teostatakse mõõtmised maapinnalt või selle lähedalt ning seda saab omakorda liigitada staatiliseks ja kinemaatiliseks (mobiilseks) skaneerimiseks. Staatilise laserskaneerimise korral on skanner kindlalt paigaldatud ühte punkti ning jääb mõõtmise ajal paigale. Kinemaatilise laserskaneerimise korral liigutatakse skannerit mõõtmiste ajal eri asukohtadesse nii, et iga uus punktipilv kattub osaliselt eelmise mõõtepunkti punktipilvega, või tehakse skaneerimine pidevas liikumises. (Vosselman ja Maas, 2010)

4.1. Mobiilse laserskaneerimise tehnoloogia

Mobiilse laserskaneerimise puhul on kõige enam kasutusel kaks töömeetodit: peatu-ja-mööda ning pidev skaneerimine. Esimesel juhul paigaldatakse üks või mitu laserskannerit sõidukile, mille tüüp valitakse vastavalt konkreetsele rakendusele. Näiteks linnatänavate skaneerimiseks kasutatakse sageli kaubikuid, samas kui siseruumides piisab tihti käsikärust; samuti võib kasutada autonoomseid sõidukeid või roboteid. Selle meetodi tunnuseks on see, et mõõtmine toimub fikseeritud asendis – skanner jääb skaneerimise ajal paigale. Kui mõõtmine on lõpetatud, liigub sõiduk edasi järgmisesse asukohta ja protsessi korratakse. Sellisel moel saab samm-sammult kaardistada pikemaid või ulatuslikke objekte. (Vosselman ja Maas, 2010)

Peatu-ja-mööda meetodi korral saadakse igast positsioonist punktipilv, mille koordinaadid sõltuvad skanneri konkreetsest asukohast ja telgede suunast. Kuna see meetod sarnaneb oma olemuselt staatilisele laserskaneerimisega, kasutatakse andmete joondamiseks ja globaalsesse koordinaatsüsteemi kandmiseks samu algoritmilisi lahendusi. Punktipilvede usaldusväärseks registreerimiseks on vajalik, et naaberpilvede vahel oleks vähemalt 50% ulatuses kattuvust. Enamasti on skanner suunatud kindlasuunaliselt – näiteks ainult ette või taha. Punktipilvedes esinevate lünkade vältimiseks võib mõõtmisi teostada sama marsruudi vastassuunas (edasi-tagasi meetod) või kasutada panoraamskaneerimist, mis võimaldab laiemat vaatevälja. (Vosselman ja Maas, 2010).

Mobiilse skaneerimise efektiivsust on võimalik suurendada, kasutades pideva mõõtmise meetodit, mille puhul liigub skanneriga varustatud sõiduk ühtlaselt mööda trajektoori ilma peatusteta ning laserskanner salvestab katkematult kahemõõtmelisi profile. Sõiduki liikumisel ühinevad profiilid ning tulemuseks on kolmemõõtmeline punktipilv. Kuna mõõtmine toimub liikumise käigus, on oluline säilitada stabiilne ja ühtlane liikumiskiirus. Kiirus määratakse vastavalt soovitud andmetäpsusele ning kasutatava seadme tehnilistele omadustele. (Vosselman ja Maas, 2010)

Selle meetodi suurimaks väljakutseks on andmete korrigeerimine, kuna iga punkt salvestatakse eri koordinaatsüsteemi alusel. See on oluline erinevus võrreldes peatu-ja-mööda meetodiga ning nõuab skanneri asukoha ja orientatsiooni täpset määramist ajas ja ruumis – globaalses koordinaatsüsteemis ja ühtsel ajaskaalal, tagamaks tulemuste täpsus ja usaldusväärsus. (Vosselman ja Maas, 2010)

4.2. Mobiilse laserskaneerimise tööpõhimõte

Laserskanner saadab välja kiire mõõdetavale objektile ning mõõdab aega, mis kulub kiirel tagasi skannerisse jõudmiseks. Kuna teada on ka kiire horisontaal- ja vertikaalnurk siis on võimalik igale punktile X,Y ja Z koordinaadid laseri suhtes välja arvutada, mida laserskanner ka automaatselt teeb. Lisaks kulunud ajale mõõdetakse tagasi tulnud kiire intensiivsust ning omistatakse igale punktile skanneri sees oleva kaamera abil RGB-värvikood. Kogu selle informatsiooni põhjal on võimalik punktidest mudel koostada. (Kokamägi, 2016)

Mobiilsed laserskannerid kasutavad SLAM-tehnoloogiat (*Simultaneous Localization and Mapping*). SLAM ehk samaaegne asukohamääramine ja kaardistamine ühendab laserskaneerimisandmed inertsusmõõteseadme (IMU) andmetega, võimaldades koostada 3D punktipilve ilma vajaduseta pidevaks välistingimustel põhinevaks asukoha määramiseks (Malberg, 2019).

4.3. Kaevandustes laserskaneerimise kasutuse varasem kogemus

Kaevanduste mõõdistamiste ja nendeks kasutatava tehnoloogia areng on viimastel aastatel mitmetes tööstusriikides olnud kiire luues uusi meetodeid, mis võimaldaksid objektide mõõdistamist 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. (Malberg, 2019)

Šveitsis läbi viidud uuringus võrreldi kolme 3D-andmekogumise tehnoloogiat endises kullakaevanduses. Tulemused näitasid, et statsionaarne laserskanner tagas suurema punktiheduse ja parema geomeetrilise täpsuse, kuid nõudis rohkem aega nii andmete kogumiseks kui ka töötlemiseks. Vastupidi, mobiilsed SLAM-põhised lahendused võimaldasid oluliselt kiiremat ja paindlikumat andmekogumist, eriti kitsastes ja raskesti ligipääsetavates piirkondades, kuigi nende täpsus oli mõnevõrra madalam. Uuringu autorid rõhutasid, et valik nende tehnoloogiate vahel sõltub konkreetsetest vajadustest: kui on oluline kõrge täpsus, sobib paremini statsionaarne laserskanner, kui aga on vaja kiiret ja paindlikku andmekogumist, on mobiilsed SLAM-põhised süsteemid eelistatavad. (Frangé jt, 2018)

Tšehhis on laserskaneerimine aastaid kasutusel, lisaks tavapärastele mahumõõtmistele saab kontrollida lagede stabiilsust ja deformatsioone (Kajzar jt, 2015). Poolas Ciechanowice külas asuvas ajaloolises kaevanduses kasutati SLAM-tehnoloogiat maa-aluste struktuuride kaardistamiseks ja modelleerimiseks, rõhutades mobiilse laserskaneerimise sobivust keerulistes tingimustes (Jasiewicz ja Sobota, 2018). Hollandis kuuluvad kaevandustehnoloogiate hulka terrestriline laserskaneerimine, aerolaserskaneerimine, aerofotogrammeetria ja UAV-d. Maa-aluste käikude mõõdistamiseks kasutatakse kergeid ja taskukohase hinnaga mobiilseid laserskannereid, mis võimaldavad saada selge ülevaate maa all toimuvast. Osa neist seadmetest tugineb SLAM-tehnoloogiale punktipilve genereerimisel. (Van Wegen, 2018).

Ameerikas Exyn Technologies arendas välja autonoomse droonipõhise SLAM-süsteemi, mis võimaldab 3D-kaardistamist maa-alustes kaevandustes ilma GPS-ita. Nende süsteem kasutab

LiDAR-andureid ja SLAM-algoritme, et luua täpseid kaarte ja võimaldada droonidel turvaliselt navigeerida keerulistes keskkondades. Autonoomsed droonid liiguvad hõlpsasti kitsastes käikudes, sügavates vertikaalsetes šahtides ja muudes keerulistes tingimustes, kus käsitsi läbimine võib olla ohtlik või isegi võimatu. See võimekus pääseda turvaliselt ligi piirkondadele, mis inimestele võivad olla ohtlikud või kättesaamatud, võimaldab tuvastada võimalikke struktuurseid ohte enne tööde alustamist. (Exyn Technologies , i.a)

Eestis uuriti laserskannerite rakendamist mäetööstuses 2018 ja 2019 aastatel. Kaia Malbergi magistritöös analüüsiti käsiskanneri GeoSLAM ZEB-REVO kasutusvõimalusi maa-aluste kaevandustööde efektiivistamiseks ja kaasajastamiseks.

Tegemist on SLAM-algoritmil töötava mobiilse skanneriga, mis on välja arendatud just sellisteks olukordadeks, kus GNSS-signaal puudub ning traditsioonilised mõõdistusmeetodid ei toimi – näiteks allmaakaevandustes, kitsastes käikudes või keeruka geomeetriaga ruumides. Töö käigus võrreldi ZEB-REVO mõõtetulemusi statsionaarse laserskanneri Faro Focus3D X330 andmetega ning leiti, et punktipilvede erinevus jäi alla 5,0 cm, tugitervikute pindalade erinevus oli 0,5% ja väljakaevatud mahtude vahe 0,7%. (Malberg, 2019)

5. Lõputöös kasutatud mõõteseadmed

5.1. Stonex X120Go SLAM

Stonex ettevõtte poolt on toodetud X120 GO on mobiilne laserskanner, kus 3D punktipilve kogumine soovitud alast toimub mõõtja kõnnikiirusel (Stonex, 2022).

Süsteemil on 360° pöörlev pea, mis suudab genereerida 360°x270° punktipilve katvuse. Koos tööstustaseme SLAM-algoritmiga võimaldab see saada kõrge täpsusega kolmemõõtmelisi punktipilveandmeid ümbritsevast keskkonnast ilma valguse ja GPS-ita. Seade on varustatud kolme 5MP kaameraga, mis loovad 200° horisontaalse ja 100° vertikaalse vaatevälja, võimaldades sünkroonselt saada tekstuuriinfot ning luua värvilisi punktipilvi ja osalisi panoraampilte. X120GO-l on integreeritud struktuuriline disain koos sisseehitatud juhtimis- ja salvestussüsteemiga ning vahetatavate liitiumakudega. Kui vajutada käivitamisnuppu, alustab X120GO koheselt tööd, muutes andmete kogumise tõhusamaks ja mugavamaks. Skaneerimisprotsessi saab vaadata reaajas, kasutades spetsiaalset rakendust GoApp (Stonex, 2022).

Alates 2024 aastast on see seade kasutusel ka Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituudis (Joonis 7).



Joonis 7. Stonex X120Go SLAM laserskanner (Foto: Gennadi Baranov, 2025).

5.2. Stonex X70Go SLAM

Stonex ettevõtte poolt toodetud X70 GO on mobiilne laserskanner (Joonis 8). X70GO on reaajas 3D-mudelite rekonstrueerimise seade. Sellel on 360° pöörlev pea, mis koos SLAM-algoritmiga loob kõrge täpsusega punktipilve andmeid (Stonex, 2024).

12 MP valguskaamera tagab tekstuuriinfo, samas kui visuaalkaamera võimaldab paremat reaajas eelvaadet GOappiga. Kaardistamise tulemused genereeritakse skanneri sees kohe pärast skaneerimist. X70GO ühendab mobiilse ja statsionaarse mõõdistamise. SLAM-lahenduse eelistele, mis võimaldavad kiiresti suuri alasid kaardistada, lisandub statsionaarne režiim kõrgema eraldusvõimega skaneerimiseks. Andmete kogumise ajal suudab X70GO salvestada ka kontrollpunkte. Neid saab sobitada teadaolevate kontrollpunktidega, et georeferentseerida skaneeringud (Stonex, 2024).



Joonis 8. Stonex X70Go SLAM laserskanner (Stonex, i.a).

5.3. Gexcel HERON Lite

Gexcel HERON Lite (Joonis 9) on kaasaskantav 3D kaardistamissüsteem, mis on varustatud 32-kanalilise LiDAR-anduriga. Seade sobib kasutamiseks nii sise- kui ka välitingimustes, sealhulgas kaevandustes ja ladudes. Süsteemil on eemaldatav pea, mida saab mugavalt kinnitada teleskoopvarte või sõidukite külge, võimaldades mõõtmist raskesti ligipääsetavates kohtades (Gexcel, i.a).



Joonis 9. Gexcel HERON lite (Gexcel, i.a).

5.4. NavVis VLX3

NavVis VLX 3 (Joonis 10) genereerib andmeid, mis säilitavad algsed detailid, tuvastavad ja eemaldavad dünaamilised objektid, minimeerivad kõrvalekaldeid ja jäädvustavad kõrge detailsuse ulatuses. Seade kogub ulatuslikult 3D-mõõtmisi kahe 32-kihilise lidar-anduri abil, kombineerituna uuendusliku SLAM-tarkvaraga, et pakkuda tööstuse juhtivat punktipilve kvaliteeti kantava seadme jaoks. Seadme ülaosas olevad neli kaamerat teevad kõrge eraldusvõimega teravaid pilte igas suunas, luues täiusliku 360° pildi – kõik see ilma, et operaator ilmuks vaatevälja (NavVis, i.a).

NavVis VLX 3 saab teha automaatselt panoraampilte, ilma et oleks vaja seadet ümber paigutada või kohandada punktipilvede või piltide jäädvustamisel, mis on eriti ideaalne suurte alade jaoks, mis vajavad rohkem aega skaneerimiseks. NavVis VLX 3 töötab täpsete SLAM-tehnoloogiate toel, mis on täiesti oma klassis, ja on täielikult varustatud kontrollpunktide jäädvustamiseks globaalses või kohalikus koordinaatsüsteemis (NavVis, i.a).



Joonis 10. NavVis VLX3 (NavVis, i.a).

5.5. Kasutatud mõõteseadmete tehnilised andmed

Tabel 4 koondab nelja erineva 3D-mõõteseadme olulisemad tehnilised andmed. Esitatud on andmed mõõteulatus, täpsuse, skaneerimiskiiruse, töötemperatuuri vahemiku ning aku vastupidavuse kohta. Lisaks võib välja tuua, et kõik seadmed kasutavad ohutut 1. klassi laserit, mis sobib kasutamiseks ka inimeste läheduses.

Tabel 4. Kasutatud mõõteseadmete tähtsamad tehnilised andmed.

