

Altkaevandatud alade stabiliseerimine ja maakasutuse võimaluste laiendamine Kiviõli põlevkivikaevanduse näitel

Magistritöö

Üliõpilane: Hendrik Klaas (LARM211944)

Juhendajad: Vesta Kaljuste, Energiasalv Pakri OÜ, vanem mäeinsener, MSc

Erik Väli, TalTech Geoloogia instituut, vanemlektor ja osakonnajuhataja, PhD

Heidi Elisabet Soosalu, TalTech Geoloogia instituut, vanemlektor, PhD

Õppekava: LARM18/20

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: Hendrik Klaas

[allkirjastatud digitaalselt]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendajad: Vesta Kaljuste, Erik Väli ja Heidi Elisabet Soosalu

[allkirjastatud digitaalselt]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Abstract	5
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu	7
Sissejuhatus.....	8
1. Varasem uuritus	11
2. Põlevkivi kaevandamine Eestis	14
3. Põlevkivi kaevandamiseks kasutusel olevad kaevandamismoodused ja -viisid Eestis.....	16
3.1 Pealmaa- ehk avakaevandamine	16
3.2 Allmaakaevandamine	17
4. Alternatiivsed võimalused suletud ja mahajäetud kaevanduste stabiliseerimiseks Eesti tingimustes.....	19
5. Katsetöö asukoha valik.....	20
5.1 