Tehniline näitaja	Stonex X120Go (Stonex,2022)	Stonex X70Go (Stonex,2024)	Gexcel HERON Lite (Gexcel, i.a)	NavVis VLX 3 (Navvis, i.a)
Max. mõõteulatus	120 m	70 m	Kuni 120 m	50 m
Mõõteulatus	360°x270°	360°H, -7~52°V	360°x360°	360°x360°
Skaneerimiskiirus (p/s)	320 000 p/s	200 000 p/s	640 000 p/s	2*1 280 000 p/s
Suhteline täpsus	Kuni ±6 mm	Kuni ±6 mm	±4 mm	±5 mm
Laseri ohutusklass	Laser Class 1	Laser Class 1	Laser Class 1	Laser Class 1
Mõõtmistingimused	-10°C kuni +45°C	-20°C kuni +50°C	-40°C kuni +45°C	-10°C kuni +40°C
Kaal	1,6 kg (akuta)	1,45 kg (akuga)	5 kg	8,5 kg
Aku vastupidavus	2,5 h	1,5 h	kuni 2,5 h	1,5 h
Veekindlus/tolmukindlus	IP 54	IP 54	IP 65	IP42

6. Olemasolev mõõdistusmetoodika

Kaeveväljal peakaeveõõntes on loodud tugivõrk. Tugivõrgust antakse suund kambriplokki piiritlevatele kül- ja kogumisstrekkidele. Mõõdistusi teostatakse elektrontahhümeetrite Sokkia Set 530 RK3 ja Topcon OS-105 abil. Kasutatud mõõteseadmete tähtsamad tehnilised andmed on koondatud tabelis 5.

Tabel 5. Elektrontahhümeetrite tehnilised näitajad.		
Tehniline näitaja	Sokkia SET 530 RK3 (Sokkia, 2006)	Topcon OS-105 (Topcon, 2016)
Nurkade mõõtmise täpsus	5"	5"
Kaugusmõõtmise täpsus (prismaga)	$\pm(2+2 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$	$\pm(2+2 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$
Mõõtmisulatus ühe prismaga	Kuni 3500 m	Kuni 5000 m
Mõõtmisulatus ilma reflektorita	0,3 – 350 m	0,3 – 500 m
Tolmu- ja niiskuskindus	IP 66	IP 65
Töötemperatuur	-20 kuni +50 °C	-20 kuni +50 °C
Aku tööaeg	Kuni 10 tundi	Kuni 20 tundi
Kaal (akuga)	5,3 kg	4,6 kg

Mõõdistamisel pannakse kirja kaeveõõnte teodoliitmõõdistused päevikusse, kuhu märgitakse mõõdistaja nimi, mõõdistamise läbiviimise koht, teostamise kuupäev ja mõõdistamisandmed. Pärast mõõdistamist sisestatakse andmeid Valgevene päritolu firma Кредо-Диалог tarkvara CREDO DAT 5.0, mille abil saab analüüsida ja töödelda geodeetilisi mõõtmisandmeid, meie puhul teodoliit- ja nivelleerimiskäike. Credo DAT teeb automaatseid geodeetilisi arvutusi, näiteks koordinaatide ümberarvutamist, geodeetiliste käikude tasandamist. Tarkvara kõrvaldab mõõtmisvead, kontrollib tulemuste usaldusväärsust ja täpsust, võimaldades vältida võimalikke vigu või ebatäpsusi, toetab paljusid andmeformaate ning võimaldab lihtsat ja kiiret andmete importimist ja eksportimist.

6.1. Kambriplukkide markšeiderimõõtmised

Kamberkaevandamisel jäävad maa-aluse kaevanduse käikudesse alles tugitervikud, mis toetavad lage ja seeläbi tagavad kambriplukkide 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. (Malberg, 2019)

Kaeveõõned ja tervikud mõõdetakse ristsirgete meetodil. Ristsirgete meetodi olemus seisneb venitatud mõõdulindiga vaatejoone märkimises koristusesides, piki kamberploki kogumis- ja külgstrekke ning kamberploki üksikasjade vaatejoonest mõõdistamises. Kaevanduses koristusala mõõdistamisel mõõdetakse lisaks ka kambrite laiust, et kontrollida kaeveõõnte mõõtmeid. (Сливкин, 1971)

Seda ristsirgete meetodit hakati kasutama Viru kaevanduses 1968. aastal ja peagi rakendati samasugust tervikute mõõtmise meetodit ka Estonia kaevanduses (Kovaljova, 2021). Sama meetod on kasutusel ka Ojamaa ja Uus- Kiviõli II kaevandustes. Tänapäeval kasutatakse ristsirge meetodi puhul mõõdulindi asemel laserkaugusmõõtjat (Joonis 11). Laserkaugusmõõtja tehnilised näitajad on esitatud tabelis 6.



Joonis 11. Laserkaugusmõõtja Leica Disto X310.

Tabel 6. Laserkaugusmõõtja Leica Disto X310 tehnilised näitajad (Laser measure, i.a).	
Parameeter	Kirjeldus
Maksimaalne mõõtekaugus	120 m
Mõõtetäpsus	±1 mm
Kaitseklass	IP 65 (tolmu- ja veekindel)
Kallutusandur (inklinomeeter)	360° (kõrguste ja kaudsete mõõtmiste jaoks)
Mõõtühikud	meetrid, jalad, tollid
Mõõtmed	122 × 55 × 31 mm
Kaal koos patareidega	155 g

Koristustööde ajal, kui toimub tervikute moodustumine, on kaevanduse markšeideri ülesanne nende suuruse mõõtmine. Kontuuritud terviku täpne mõõtmine annab teavet kõrvalekaldest projekteeritud suuruselt. Tervikute plaanile kandmiseks peab laserkaugusmõõtja abil mõõtma nende gabariite, nurki ja külgi kaeveõõntes. Terviku nurki ja gabariite mõõdetakse mõõdistuspunktide vaatejoonel, tervikute külgi mõõdetakse nurgast nurka. (Kovaljova, 2021)

Tervikute külgede mõõdistamine on näidatud joonisel 12.

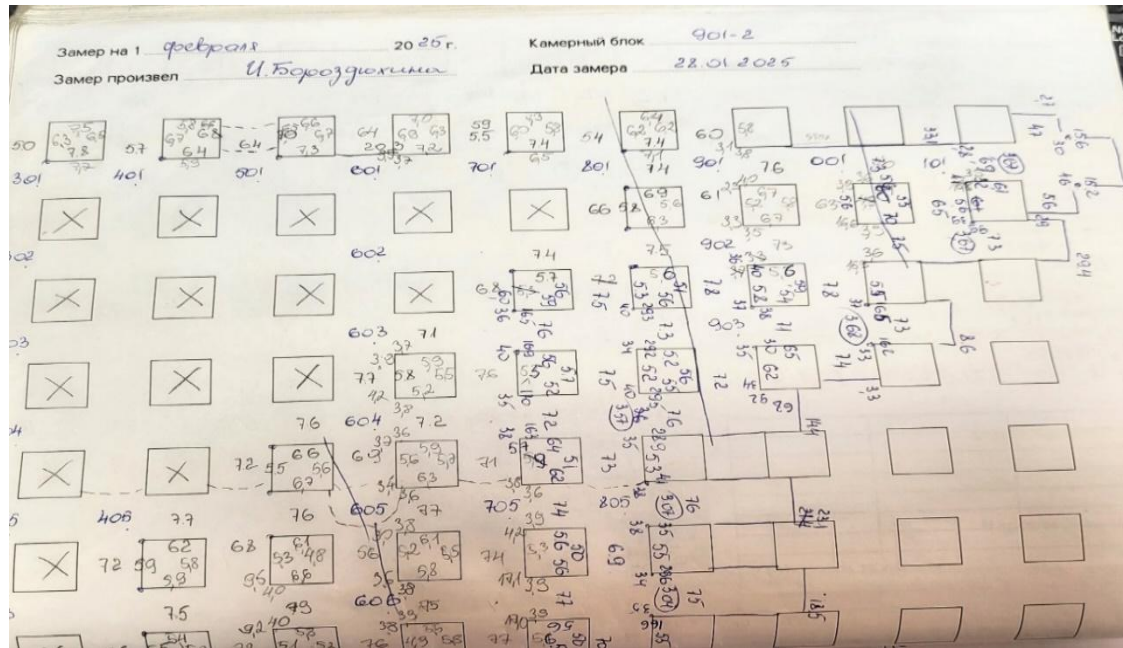


Joonis 12. Tervikute külgi mõõdetakse nurgast nurka.

Kambriploki igas kolmandas tsükliks rajatakse teodoliitkäigud tervikute ja kambrite projektimõõtmete järgimiseks ning mõõtmiste täpsuse kontrollimiseks. Igast tsüklist võetakse kaks põiktelge täpsemaks markšeiderimõõtmiseks. Markšeideripunktid on tähistatud numbritega, nööri ja helkuriga, mis võimaldab kambriploki üksikasjade kiiret jäädvustamist suurtel kaugustel. (Kovaljova, 2021)

Allmaa-tugivõrgust kambriplokkidesse antud suunapunktid moodustavad piki ja risti kambrit nn telgede võrgustiku, millede ristumiskohad on alati 90° ja 180° nurga all. Kaitsetervikud ja ee rind seotakse mõõdistamise käigus suunapunktidega ja telgedega (Talvik jt, 2014).

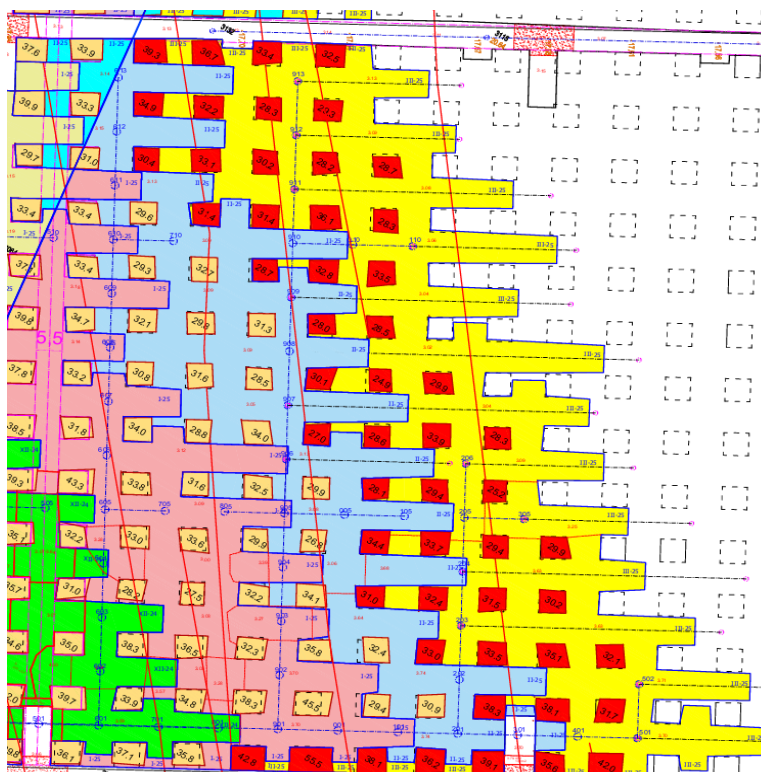
Iga kuu lõpus teeb markšeider igakuise mõõdistamise koristusest kaevandatud kaevisse mahu arvestamiseks. Igas kambri mõõdistatakse varem rajatud punktidest tervikute nurgad sihtide-ristsirgete meetodil, mõõdetakse tervikute küljed, lae kõrgus, kambri laius ja sügavus. Samuti mõõdetakse ee kaugus igast mõõdistamispunktist. Mõõdistamine tehakse elektroonilise laserkaugusmõõturiga nt Leica X310 ja andmed kantakse kambriploki markšeidermõõdistamise raamatusse, kuhu märgitakse samuti mõõdistaja nimi, mõõdistamise läbiviimise koht (kambriploki nr), teostamise kuupäev ja mõõdistamisandmed (Joonis 13).



Joonis 13. Kambriploki markšneidermõõdistamise raamat.

6.2. Kambriplukkide andmetöötlus

Pärast mõõdistamist töödeldakse andmed elektroonselt arvutil. Situatsiooni plaanile kandmiseks kasutatakse AutoCAD Civil 3D programmi: plaanile kantakse punktid, seejärel piiritletakse tervikud ja eerind (Joonis 14).



Joonis 14. Andmete töötlemine AutoCad Civil 3D tarkvaras.

AutoCad Civil 3D tarkvara võimaldab määrata tervikute ja kaevandatud kambriploki pindala. Edasi arvutatakse väljatud kaevis pindala järgmise valemi järgi:

$$S \text{ väljatud kaevis} = S \text{ kaevandatud} - S \text{ tervik} \quad [1]$$

kus:

$S \text{ väljatud kaevis}$ – kambriplokist puhas väljatav pindala, m²;

$S \text{ kaevandatud}$ – kaevandatud kambriploki pindala, m²;

$S \text{ tervik}$ – tervikute pindala, m²;

Kaevandatud kaevis mahu arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$V = S \text{ väljatud kaevis} \times h \quad [2]$$

kus:

V – kaevandatud kaevis maht, m³;

$S \text{ väljatud kaevis}$ – kambriplokist puhas väljatav pindala, m²;

h – kambriploki keskmine kõrgus, m;

Kaevis koguse arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$Q = S \text{ väljatud kaevis} \times q \quad [3]$$

kus:

Q – kaevis kogus, t;

$S \text{ väljatud kaevis}$ – kambriplokist puhas väljatav pindala, m²;

q – kihi tootlikus, t/m²;

Alates 2016. aastast kasutatakse VKG Ojamaa kaevanduses arvutuste kontrollimiseks ja markšeider-mõõtmise aktide genereerimiseks programmi ARCGIS Pro. Läbindustööde ja kamberplokkide mõõdistamistulemused on ühtses andmebaasis.

Polügoonid, mis olid loodud AutoCad'is eksporditakse ArcGIS Pro tarkvarasse, seejärel nendele omistatakse atribuudid: allüksus, kaeveõõne nimetus, kõrgus, aasta, kuu, geoloogiline plokk, vald (Joonis 15). Atribuudid võimaldavad objekte otsida ning üle kontrollida. Tänu omistatud atribuutidele lähevad kantud objektid kohe arvestusse.



Joonis 15. Kambriploki objekt omistatud atribuutidega.

6.3. Läbindustööde markseiderimöödistamine

Läbindustööde markseiderimöödistus kujutab endast kaevetööde möödistamist, mille eesmärk on kontrollida läbindustööde vastavust kavandatud projektile, tagada tööde täpsus ning vältida võimalikke vigu.

Läbindustööde kaevetööde möödistamine toimub ristsirgete meetodikal põhinevalt, sarnaselt kambriplakkide möödistustele. Peamiseks erinevuseks on see, et kaevetööde möödistamiseks kasutatakse allmaa-tugivõrgu punkte. Need punktid on tähistatud numbriga, nööri ja helkuriga ning on kavandatud säilima kogu kaevanduse töö perioodi lõpuni. Punktide vaheline kaugus tugivõrgus on tavaliselt umbes 50 – 60 meetrit.

Iga kuu lõpus viib markseider läbi möödistuse, mille eesmärgiks on täpselt määrata kaevandatud kaevise maht ning läbitud vahemaa kuu jooksul, mille alusel hinnatakse ka tööde efektiivsust ja ressursikulu. Selle protsessi käigus möödetakse punktidest tervikute nurgad ning tervikute küljed, ee kaugust möödistamispunktist, määratakse täpselt lae kõrgus, kambri laius ja sügavus. Lisaks fikseeritakse ka erinevate lagede kõrgused ning nende üleminekupiirid. Möödistamiseks kasutatakse elektroonilisi laserkaugusmõõtureid.

Möötmistulemused dokumenteeritakse kohapeal koostatud situatsiooni abrissiga, mis annab ülevaatliku ja selge kujutise möödistatud aladest.

6.4. Läbindustööde andmetöötlus

Situatsiooni plaani koostamiseks kasutatakse AutoCAD Civil 3D programmi. Esmalt kantakse plaanile möödistuspunktid, mille järel lisatakse abrissilt kogu vajalik informatsioon. Kui AutoCAD-is on situatsiooniplaan lõplikult vormistatud, arvutatakse läbitud jooksvad meetrid käsitsi. Kõigepealt võetakse meetrid jooniselt, seejärel tehakse arvutused markseideri vihikusse (Joonis 16), kuhu

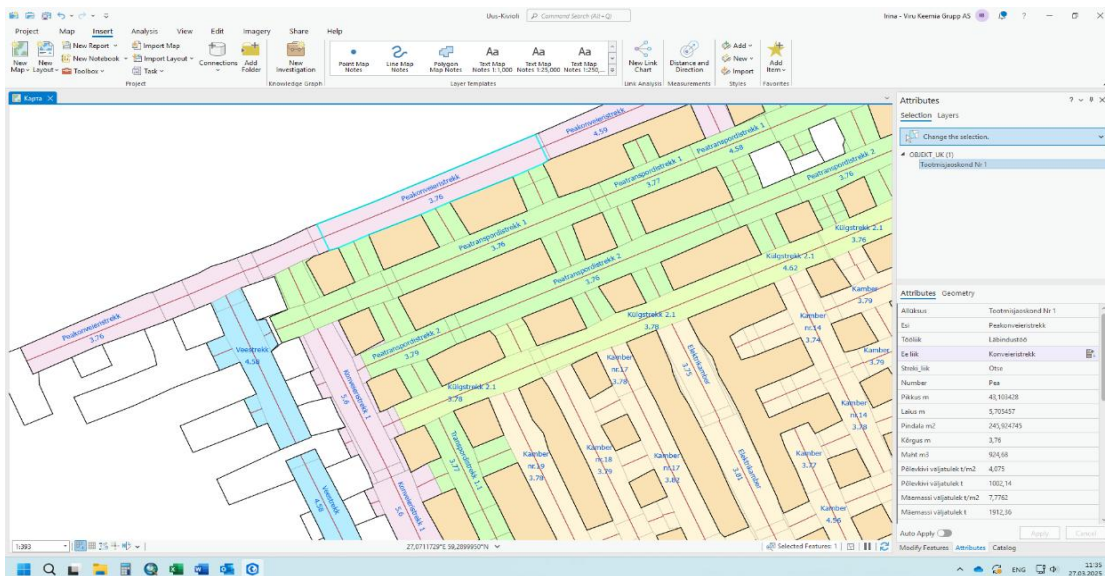
märgitakse ee nimetus, punkti number, kaugus konkreetsest mõõdistuspunktist ning niššide keskmine sügavus. Meetrid liidetakse kokku ja saadakse jooksvad meetrid, mis on läbitud kuu jooksul.

№ п.п.	Наименование выработки	Было	Раст. между точками	Стало	Прим.
1	Т.1 к.ш.б. упр.	248 47	0	248 50	26.2
2	Востр.т.к. (моб.к.с. т.1 к.ш.б.)	248 50	20	212 11	13.2
3	Востр.т.к. ↑	244 36.7	0	244 36.7	30.6
4	Востр.т.к.			262 36.1	50.9
5	ниши Востр.т.к.		7 м.ст.		24.0
6	Т.1 к.ш.б. упр. 1.2			260 36.1	103.5
7	ниши Т.1 к.ш.б. упр. 1.2		4 м.ст.		25.1
8	Т.1 к.ш.б. упр.			261 36.1	50.1
9	ниши Т.1 к.ш.б. упр.		1 м.ст.		5.5
10	Т.1 к.ш.б. упр. 1.1	242 7.9	270 270	13.6	32.7
11	ниши Т.1 к.ш.б. упр. 1.1		4 м.ст.		13.9

Σ 403.7

Joonis 16. Läbindustööde arvutamise vihik.

Seejärel, polügoonid, mis olid loodud AutoCad'is eksporditakse ArcGIS Pro tarkvarasse, nendele omistatakse atribuudid: allüksus, kaeveõhne nimetus, kõrgus, aasta, kuu, geoloogiline plokk, vald (Joonis 17).



Joonis 17. ArcGis Pro programmi läbindustööde atribuutide sisestamine.

ArcGIS PRO tarkvara abil saab kontrollida käsitsi tehtud arvutuste täpsust ning välistada inimlikud eksimused. Lõpp- tulemusena saadakse markšneideri vastuvõtmise- mõõtmise akt, kus on peal programmi poolt automaatselt arvutatud andmed nagu laius, pindala, väljamiskõrgus, maht, põlevkivi ja mäemassi väljatulek.

Vanade riistadega mõõdistamise ebaefektiivse töö näitena võib välja tuua järgmise: märtsis 2025 läbiti Uus-Kiviõli kaevanduses 1639 meetrit. Mõõdistuste ja andmetöötlusega tegeles samaaegselt kaks markšneiderit ning lõpptulemuse saavutamiseks kulus keskmiselt 12 töötundi. Lõputöö käigus kasutatud laserskanneritega mõõtmised oleksid toimunud kordades kiiremini.

7. 2023 aasta uue mõõdistustehnoloogia katsetööd Ojamaa kaevanduses

2023. aasta oktoobris toimusid Ojamaa põlevkivikaevanduse kambriplokis uute mõõteseadmete ja meetodika katsetööd. Töö käigus katsetasin mobiilset laserskannerit Heron Lite (Joonis 18) geodeesiaettevõtte Hades Geodeesia OÜ insener Vaiko Veeleid juhendamisel ja võrdlesin nüüd neid mõõtmistulemusi käesoleva lõputöö käigus saadud mõõtmismeetodi tulemustega. Punktpilvede genereerimine ja andmetöötlus viidi läbi Hades Geodeesia OÜ kontoris spetsiaalsete programmide abil, mille teostasid Andrei Bljahhin ja Vaiko Veeleid.



Joonis 18. Laserskanner Heron Lite katsetamine.

7.1. Punktpilvede orienteerimine

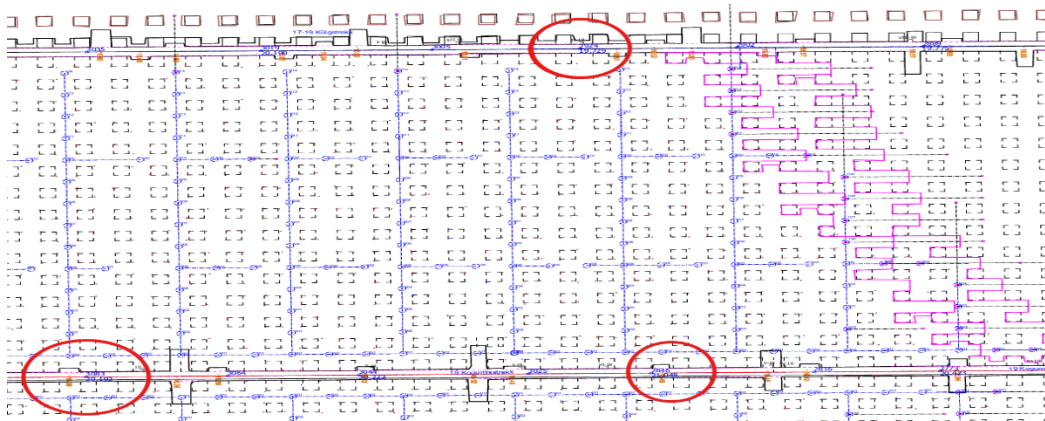
Mõõdistamine toimus SLAM-tehnoloogiat kasutava laserskanneriga, mis tähendab, et skaneerimine viidi läbi liikumise pealt. Punktipilv arvutati skanneri trajektoori ja mõõdetud punktide info alusel. Lõpptulemuseks oli punktipilv. Punktipilvede georefereerimiseks peaks kindelpunktidele asetama spetsiaalsed tähised tavaliselt kahevärvilised ringid või ruudud, millele on leitud koordinaadid.

Georefereerimine on punktipilvede teisendamine skanneri koordinaatsüsteemist välisesse (geodeetilisse) koordinaatsüsteemi. See võib olla kas riiklik või kohalik süsteem; näiteks tehase või ehitusplatsi koordinaatsüsteem. Kaudse georefereerimise korral kasutatakse tavaliselt tähiseid,

mille koordinaadid on välises süsteemis teada, et teisendada punktipilved sellesse süsteemi (Reshetyuk, 2009).

Ojamaa kaevanduses kambriplokki piiritlevatele kül- ja kogumisstrekkidele on rajatud mõõdistamisvõrgud, mis koosnevad nii tasapinnalisest (XY) võrgustikust kui ka kõrgusvõrgustikust (Z). Kaevanduses kasutatakse L-EST koordinaatsüsteemi ja kõrguste määramisel EH2000 süsteemi. Kõrgused määratakse tehnilise nivelleerimisega ning kõrgusmärk on kindlustatud umbes iga 100 meetri tagant.

Võrgu punktides on lakke kinnitatud nael ja punkti number. Orienteerimiseks kasutatud punktid on näidatud joonisel 19.



Joonis 19. Orienteerimiseks kasutatud punktid kül- ja kogumisstrekkidel.

Koordinaatide määramiseks maa-alustes tingimustes kasutasime Heron Lite skanneri külge kinnitatavat spetsiaalset otsikut (Joonis 20), millega saab mõõta kontrollpunkte kaevanduse laest. Mõõtevarda tsentripunkt kalibreeritakse varda otsa, mis võimaldab teraviku asetamisega koordineeritud tähisele salvestada tähise info kontrollpunktina georefereerimiseks. Tulemuseks oli saadud 4,0 cm täpsusega mõõdistus kontrollpunktide suhtes.



Joonis 20. Heron Lite otsik (Gexcel, 2023).

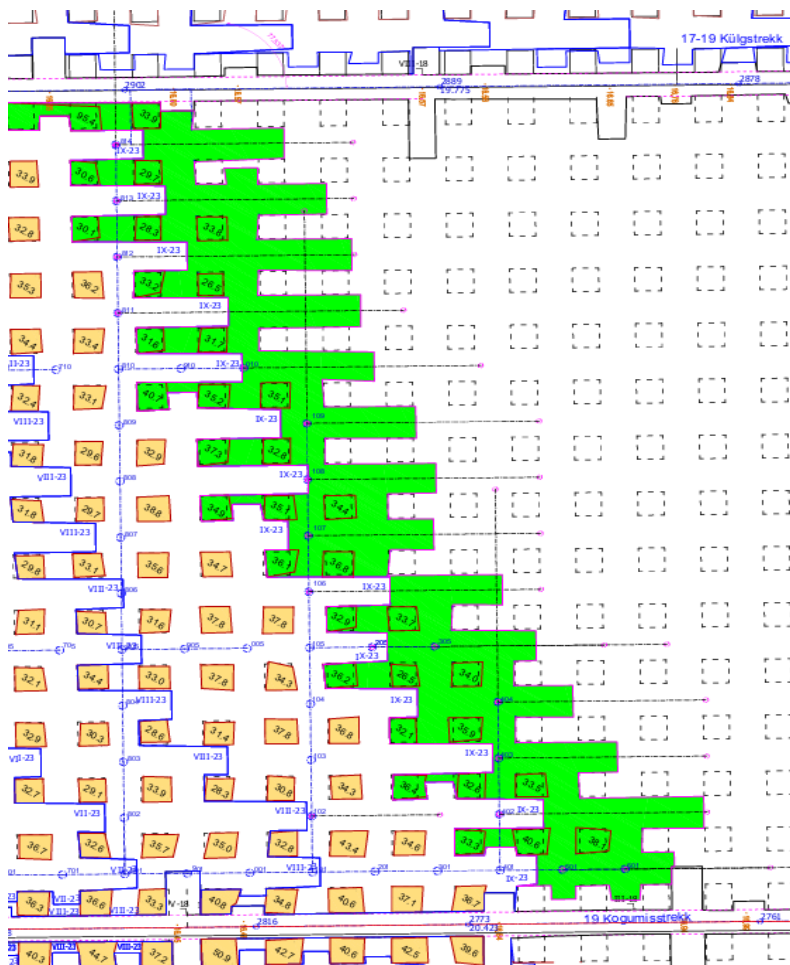
Sama otsik sobib ka välistingimustes kasutamiseks kontrollpunktide määramisel, mis võimaldab kogu mõõdistatud ala viia ühisesse koordinaatsüsteemi. Selle lahenduse eelis seisneb selles, et tähiseid ei ole vaja igale punktile eraldi paigaldada, tsentreerimine toimub otse punktile.

Maa all ei ole majanduslikult, ajaliselt ega tehniliselt võimalik kõikidele punktidele asetada spetsiaalset tähist või neid ümber tõsta, ühes punktipilves peab kolmemõõtmelise ruumi korrektse mudeldamise jaoks olema vähemalt kolm tähist (Malberg, 2019).

7.2. Traditsioonilise ja laserskaneerimise mõõdistamismeetodite efektiivsuse võrdlus kambriplakkides nr 19 ja 901

Kambriplakkis nr 19 teostati mõõdistus laserskaneerimise meetodil. Päev varem teostas markšneider selle ala markšneiderimõõdistuse tavameetodiga, millele kulus umbes 2,5 tundi ning millele lisandus veel andmetöötlus kestvusega 3,5 tundi.

3D laserskaneerimise seadmega mõõdistasime 5570,5 m² suuruse ala (Joonis 21) 20 minuti jooksul. Andme järeltöötlus võttis aega 1 tund(60 min). Saadud tulemuste põhjal on mõõdistustööde kiirus laserskaneerimisega ligi 7,5 korda suurem (Tabel 7).



Joonis 21. Mõõdistatud ala on märgitud rohelisega.

Tabel 7. Erinevate mõõdistusmeetodite võrdlev tabel kambriplokis 19.		
Näitaja	Kambriplukk 19 (olemasolev mõõdistusmetoodika)	Kambriplukk 19 (laserskanner)
Mõõdistatud ala, m ²	5570,5	5570,5
Mõõdistusaeg, h	2,5	0,33 (20 min)
Mõõdistuskiirus, m ² /h	~2228	~16880

2025. aasta märtsikuu jooksul viisin kambriplokis 901 läbi mõõdistustööd olemasoleva traditsioonilise mõõdistusmetoodika abil, kasutades laserkaugusmõõdjat. Kogu mõõdistatud ala oli 18129,5 m².

Välitööde käigus andsin allmaa-tugivõrgust kambriplokki kokku 50 suunapunkti elektrontahhümeetriga, mille jaoks kulus 8 töötundi. Lisaks teostasin kuu jooksul kaks kontrollmõõdistust, mille ajal toimub ainult tervikute mõõtmise, mis võttis kokku 4 töötundi ning kuu lõpus teostasin igakuise markšeiderimõõdistust, mis kestis 1,5 tundi. Seega kulus välitöödele kokku 13,5 tundi, millest ainult mõõdistamine võttis 5,5 tundi.

Kogutud andmete kameraaltöötlus hõlmas esmast töötlemist kestvusega 4,5 tundi ning lõplikku andmetöötlust ja pindalade arvutamist, mis võttis aega 5 tundi. Kokku kulus traditsioonilise meetodi rakendamisel kambriplokis 901 välitöödele ja kameraaltöödele 23 töötundi. Andmed on koondatud tabelis 8.

Tabel 8. Kokkuvõttev tabel teostatud töödest kambriplokkis 901.	
Mõõdistatud ala, m ²	18129,5
Suunapunktide arv	50
Välitööde aeg kokku, h	13,5
Mõõdistustööd kuu jooksul, h	5,5
Andmetöötlus kuu jooksul, h	9,5
Välitöö ja kameraaltöö kokku, h	23

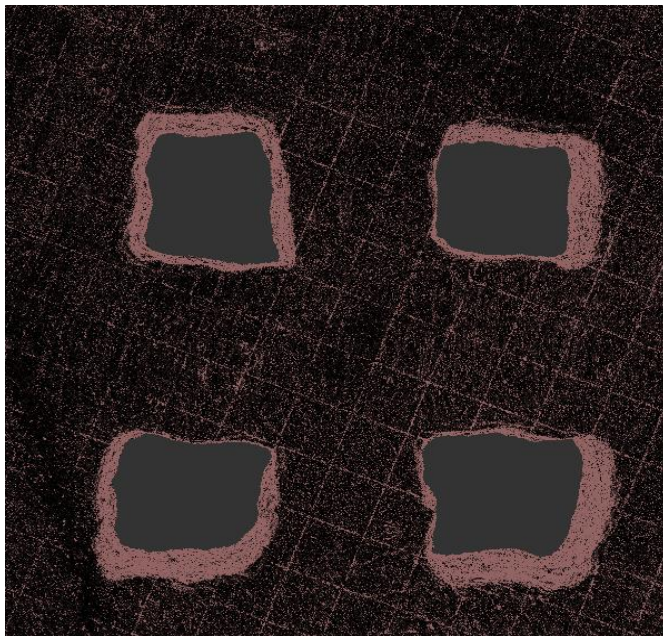
Laserskaneerimine näitab märgatavat eelist traditsioonilise mõõdistusmeetodiga võrreldes. Antud tulemuste põhjal on mõõdistustööde kiirus laserskaneerimisega ligi viis korda suurem (Tabel 9).

Tabel 9. Erinevate mõõdistusmeetodite võrdlev tabel.		
Näitaja	Kambriplukk 901 (olemasolev mõõdistusmetoodika)	Kambriplukk 19 (laserskanner)
Mõõdistatud ala, m ²	18129,5	5570,5
Mõõdistusaeg, h	5,5	0,33 (20 min)
Mõõdistuskiirus, m ² /h	~3296	~16880

7.3. Tervikute pindala ja kuju hindamine laserskaneerimise andmete põhjal

Peamisteks kambriploki elementideks kamberkaevandamise tehnoloogia korral on kambrid ja nende vahelised tervikud. Kambrite ja nende vaheliste tervikute mõõtmete õigest valikust sõltuvad mäetööde tehnilis- majanduslikud näitajad ja maavara kaod.

Kambriploki laserskaneerimise järgselt tootsime kolmemõõtmelise mudeli, mis võimaldab täpselt hinnata tervikute tegelikku geomeetriat. Võrreldes traditsioonilise mõõdistamisega, kus tervikud kantakse skeemidele sirgete joonte ja korrapäraste kujunditena (nt ruut või ristkülik), ilmneb skaneerimistulemustest selge erinevus. Punktipilve analüüs näitab, et tervikute piirjooned ei ole alati sirged- esineb ebaühtlusi, ümardatud nurki ning ka asümmeetrilisi vorme (Joonis 22). See viitab sellele, et tegelik olukord kaevanduses võib erineda märgatavalt paberil kujutatust, mis on koostatud traditsioonilise meetodiga.



Joonis 22. Tervikute asümmeetriline vorm.

Tervikute pindala võimaldab otseselt võrrelda tegelikku olukorda projekteeritud lahendusega ning hinnata, kui suured on kõrvalekalded. Projekti järgi on Ojamaa kaevanduse tervikute suurus 5,4 x 5,4 meetrit. Terviku projektijärgne pindala on 29,16 m².

Täpsemaks analüüsiks koostas tabeli (Lisa 1). Tervikute pindala võrdleb tabel, mis võrdleb tervikute pindalasid projekti pindalaga, traditsiooniline mõõdistuse ja laserskaneerimise mõõdistuste vahel.

Laserskaneerimise andmed kinnitavad, et tervikute tegelik pindala võib traditsioonilisest mõõdistamisest erineda. Enamikul juhtudel on mõõdistatud pindala suurem kui projektijärgne, kuid laserskaneerimine näitab veelgi täpsemat vastavust tegelikule olukorrale, kuna see suudab detailselt fikseerida terviku ebatasasused ja reljeefsed muutused.

Selline detailne geomeetiline info on kriitilise tähtsusega kaevanduse ohutuse seisukohalt. Laserskaneerimist tuleks kasutada mitte ainult dokumenteerimiseks, vaid ka regulaarset ohutusalast järelvalvet tehes ja prognoositavate ohukohtade varajaseks tuvastamiseks.

7.4. Mahtude arvutamine ja võrdlemine kambriplokkis 19

Kambriploki 19 näitel võrdlesin mahtusid, mis saadi kahe erineva mõõdistusmetoodika abil: kaevandatud kaevise maht, mis arvutati traditsioonilise meetodi abil ning sama kambriploki kohta kogutud punktpilve andmetest kalkuleeritud maht.

Traditsioonilise mõõtmismeetodiga arvutasin väljatud kaevise pindala 1. valemi abil:

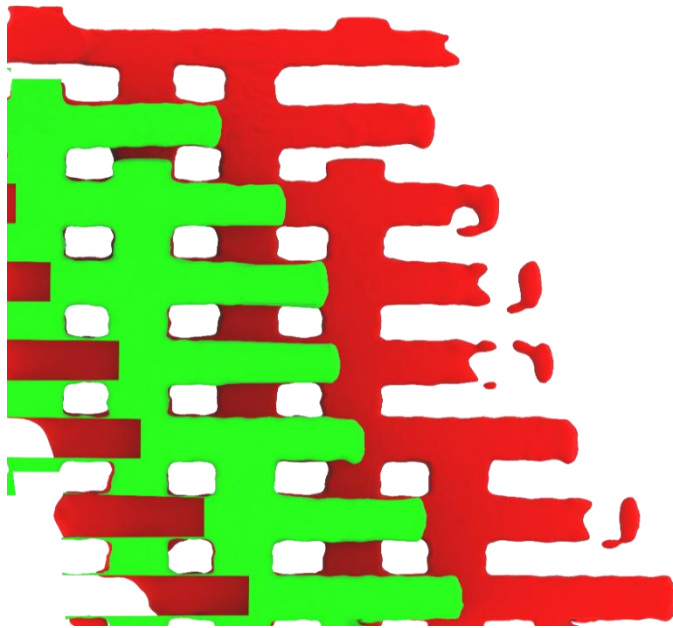
$$S_{\text{väljatud kaervis}} = 5570,5 \text{ m}^2 - 1207,7 \text{ m}^2 = 4362,8 \text{ m}^2$$

Kaevandatud kaevise mahu arvutasin 2. valemi abil:

$$V = 4362,8 \text{ m}^2 \times 3,29 \text{ m} = 14353,612 \text{ m}^3$$

Kuna osades kambriplokki piirkondades ei olnud võimalik skanneriga piisavalt lähedale minna, oli punktitiheus seal väiksem ning geomeetria puudulik. Nendes piirkondades täiendati geomeetriat käsitsi, lähtudes visuaalsest hinnangust ja lähedalasuvate punktide loogikast. Alloleval joonisel 23 on esitatud geomeetria enne ja pärast parandamist.

Punasega on märgitud ära algne skaneeritud geomeetria ja rohelisega on märgitud puhastatud geomeetria. Jooniselt on näha, et puhastamise ja parandamise käigus eemaldati geomeetrilisi defekte ning täpsustati servade asukohta, mis võimaldas saada usaldusväärsema tulemuse mahu arvutamisel.



Joonis 23. Vörkmudeli puhastamine ja parandamine mahu arvutuse jaoks.

Valitud alast koostatakse suletud kontuuriga võrkmodel ja leitakse mudeli kogumaht. Peale võrkmodeli geomeetria sulgemist ühtseks geomeetriaks kaevise mahuks saadi 13 993,7489 m³.

Kambriplokis 19 arvatud mahtude võrdlus näitas mõõdukat erinevust kahe kasutatud meetodi vahel. Erinevus kahe tulemuse vahel oli 359,8631 m³, mis moodustab ligikaudu 2,51%. Alljärgnevas tabelis 10 on toodud tulemuste kokkuvõte.

Tabel 10. Kaevandatud mahtude võrdlemine.		
	Traditsiooniline mõõdistusmetoodika	Laserskaneerimine
Kaevandatud kaevise maht, m ³	14 353,612 m³	13 993,7489 m³
Erinevus, m ³	359,8631 m ³	
Erinevus %	2,51%	

Tulenevalt „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ määrusest (2019, § 4, Lg 2, p 1) võib kordusmõõtmistel mõõtesuuruse väärtuse erinevus kuni 20 000 m³ mahu korral olla kuni 10%.

Lisaks mahu erinevusele näitavad mõõdistustulemused ka olulisi geomeetrilisi erinevusi kambriploki kujus. Alloleval joonisel on võrreldud kahe mõõdistusmeetodi tulemused (Joonis 24). Roosa joon tähistab kambriploki piiri, mis saadi traditsioonilise mõõdistusmeetodi abil ning taustal nähtav hall "x-ray" kujutis on saadud laserskaneerimise andmetest, mis kajastab tegelikku kaevandatud geomeetriat.



Joonis 24. Kahe mõõdistusmetoodika võrdlus.

Jooniselt 24 on selgelt näha, et traditsioonilise meetodi põhjal joonestatud piirid on sirged ja nurgelised, samas kui laserskaneerimine paljastab tegelikud ebakorrapärasused ja seinte nihkumised. Sellised geomeetrilised erinevused mõjutavad otseselt ka mahu täpset arvutamist ning rõhutavad vajadust täpsemate mõõdistusmeetodite kasutuselevõtuks.

8. Markšneideritööd allmaa rajatise ehitamisel

Uus-Kiviõli II kaevanduse kaevisse vedu toimub konveiertranspordiga Ojamaa kaevanduse territooriumile ja rikastamine toimub Ojamaa tööstuskompleksis.

Uus-Kiviõli II kaevanduse projekt näeb ette kambriplokkidest konveieritega väljaveetud kaevisse purustamiseks võimsa purusti paigaldamise maa alla. Sellel lahendusel on erinevad põhjused, mis on seotud nii keskkonnamõjude vähendamise kui ka seadmete töökindluse tagamisega. Esiteks aitab maa-alune paigaldus vältida müra ja tolmu levikut maapinna läheduses, mis on oluline nii töötajate kui ka ümbritseva keskkonna kaitseks. Teiseks on purusti ülesandeks purustada võimalikud ülegabariidilised tükid, enne kui need jõuavad konveierile. Selline ennetav töötlemine kaitseb lintkonveieri katteid mehaaniliste kahjustuste eest ning tagab materjali ühtlase liikumise konveieril. Lisaks on oluline, et maa-alune paigutus kaitseb purustit ka madalate temperatuuride eest, mis võivad talvisel ajal kahjustada seadmeid, kui need asuksid maapinnal.

Purusti paigaldamiseks rajati tõus, mis kulgeb maa-aluselt tasandilt 10 meetri kõrgusele. Pärast tõusu valmimist eemaldati sellest kogu mäemass. Vabanenud ruum on ette nähtud seadmete paigaldamiseks- pind betoneeritakse ning seejärel paigaldatakse sinna purusti.

Tõusu ehitamisel markšneiderid mõõdavad astanguid ja astmeid, kontrollivad kõrgusi ja gabariite ning koostavad vastava profiili. Mõõdistamisi teostatakse, et tagada täpne vastavus projektile ning vältida võimalikke kõrvalekaldeid. Lisaks arvutatakse nende mõõtmiste põhjal välja mäetööde maht. Erinevalt tavapärastest töödest teostasime selliseid mõõdistamisi ainult kaevanduse ehitamise ajal. Sarnaseid mõõdistamisi viisime läbi ka kaldšahtide rajamisel. Taoliste keerukate insenerilahenduste teostamisel kaevekäikude erinevatel tasanditel on laserskannerite kasutamine paljuskü mugavam ja ohutum viis traditsiooniliste mõõtevahenditega võrreldes.

8.1. Kõrgusvõrk

Enne kaevanduse ehitamise algust Uus-Kiviõli II tööstusterritooriumil teostati polügonomeetria vaatlused kolmele punktile, millele määrati ka kõrgused. Tööd viis läbi OÜ Sillamäe Geodeet.

Markšneiderid arendasid tuginedes nendele punktidele edasi allmaa- markšneiderivõrgu. Tugivõrgu punktidel peavad olema täpselt määratud kõrgused. Kõrgused määratakse nivelleerimise teel, kasutades teadaoleva kõrgusega kontrollpunkte. Nii tagatakse, et kõik hilisemad mõõtmised oleksid seotud ühtsesse kõrgussüsteemi.

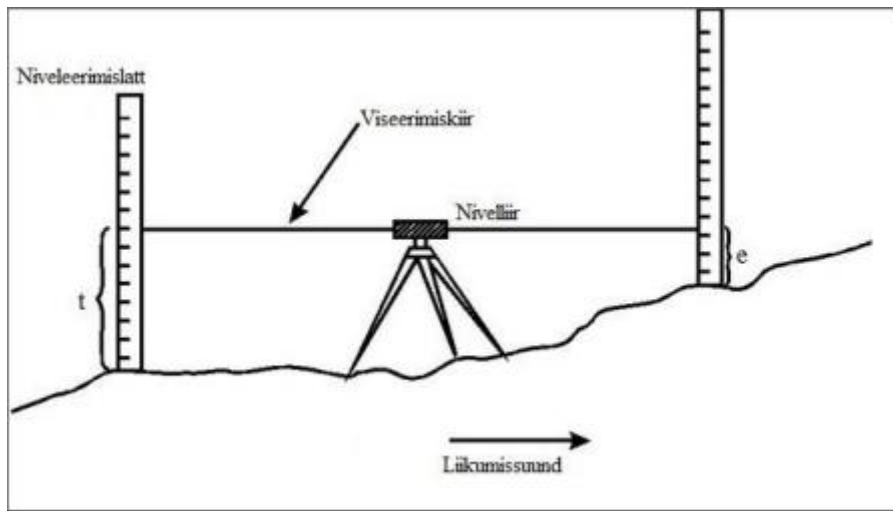
Uus- Kiviõli II kaevanduse maa-alune kõrgusvõrk eksisteerib EH 2000 riiklikus kõrgusvõrgus.

1.jaanuaril 2018.a. läks Eesti üle Euroopa Vertikaalsele Referentssüsteemile (EVRS)- mille kõrgusi tähistatakse Eestis lühendiga EH2000. EVRS aluseks on nn. Amsterdamis null (Normaal Amsterdams Peil, NAP), ehk kõrgussüsteemi lähtenivoo on arvestatud veetaseme keskmise väärtusega, mis mõõdeti Amsterdamis ajavahemikul 1. september 1683 kuni 1. september 1684. Epohh on 2000 ning riikliku kõrgusvõrgu kõrgusväärtused lähtuvad EVRS realisatsioonist EVRF2007. (Errapart, 2021)

8.2. Geomeetriline nivelleerimine

Kõrguse märkimisel kasutatakse peamiselt geomeetrilist nivelleerimist. Geomeetrilise nivelleerimise puhul kasutatakse nivelliiri ja nivelleerimislatte.

Geomeetriline nivelleerimine on kõige täpsem kõrguse määramise ja edasikandmise viis. Selle meetodi puhul leitakse punktide omavahelisi kõrguslike erinevusi ehk kõrguskasve. Kõrguskasvude leidmiseks tuleb võtta lugemid spetsiaalsetelt nivelleerimislattidelt, mis asuvad vastavalt eelmisel ja järgmisel punktil (Joonis 25) (Runtal, 2017).



Joonis 25. Geomeetrilise nivelleerimise printsiip (Runtal, 2017).

Kahe punkti vaheline kõrguskasv leitakse järgmise valemi abil:

$$Hk = tv - ev \quad [4]$$

kus:

Hk – kõrguskasv, mm;

tv – tagasivaate lati lugem, mm;

ev – edasivaate lati lugem, mm;

Kuna kaevanduses punktid asuvad laes, mitte maa peal, siis punktidevaheline kõrguskasv arvutatakse vastupidi. Latid asetatakse vertikaalselt punktidesse ja lattide skaala kasvab ülespoolt alla. Lati 0 jääb punktidele laes. Kõrguskasv leitakse järgmise valemi abil:

$$Hk = ev - tv \quad [5]$$

kus:

Hk – kõrguskasv, mm;

ev – edasivaate lati lugem, mm;

tv – tagasivaate lati lugem, mm;

Geomeetriline nivelleerimine jaguneb vastavalt täpsusele nelja klassi. Väikseima täpsusega on tehniline nivelleerimine (Runtal, 2017). Tehnilise nivelleerimise maksimaalne lubatud sulgemisviga on arvutatav järgmise valemi abil:

$$fh_{lub} = \pm 50 \text{ mm} \sqrt{L(\text{km})} \quad [6]$$

kus:

fh_{lub} – lubatud sulgemisviga, mm;

L – käigu pikkus, km;

Kui on teada esimese punkti absoluutkõrgus ja on leitud kõrguskasv, siis arvutatakse järgmise punkti absoluutkõrguse. Punktide absoluutkõrgusi leitakse järgmise valemi abil:

$$H_{\text{järgmine punkt}} = H_{\text{eelminepunkt}} + Hk \quad [7]$$

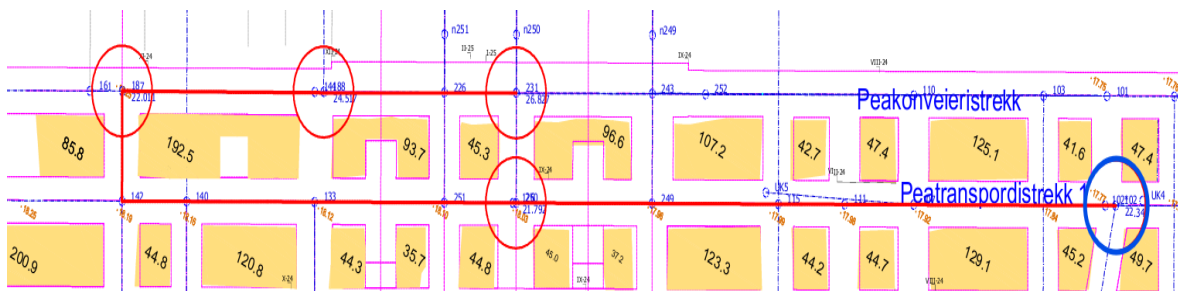
kus:

H – absoluutkõrgus, m;

Hk – kõrguskasv, mm;

Mõõdistused pannakse kirja väliraamatusse. Kus on kirjas jaama nr, lugemid latilt.

Nivelleerimiskäik viidi läbi lähtepunktist tõusu asukohani. Nivelleerimise teostasid edasi- tagasi käiguna ühelt lähtepunktilt (Joonis 26), mille absoluutkõrgus oli 22,347 m. Tegemist on kinnise käiguga, mis algab ja lõpeb ühes punktis. Sinisega on tähistatud lähtepunkt ning punasega punktid, mille absoluutkõrgused tuleb määrata.



Joonis 26. Nivelleerimiskäik.

Käigu pikkus oli 0,521 km. Arvutan maksimaalse lubatud sulgemisvea 6 valemi alusel:

$$fh_{lub} = \pm 50 \text{ mm} \sqrt{0,521(\text{km})} \approx 36 \text{ mm}$$

Igas jaamas oli leitud kaks kõrguskasvu ($Hk1$ ja $Hk2$). Kõrguskasvud võivad tehnilisel nivelleerimisel erineda omavahel 5 mm võrra. Kui nõue on täidetud, siis arvutatakse keskmine kõrguskasv järgmise valemi abil:

$$Hk \text{ keskmine} = \frac{Hk1 + Hk2}{2} \quad [8]$$

kus:

$Hk \text{ keskmine}$ – keskmine kõrguskasv, mm;

$Hk1$ – jaama esimene kõrguskasv, mm;

$Hk2$ – jaama teine kõrguskasv, mm;

Saadud tulemused on esitatud tabelis 11.

Tabel 11. Tehnilisel nivelleerimisel saadud tulemused.					
Jaama nr	Tagumine (mm)	Eesmine (mm)	Kõrguskasv (mm)	Keskmine kõrguskasv (mm)	Absoluutne kõrgus (m)
T102	2905				22,347
T126		2351	-554	-556	21,791
	2196				
T187		2415	219	221	22,012
	1089				
T188		3592	2503	2505	24,517
	1047				
T231		3352	2305	2307	26,824
	3370				
T188		1061	-2309	-2307	24,517
	3576				
T187		1069	-2507	-2505	22,012
	2195				
T126		1972	-223	-221	21,791
	2160				
T102		2719	559	556	22,347
			$\Sigma -7$	$\Sigma 0$	

Pärast käsitsi arvutamist sisestatakse andmed Valgevene päritolu firma Кредо-Диалог tarkvarasse CREDO DAT 5.0, kus programm viib läbi nivelleerimiskäigu täiendava tasandamise. Saadud tulemusi kasutatakse edaspidises tööprotsessis.

8.2.1. Kasutatud mõõteseadmed

Punktide vahelised kõrguskasvud määrasin optilise nivelliiriga Sokkia C320 (Joonis 27). Tehnilised andmed on esitatud tabelis 12.

Tabel 12. Nivelliiri Sokkia C 320 tehnilised andmed (Sokkia, 2007).

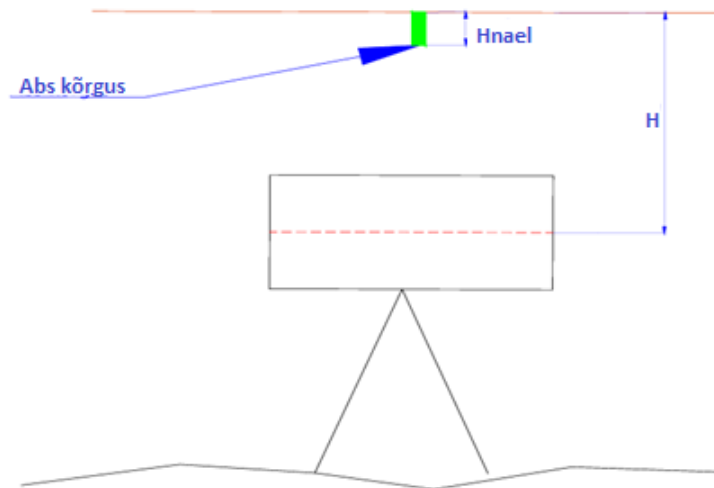
Parameetrid	Parameetri suurus
Optiline suurendus	20x
Kompensaatori tööpiirkond	$\pm 15'$
Vee-ja tolmukindlus	IPX4
Lühim mõõtmiskaugus	0,3 m
Mõõteulatus	215 m
Täpsus	$\pm 2,0$ mm
Kaal	1,7 kg



Joonis 27. Nivelliir Sokkia C320 (Sokkia, 2007).

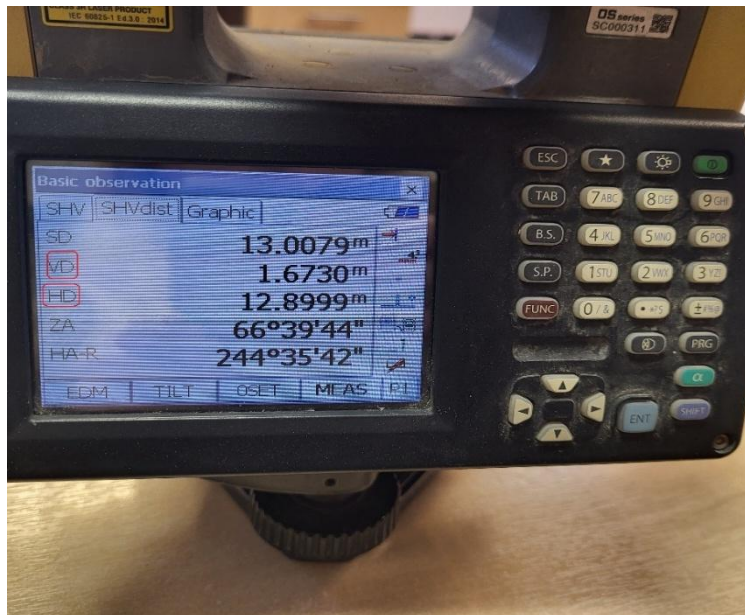
8.3. Allmaa rajatise tahhümeetiline mõõdistamine

Kui punktidele on määratud absoluutkõrgused, järgneb mõõdistamine, mida tehakse elektrontahhümeetri abil. Seade paigaldatakse tuntud koordinaatidega punkti kohale, millelt on nähtav veel üks koordineeritud punkt — nn suunapunkt, mille suunas tehakse orienteerimine. Pärast seadme tsentreerimist ja loodimist tehakse sihtimine sellele punktile, et määrata mõõtmiste algussuund. Alles pärast orienteerimist alustatakse mõõdistamist. Eelnevalt mõõdistatakse laserkaugusmõõtjaga punkti naela pikkust laest, kõrgust instrumendi ja lae vahel (Joonis 28).



Joonis 28. H- kõrgus instrumendi ja lae vahel, Hnael- naela pikkus laest.

Elektrontahhümeetriga mõõdistatakse tõusu iseloomulikud punktid, sealhulgas kalded, astmed ja astangud, mis mõjutavad profiili kuju. Eesmärk on koguda võimalikult täpne teave reljeefi kohta, et koostada üksikasjalik tõusuprofiil. Andmed pannakse kirja vihikusse. Eriti olulised on vertikaalsed kaugused ehk kõrguskasv (VD, *Vertical Distance*) ja horisontaalsed kaugused (HD, *Horizontal Distance*) (Joonis 29), mis on aluseks profiili koostamisel.



Joonis 29. Elektrontahhümeetri ekraan. VD ja HD on märgitud punasega.

Mõõdistamisele järgneb andmete järeltöötlus ja arvutused. Arvutused tehakse käsitsi. Arvutan instrumendi horisondi kõrgust järgmise valemi abil:

$$H_{horisont} = H_{abs} + H_{nael} - H \quad [9]$$

kus:

$H_{horisont}$ – instrumendi horisont, m;

H_{abs} – punkti absoluutkõrgus, m;

H_{nael} – naela pikkus laest, m;

H – kõrgus instrumendi ja lae vahel, m;

Valemi 9 alusel arvutan instrumendi horisondi kõrgust:

$$H_{horisont} = 26,824 + 0,02 - 3,215 = 23,629 \text{ m}$$

Seejärel arvutan mõõdistatud punkti vertikaalkaugust järgmise valemi abil:

$$L_{vert} = H_{horisont} + VD \quad [10]$$

kus:

L_{vert} – vertikaalkaugus, m;

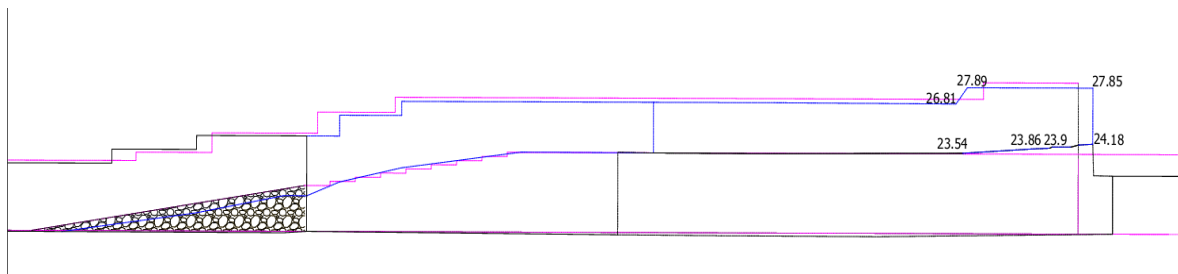
$H_{horisont}$ – instrumendi horisondi kõrgus, m;

VD – kõrguste vahe, m;

Valemi 10 alusel arvutan vertikaalkaugust:

$$L_{vert} = 23,629 + 1,043 = 24,672 \text{ m}$$

Sama põhimõtte järgi tuleb arvutada iga mõõdetud punkt ning saadud tulemuste põhjal koostatakse tõusu profiil (Joonis 30), kandes punktid plaanile vastavalt nende kaugusele ja kõrgusele AutoCad Civil 3D tarkvaras.



Joonis 30. Tõusu profiil. Sinisega on joonestatud tegelik joon, roosaga projektjoon.

8.4. Laserskaneerimise rakendamisvõimaluste uuring Uus-Kiviõli II kaevanduse allmaa rajatiste mõõdistamisel

2025. aasta jaanuaris viidi läbi laserskaneerimise katsemõõdistused rajatavas Uus-Kiviõli II kaevanduses, mille eesmärgiks oli hinnata mobiilsete laserskannerite kasutamise võimalusi ja täpsust allmaa rajatiste mõõdistamisel ning võrrelda saadud tulemusi varasemate traditsiooniliste mõõdistusmeetoditega.

Mõõdistamistöodel osalesid mitmed organisatsioonid ja spetsialistid, kes kasutasid erinevaid seadmeid ja tehnoloogiaid. Skaneerimistöode käigus katsetas ettevõtte Hades Geodeesia OÜ mobiilset laserskannerit NavVis VLX 3, Läti ettevõtte A-Geo SIA kasutas mõõdistamiseks seadet Stonex X70Go SLAM ning Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) geoloogia instituudi tudengid k.a. lõputöö autor, viisid mõõtmisi läbi Stonex X120Go SLAM skanneriga.

Tööde teostamine toimus paralleelselt. Mõõdistatud objektideks olid läbinduse štrekid ning tõus, mis oli eelnevalt mõõdistatud minu poolt ka traditsioonilise tahhümeetrilise meetodi abil. See lõi eeldused otseseks metoodiliseks võrdluseks ning võimaldas hinnata laserskaneerimise rakendatavust allmaatööde tingimustes.

Punktipilvede genereerimise ja andmetöötluse viis läbi Hades Geodeesia OÜ aero-osakonna spetsialist, kasutades selleks spetsialiseeritud tarkvara, näiteks Blender ja CloudCompare tarkvarapakette.

8.4.1. Punktipilvede orienteerimine

Uus-Kiviõli II kaevanduses on rajatud geodeetiline mõõdistusvõrk, mis koosneb nii tasapinnalisest (XY) kui ka kõrguslikust (Z) võrgustikust. Võrgu punktides on lakke kinnitatud nael ja punkti number.

Enne skaneerimise alustamist viidi läbi kontrollpunktide määramine, et siduda kogu mõõdistatav ala kaevanduse geodeetilise võrguga. Selle protseduuri läbiviimiseks kasutati seadet NavVis VLX 3. Kuna võrgu punktid asuvad laes, tuli skanneri täpselt positsioneerimiseks ronida redelile ning asetada seade vahetult punktile. Seadet hoiti mõne sekundi jooksul statsionaarselt, võimaldades süsteemil fikseerida täpsed algkoordinaadid. Alles seejärel alustati liikuvat skaneerimist. Selline meetod osutus aga ebamugavaks ning kaasnes potentsiaalne kukkumisoht või seadme kahjustamise risk. Seetõttu tehti ettepanek paigutada tulevikus kontrollpunktid lisaks lakke kinnitamisele ka seintele või mõelda välja süsteem ajutiselt punktide madalama toomiseks mõõdistamise teostamise ajaks, parandades seeläbi juurdepääsetavust ja tööohutust.

Tuleb märkida, et Stonexi laserskanneritega kontrollpunkte ei mõõdetud, kuna punktide asukoht (laes) oluliselt raskendas seda tegevust. Seetõttu põhines nende seadmete töö üksnes sisemisel SLAM-tehnoloogial. Mõõdistamise käigus salvestasid seadmed punktipilve suhtelise asukoha ja orientatsiooni ilma väliste kontrollpunktideta. Järeltöölusel orienteeriti Stonexi seadmetega saadud punktipilved NavVisi seadmega kogutud punktipilve alusel. Tulemused näitasid, et Stonexi punktipilved olid sama usaldusväärsed kui NavVisi mõõdistustulemused ning saavutatud täpsus vastas tootja määratud suhtelisele täpsusele – kuni 6,0 mm mõlema seadme puhul.

8.4.2. Punktipilve kvaliteedi hindamine (NavVis VLX3)

Pärast skaneerimist teostati punktipilvede töötlemine ning loodi automaatne kvaliteediaruanne (Lisa 2), mille põhjal hinnati punktipilve geomeetrilist katvust ja täpsust kontrollpunktide suhtes. Töödeldud ja lõplik punktipilv kattis ala suurusega 21 889,04 m² ning mõõdistamine kestis kokku 1 tund ja 12 minutit, mille käigus salvestati ka 271 panoraampilti. Panoraampildid võimaldasid visuaalselt kontrollida nii skanneri trajektoori kui ka mõõdistusala täielikku katvust. Samuti võimaldavad pildid liikuda töödeldud andmetes ja liikuda ringi punktipilves analoogselt Google Maps'ile.

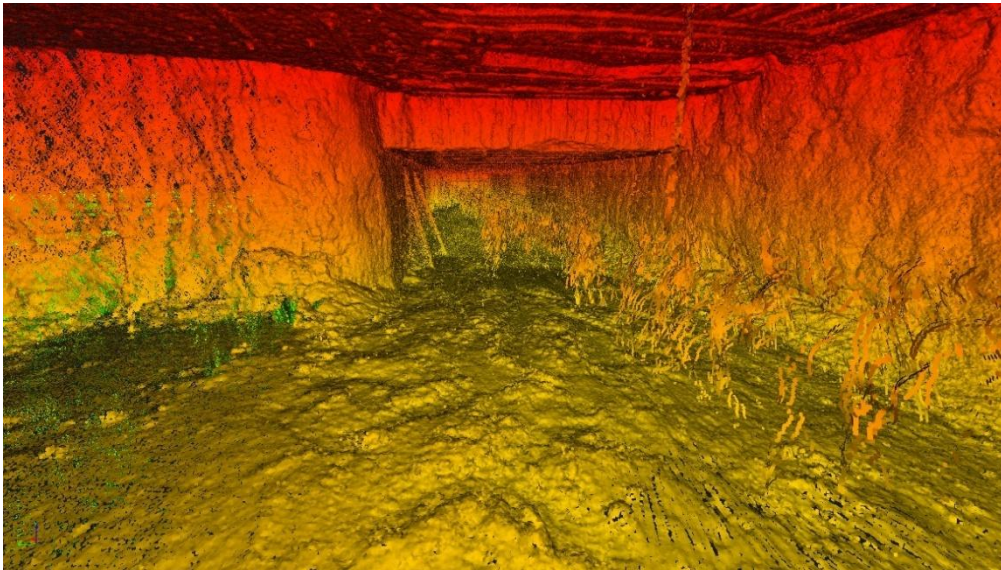
Kvaliteediaruandes esitatud lõplike optimeerimisjääkide (*optimization residuals*) järgi oli kontrollpunktide positsioonide lõplik hälve võrreldes mõõdistatud kontrollpunktidega väga väike, jäädes alla ± 2 mm, täpsemalt vahemikku -1,85 mm kuni +0,96 mm. Selline tulemus näitab punktipilve väga head geomeetrilist joondamist ning kinnitab kontrollpunktide ja skanneri täpset positsioneerimist mõõdistamisel.

Lisaks geomeetrilisele täpsusele hinnati punktipilve kvaliteet ka visuaalselt, kasutades X-Ray kaarte ja kvaliteedikaarte. X-Ray kaardid näitavad selgelt skaneeritud alade struktuuri, kus tumedamad alad tähistavad tihedamat punktide kogust ja paremat andmetihedust. Kvaliteedikaardid visualiseerivad trajektoori katvust ja panoraampiltide asukohti, aidates kontrollida mõõdistamise kvaliteeti ja ühtlust kogu mõõdistusalal.

8.4.3. Läbindustööde mahtude arvutamine ja võrdlemine

Mahu võrdlemiseks valiti üks kindel lõik, mis oli mõõdistatud kõigi kolme laserskanneriga (NavVis VLX 3, Stonex X70Go SLAM ja Stonex X120Go SLAM) ning lisaks traditsioonilise mõõdistusmeetodiga, et tagada tulemuste võrreldavus ja usaldusvärsus.

Enne mahtude arvutamist viidi läbi punktipilvede eeltöötlus, mille eesmärk oli kõrvaldada mõõdistustulemusi mõjutav müra ja ajutised objektid, nagu näiteks inimesed, seadmed ja mõõdistamise ajal laest langev vesi. NavVis VLX 3 tarkvara võimaldas punktipilvest automaatselt eemaldada ajutised objektid, mis märkimisväärselt vähendas käsitsi töötlusele kuluvat aega ja suurendas mõõdistamise efektiivsust. Stonex-seadmete punktipilved nõudsid seevastu käsitsi puhastamist, kuna nende seadmete tarkvara ei võimalda praegu järeltöötlusena automaatset liikuvate ja muutuvate objektide tuvastamist ega eemaldamist, mistõttu nende punktipilvede ettevalmistamine oli töömahukam ja aeganõudvam. See etapp oli vajalik, et tulemused kajastaksid ainult püsivat geomeetriat, võimaldades objektiivselt hinnata mõõdistatud mahtude täpsust eri seadmete vahel. Joonisel 31 on näidatud puhastamata punktipilv.



Joonis 31. Stonex X120Go perspektiivvaade puhastamata punktipilvest, kus punktide värvus kajastab nende kõrgust Z-teljel.

Tabelis 13 on toodud kaevandatud mahtude võrdlemise tulemused ja nende erinevused traditsioonilise meetodi suhtes, et näidata laserskaneerimismeetodite täpsust ja usaldusväärsust võrreldes seniste standartsete mõõtmismeetoditega.

Tabel 13. Kaevandatud mahtude võrdlemine ja erinevused traditsioonilise meetodiga.			
	Arvutatud maht (m ³)	Erinevus (m ³)	Erinevus (%)
Traditsiooniline mõõdistamine	4860.80	0.00	0.00%
NavVis VLX 3	4846.30	4.50	0.30%
Stonex X120Go	4842.77	18.03	0.37%
Stonex X70Go	4827.40	33.40	0.69%

Tulenevalt „Markšeiderimõõdistuse täpsustatud nõuded ja kord“ määrusest (2019, § 4, Lg 2, p 1) võib kordusmõõtmistel mõõtesuuruse väärtuse erinevus kuni 20 000 m³ mahu korral olla kuni 10%. Seega jäävad kõik mõõdistustulemused oluliselt alla lubatud kõrvalekalde piiri, mis kinnitab laserskannerite piisavat täpsust allmaatööde mahu hindamisel.

Juhul, kui mõõdistatav piirkond asub lahtitoestatud või varisemisohtlikul alal, ei ole sinna võimalik siseneda ning mõõtmine on seetõttu teostamatu (Joonis 32). Sellistes tingimustes on inimeste viibimine rangelt piiratud või keelatud, mistõttu traditsioonilised mõõdistusmeetodid ei taga andmete kättesaadavust ega tööohutust. Kaasaegsed laserskannerid võimaldavad siiski mõõdistada ka ohtlikke piirkondi, viibides ise ohutus kauguses. Sõltuvalt skanneri mõõteulatusest on võimalik andmeid koguda ilma vahetult ohualasse sisenemata, mis suurendab oluliselt tööohutust ja võimaldab saada tulemusi isegi piiratud ligipääsetavusega keskkondades.



Joonis 32. Lahtitoestatud ala, inimeste viibine keelatud.

8.5. Tõusu mõõdistamine mobiilsete laserskanneritega

Tõusu mõõdistamine rajatavas Uus-Kiviõli II kaevanduses viidi läbi mobiilsete laserskannerite Stonex X120Go SLAM (Joonis 33) ja Stonex X70Go SLAM abil. Tõus on keeruka geomeetriaga allmaastruktuur, mille täpne dokumenteerimine on oluline nii projekteerimise kui ka ohutuse tagamiseks. Mõõdistamise eesmärgiks oli hinnata SLAM-tehnoloogial põhinevate seadmete võimekust tõusu kujutamiseks ja tulemuste usaldusväärsust võrreldes varasemate traditsiooniliste mõõdistusmeetoditega.



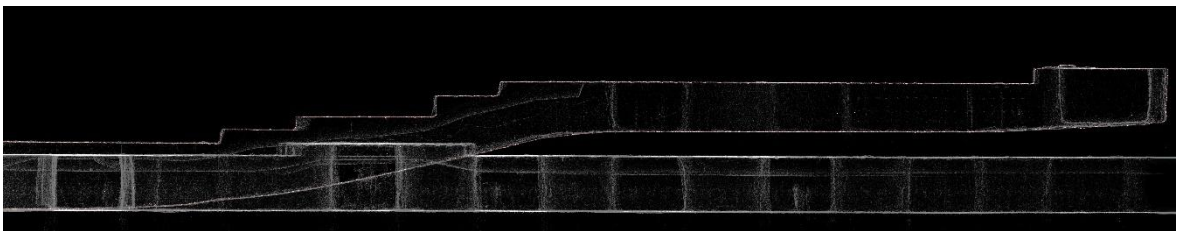
Joonis 33. Laserskanneri Stonex X120Go SLAM ettevalmistamine mõõdistustöödeks Uus-Kiviõli II kaevanduses.

Tõusu mõõdistamine Stonex-seadmetega oli väga kiire – kogu skaneerimine kestis alla kahe minuti. Tõusu piirkonnas laserskaneerimise abil teostatud mõõdistustel ei olnud vaja läbi viia eraldi geomeetrilist nivelleerimist, mis oleks olnud aja- ja töömahukas.

Hoolimata lühikesest mõõdistusajast koguti tihe ja detailne punktipilv, mis kajastab tõusu tegelikku geomeetriat. Punktipilve analüüsimisel selgus kogu olukorra ruumiline olemus – selgelt olid nähtavad kõik pinnavormide ebaühtlused ja kõrvalekalded. Sellist detailset ja visuaalselt informatiivset tulemust ei ole võimalik saavutada traditsioonilise tahhümeetrilise mõõdistusmeetodiga, mis baseerub vaid üksikpunktide määramisel. Laserskaneerimine võimaldas pidevat ja usaldusväärset dokumenteerimist kogu tõusu ulatuses. Visuaalseks analüüsiks koostati punktipilvedest tõusu külgvaated (Joonis 34 ja 35), mis näitavad skaneeritud trajektoori ulatust ja seina täpseid geomeetrilisi omadusi.

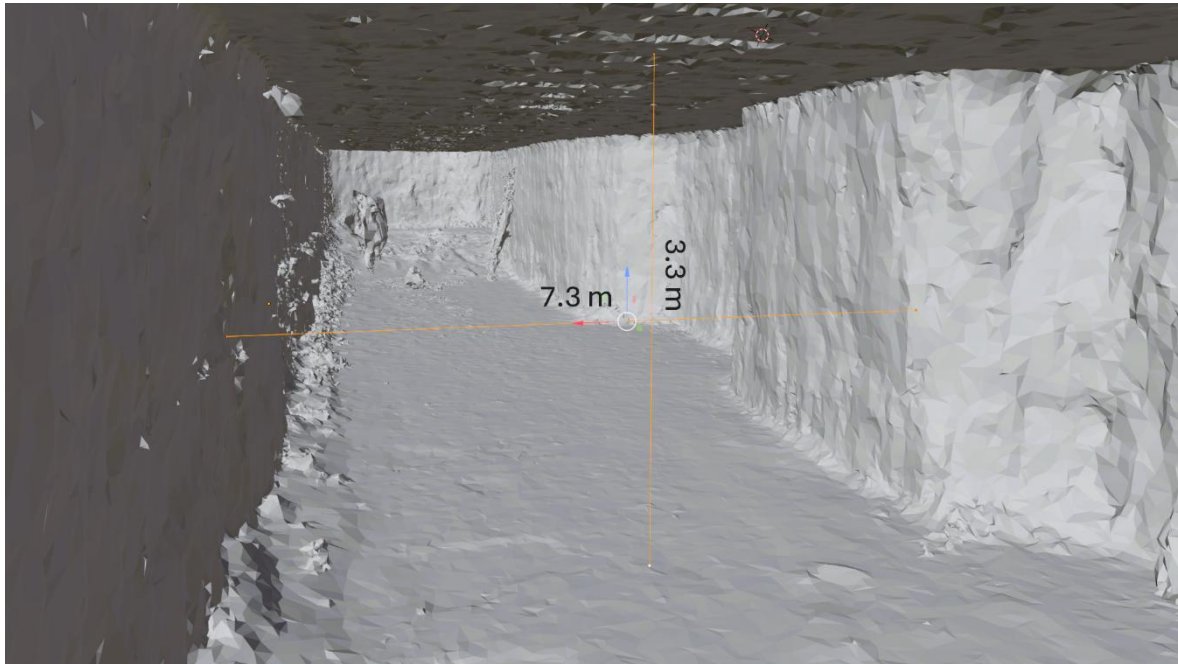


Joonis 34. Stonex X70GO Slam külgvaade puhastatud punktipilvest. Punktide värvus põhineb RGB-värviantmetel.



Joonis 35. Stonex X120GO Slam mõõdistatud tõusu külgvaade.

Punktipilvest loodud 3D-võrkmodelist saab hiljem võtta täpseid mõõtmeid, nagu on näidatud joonisel 36. See võimaldab analüüsida läbimõõte, kõrgusi, seinte vahekaugusi ja muid olulisi mõõtmeid ilma vajaduseta objekti füüsiliselt uuesti külastada. Selline funktsionaalsus muudab laserskaneerimise eriti väärtuslikuks tööriistaks projekteerimis-, modelleerimis- ja ohutusanalüüsi protsessides, sest võimaldab detailset geomeetrilist hindamist ka pärast mõõdistustööde lõppemist.



Joonis 36. Mõõtmete määramine laserskaneeritud 3D-mudelist.

Laserskaneerimine võimaldab punktipilvede ja panoraamvaadete abil rekonstrueerida olukorra kaevanduses sellisel kujul, nagu see tegelikult on. Selline täpne ja visuaalselt intuiitivne andmekogum annab ruumilise ülevaate ka inimestele, kes pole ise mõõdistusalal viibinud, parandades sellega kommunikatsiooni, otsuste kvaliteeti ja tööohutust allmaakeskkonnas. Tänu 3D visualiseerimisele on võimalus arhiveerida ja vajadusel võrrelda erinevatel aegadel tehtud skanneeringuid, et läbi aegade jälgida geoloogilisi ja mäendustehnilisi muutusi.

Järeldused ja kokkuvõte

Lõputöö raames viidi läbi mõõdistustööd Ojamaa kaevanduse 19. kambriplokis ja Uus-Kiviõli II kaevanduses kasutades mobiilseid laserskannereid: Stonex X120Go SLAM, Stonex X70Go SLAM, Gexcel HERON Lite ja NavVis VLX3. Kogutud andmete põhjal loodi professionaalse tarkvara abil täpsed punktipilved ja 3D-mudelid, mida võrreldi traditsiooniliste mõõdistusmeetoditega.

Tulemused kinnitasid, et mobiilne laserskaneerimine võimaldab mõõdistustöid teostada märgatavalt kiiremini – kuni 7,5 korda efektiivsemalt kui tavapäraste meetoditega. Laserskanneerid võimaldasid koguda tiheda ja täpse punktipilve, mille põhjal loodi detailsed 3D-mudelid. Need mudelid tõid selgelt esile kaevanduses esinevad geomeetrilised ebakorrapärasused, mida traditsioonilised üksikpunktide põhised mõõdistused ei suuda tuvastada.

Kambriplokis 19 mõõdetud mahu erinevus kahe meetodi vahel jäi 2,5% piiresse, mis on oluliselt väiksem kui määрусega lubatud kõrvalekalle (kuni 10% 20 000 m³ puhul), kinnitades laserskanneerite piisavat täpsust.

Kaevekäigu tõusu mõõdistamisel saavutati Stonex-seadmetega täpne tulemus vähem kui kahe minutiga, ilma vajaduseta eraldi nivelleerimis ja tahhümeetrilisi mõõdistusi läbi viia. Punktipilve põhjal loodud 3D-mudel võimaldab hiljem teha järeelmõõtmisi läbimõõtude, kõrguste ja vahekauguste osas ilma objekti uuesti külastamata.

Lisaks täpsele dokumenteerimisele toetab laserskaneerimine tööohutust ja kaevanduse projekteerimistöid. 3D-visualiseerimine võimaldab paremat ruumilist arusaama ka neile, kes objektile ise ei viibi, ning aitab ajas jälgida geoloogilisi ja tehnilisi muutusi. Seetõttu on laserskaneerimine väärtuslik tööriist mitte ainult dokumenteerimiseks, vaid ka ohutusjärelvalveks ja riskide ennetamiseks.

Laserskaneerimine ei ole mõeldud traditsiooniliste mõõteseadmete (nagu tahhümeetrid ja nivelliirid) asendamiseks, vaid pigem lisaseadmetena mõõtmistulemuste täiustamiseks. Laserskaneerimise majanduslik tõhusus seisneb eeskätt välitöödele kuluva aja olulises vähenemises ning saadava teabe täielikkuses, detailsuses ja usaldusväärsuses.

Tänuavaldused

Täna enda lõputöö juhendajat Erik Väli, kelle professionaalsed nõuanded, konstruktiivne tagasiside ja toetav suhtumine mängisid olulist rolli töö valmimisel. Suur tänu kuulub ka mu lõputöö kaasjuhendajale Vaiko Veeleidile väärtuslike nõuannete ja sisukate märkuste eest, mis aitasid töö sisu oluliselt täiustada. Täna südamest ka Hades Geodeesia OÜ kollektiivi, eelkõige Andrei Bljahhinit, kelle asjatundlik abi andmetöötlusel oli töö praktilise osa läbiviimisel suureks toeks. Samuti olen tänulik Ojamaa kaevanduse kolleegidele, kes oma nõu ja toega aitasid kaasa selle töö valmimisele. Eriline tänu kuulub mu perele toetuse, mõistmise ja kannustuse eest kogu õpingute vältel.

Kirjanduse loetelu

Abriss. (i.a). *Eesti Keele Instituut*.

Alkranel OÜ. (17.06.2022). *Uus-Kiviõli kaevanduse keskkonnaloa nr L.MK/329491 muutmise taotluse ja Uus-Kiviõli II kaevanduse keskkonnaloa nr L.MK/333343 muutmise taotluse KMH programm* [Keskkonnamõju hindamise aruanne]. https://www.vkg.ee/wp-content/uploads/2022/10/uus-kivioli-kaevanduste-kmh-programm_17-06-22_avalikustamiseks.pdf

Errapart, I. (2021). *Allmaa-markšeiderivõrkude orienteerimine vertikaalse kaeveõõne kaudu: Estonia kaevanduse näitel*. [Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/9ab606fc-cece-4d2d-9620-9cdf143ddc35>

Exyn Technologies. (i.a.). *3D mapping for underground mines*. Kasutatud 18.05.2025, <https://www.exyn.com/industries/mining-cavity-monitoring>

Frangé, J., Kramis, B., Griesser, C. ja Nebiker, S. (2018). *Comparative evaluation of three terrestrial and mobile mapping systems for 3D modeling of an abandoned gold mine*. FIG Congress, Türi. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2018/papers/ts05c/TS05C_frangé_kramis_et_al_9502.pdf

Gexcel. (2023). *Heron lite*. <https://heron.gexcel.it/en/gexcel-solutions-for-3d-surveying/heron-portable-3d-mapping-systems/heron-lite/>

Jasiewicz, J. ja Sobota, A. (2018). *Mobile inventory of underground objects using a portable scanner with SLAM technology*. E3S Web of Conferences, 44, 00024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400024>

Kajzar, V., Kukutsch, R. ja Heroldová, N. (2015). Verifying the possibilities of using a 3D laser scanner in the mining underground. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 12(1), 51–58. <https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0004>

Kattai, V., Kattai, T. ja Lokk, U. (1995). *Eesti põlevkivimaardla varu ümberarvutamine (seisuga 01.01.1995.a.)*. *Uus-Kiviõli uuringuväli* (EGF:4940). Geoloogiafond. <https://fond.egt.ee/fond/egf/4940>

Keskkonnakaitselubade register. (i.a). *Keskkonnaotsuste Infosüsteem KOTKAS, Keskkonnaamet*. Kasutatud 30.01.2025, <https://kotkas.envir.ee/>

Kokamägi, K. (2016). *Mobiilse laserskaneerimise kõrgusliku täpsuse hindamine erineva taimestiku korral*. [Bakalaureusetöö, Eesti Maaülikool]. <https://dspace.emu.ee/items/abce62d4-094c-4b80-83d8-97b200da1afc>

- Kovaljova, M. (2021). *Põlevkivi kadude analüüs ja optimeerimisvõimalused Estonia kaevanduse näitel*. [Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/en/item/7305071e-7216-4cc9-ac1b-22d2e19ea152>
- Laser Measure. (i.a). *Leica DISTO X310*. Kasutatud, 08.02.2025, <https://www.laser-measure.co.uk/product/leica-disto-x310/>
- Maa- ja Ruumiamet. (i.a). *Geoportaali maardlate kaardirakendus*. Kasutatud 28.04.2025, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>
- Maapõueseadus (27.10.2016). *Riigi Teataja*. Kasutatud 16.05.2025, <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122024013>
- Malberg, K. (2019). *Siseruumide ja allmaakaevetööde ruumikuju määramine mobiilse laserskaneerimisega*. [Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/6975047e-57a9-4424-9fcf-c9ac20e479e0>
- Markšneiderimöödistuse täpsustatud nõuded ja kord (27.05.2022). *Riigi Teataja*. Kasutatud 15.03.2025, <https://www.riigiteataja.ee/akt/124052022010>
- Mazin, V., Orekhov, S., Proode, A. ja Žalinov, S. (2024). *Uus-Kiviõli II kaevevälja kaevandamise projekt (P01.2023)*. Keskkonnaluba L.MK/333343.
- NavVis. (i.a). *NavVis VLX 3*. Kasutatud 12.02.2025, <https://www.navvis.com/vlx-3>
- Nivelliir. (i.a). *Eesti nõukogude entsüklopeedia*.
- Polügonomeetria. (i.a). *Eesti nõukogude entsüklopeedia*.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. [Dokoritöö. KTH Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:139761/FULLTEXT01.pdf>
- Runtal, E. (2017). *Prisma asendi mõju kõrguse märkimise täpsusele*. [Bakalaureusetöö, Eesti Maaülikool]. <https://dspace.emu.ee/server/api/core/bitstreams/0a35c76d-1e29-40d4-a50b-9184ae76ae4d/content>
- Ruumiandmete seadus. (2011). *Riigi Teataja*. Kasutatud 16.05.2025, <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122024017>
- Сливкин, М. (1971). *О съёмке камерных блоков со столбчатыми целиками* [Kambriplukkide tulptervikutega mõõdistamisest]. Jõhvi, Eesti.
- Sokkia. (2006). *SOKKIA SET530RK: Reflectorless total stations* [Brošüür]. <https://www.mertind.com/argentina/usados/SOKKIA%20SET530RK.pdf>
- Sokkia. (2007). *C300/C310/C320/C330 automatic levels* [Brošüür]. https://www.sokkia.com.sg/products/automatic/uploads/C300_310_320_331.pdf

- Stonex. (2022). *Stonex X120 GO Slam* [Brošüür]. https://stonexdocs.s3.eu-central-1.amazonaws.com/Brochure/Laser_Scanner/X120GO/X120GO_Brochure_ENG.pdf
- Stonex. (2024). *Stonex X70 GO Slam* [Brošüür]. https://stonexdocs.s3.eu-central-1.amazonaws.com/Brochure/Laser_Scanner/X70GO/X70GO_Brochure_ENG.pdf
- Talvik, R., Koger, A. ja Sein, O. (2014). *Eesti põlevkivimaardla Estonia kaevevälja Estonia kaevanduse varuplokk nr 16 kontrollmarkšneiderimõõdistamise seletuskiri (varu seisuga 30.06.2014) (Töö nr 14/1350).* OÜ Inseneribüroo STEIGER. https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/1/11/O%C3%9C_Insenerib%C3%BCroo_STEIGER._Eesti_p%C3%B5levkivimaardla_Estonia_kaevev%C3%A4lja_Estonia_kaevanduse_varuplokk_nr._16_kontrollmark%C5%A1eiderim%C3%B5%C3%B5distamise_seletuskiri._2014.pdf
- Tamm, J., Joosu, L., Vind, J., Leben, K., Habicht, H.-L., Maido, M., Morgen, E. ja Ani, T. (2021). *Maardlatele ja maavarade perspektiiv- ning levialadele taastuenergeetika taristu rajamise analüüs. Kirde- ja Kesk-Eesti (Uurimistöö aruanne), EGF 9549.* Eesti Geoloogiateenistus. <https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2023-07/Maardlatele%20ja%20maavarade%20perspektiiv-%20ning%20levialadele%20taastuenergeetika%20taristu%20rajamise%20anal%C3%BC%C3%BCs.%20Kirde-%20ja%20Kesk-Eesti%20%282021%29.pdf>
- Topcon. (2016). *OS series: On-board total stations* [Brošüür]. https://content.dicarlotech.com/hubfs/Total%20Stations/Topcon%20OS%20Series/Topcon-OS-series_brochure.pdf
- Van Wegen, W. (2018). *Surveying in the mining sector.* GIM International. <https://www.gim-international.com/content/article/surveying-in-the-mining-sector>
- Veersalu, K. (2019). *Uus- Kiviõli II põlevkivikaevanduse eelprojekt.* [Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/item/12280ca3-fecd-4657-a09f-d4b1a425b797>
- Vosselman, G. ja Maas, H.-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* Whittles Publishing.

Lisa 1. Tervikute pindala võrdlev tabel.

Tervik nr	Projekti pindala (m ²)	Traditsiooniline mõõtmine (m ²)	Laserskaneerimine (m ²)	Erinevus projektiga (m ²)	Erinevus traditsioonilisega (m ²)
1	29.16	36.4	35.2	+6.04	-1.20
2	29.16	32.6	31.1	+1.94	-1.50
3	29.16	33.5	30.4	+1.24	-3.10
4	29.16	32.1	30.7	+1.54	-1.40
5	29.16	35.9	34.9	+5.74	-1.00
6	29.16	36.2	36.7	+7.54	+0.50
7	29.16	26.5	26.5	-2.66	+0.00
8	29.16	34.0	33.4	+4.24	-0.60
9	29.16	32.9	31.1	+1.94	-1.80
10	29.16	33.7	31.4	+2.24	-2.30
11	29.16	36.1	33.6	+4.44	-2.50
12	29.16	36.8	35.6	+6.44	-1.20
13	29.16	34.9	31.2	+2.04	-3.70
14	29.16	35.1	31.9	+2.74	-3.20
15	29.16	34.4	32.0	+2.84	-2.40
16	29.16	37.3	36.1	+6.94	-1.20
17	29.16	32.8	31.2	+2.04	-1.60
18	29.16	40.7	37.7	+8.54	-3.00
19	29.16	35.2	34.1	+4.94	-1.10
20	29.16	35.1	31.8	+2.64	-3.30
21	29.16	31.6	29.4	+0.24	-2.20
22	29.16	31.7	29.8	+0.64	-1.90
23	29.16	33.2	32.3	+3.14	-0.90
24	29.16	26.5	26.6	-2.56	+0.10
25	29.16	30.1	30.3	+1.14	+0.20
26	29.16	28.3	27.7	-1.46	-0.60
27	29.16	33.8	35.5	+6.34	+1.70
28	29.16	30.6	31.8	+2.64	+1.20
29	29.16	29.7	30.3	+1.14	+0.60
Tervikute summa, m²	845,6 m ²	967,7 m ²	930,3 m ²		

Lisa 2. NavVis raport.

Report generated on 13/03/2025 11:57 AM

NavVis

QUALITY REPORT

SUMMARY

Dataset name: uuskaevandus
Recorded at: 20/01/2025 03:08 PM
Duration: 01:12:09
Device serial: G11-0028
System software: 2.24.4.1
Processed at: 22/01/2025 02:16 PM
Scanned area: 21889.04 m²
Billed area: 24729 m²
Panoramas: 271
Control points: 4

PROCESSING SETTINGS

Point cloud resolution: 5 mm
Colorized: Yes
Processing preset: Standard
Person blurring: No
Floor filling: Yes
Panorama embedded e57: Yes
Surveyed control points: Yes
Coordinate system: EPSG:3301

XRAY MAPS



The X-Ray Maps show the structure and layout of buildings, including the distribution of rooms, corridors, and other spaces. Darker areas indicate higher density.



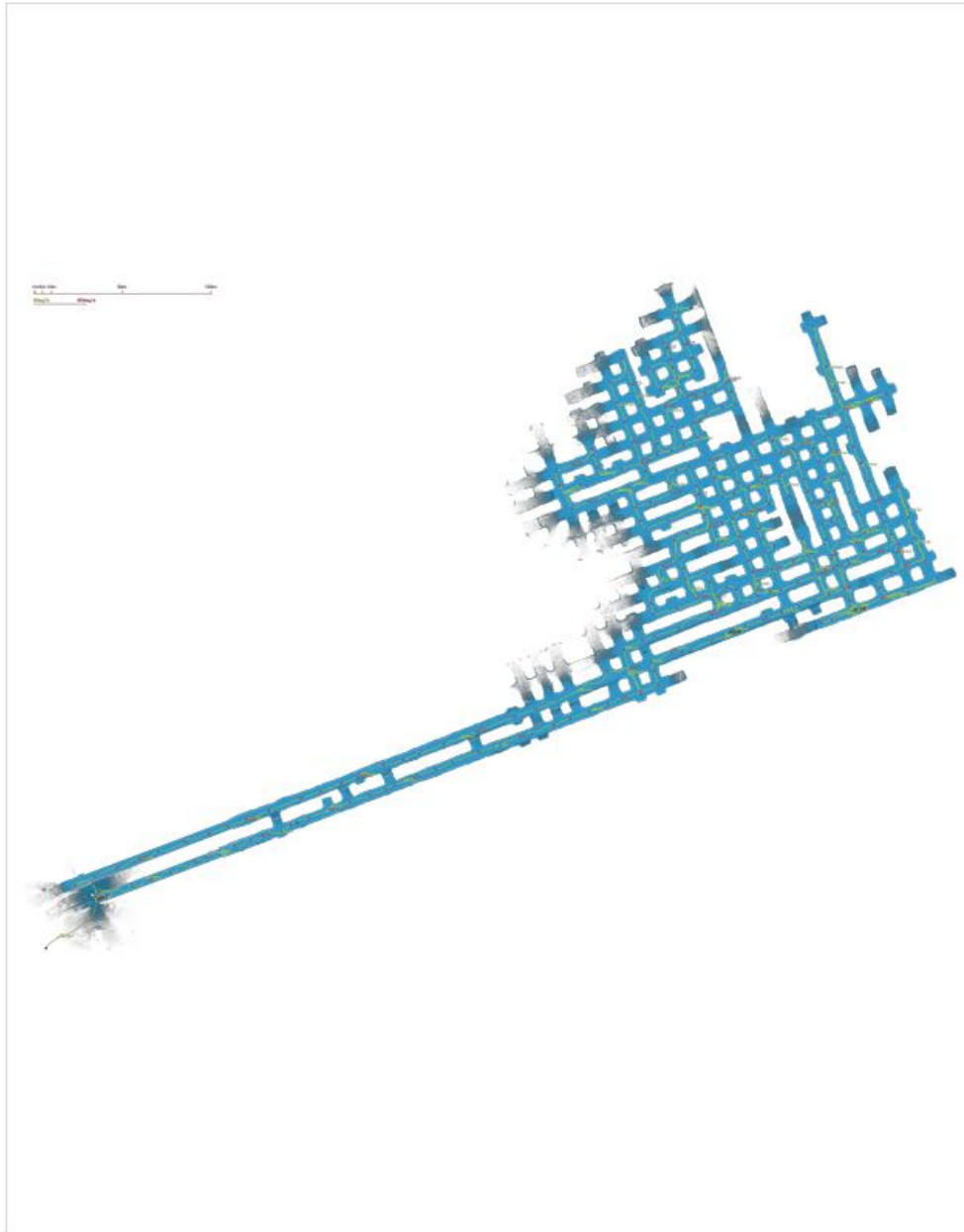
Top view (Orthographic Projection)



Side views (Orthographic Projection)

QUALITY MAP

- i** The quality map illustrates the mapping quality by displaying the trajectory, locations where panoramic images were captured and control points. It further visualizes the point cloud density: densely scanned areas are deep blue; densely scanned walls are bright white.



Quality Map after processing

CONTROL POINT DETAILS

Alignment residuals



Alignment residuals describe the discrepancies between estimated control point positions (i.e. computed by SLAM) and their actual position (as surveyed e.g. by a total station). To calculate this deviation the system does an initial, rigid alignment of the dataset into the coordinate system of the control points. The residuals indicate remaining deviations and in particular SLAM drift that can accumulate esp. when no loop closures are made.

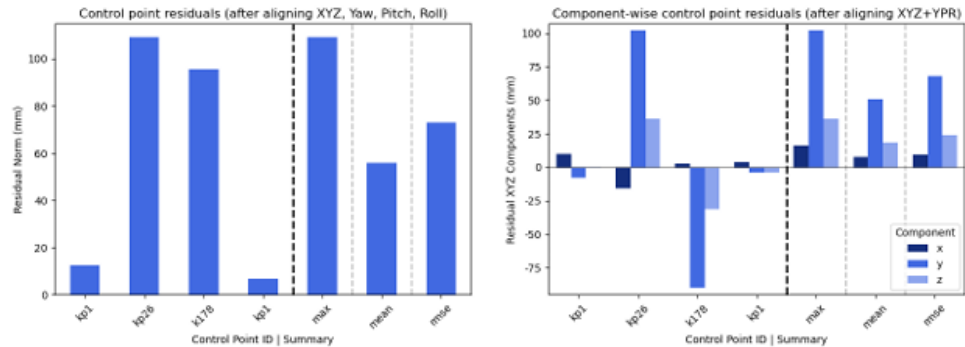
See our [documentation](#) for an introduction and background information on control points.

Control Point	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Delta Z [mm]
kp1	9.73	-7.70	-0.94
kp26	-15.95	101.88	36.26
k178	2.47	-90.25	-31.13
kp1	3.75	-3.93	-4.19

Control point used

Yellow $\geq +30\text{mm}$

Yellow $\leq -30\text{mm}$



Optimization residuals



Optimization residuals denote the deviation of the estimated control point position as computed by SLAM vs. the actual control point as surveyed after all optimization steps inside SLAM have been completed.

If control points were measured accurately and SLAM works correctly the deviations are expected to be close to zero; in the single-digit millimeter range. Large optimization residuals indicate that the control point position fed into the system are inconsistent with the observations from Lidar and SLAM. This may result e.g. from a control point position that was not surveyed correctly or the device has not been set precisely on the control point during mapping.

Control Point	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Delta Z [mm]
kp1	0.56	0.08	0.22
kp26	0.83	0.21	-0.13
k178	0.31	0.96	0.31
kp1	-1.85	-0.09	-0.61

Control point used

Green $\leq +5\text{mm}$

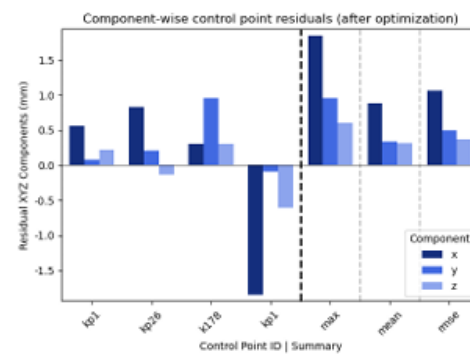
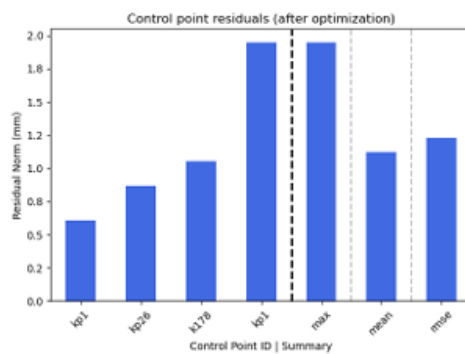
Green $\geq -5\text{mm}$

5mm < Yellow < 10mm

-10mm < Yellow < -5mm

Red $\geq +10\text{mm}$

Red $\leq -10\text{mm}$



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Irina Borozdyukhina

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Laserskaneerimise rakendusvõimalused ja eelised rajatava Uus-Kiviõli II kaevanduse markšeideritöodes“,

mille juhendaja on Erik Väli,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

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

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

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

[allkirjastatud digitaalselt]

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitstvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.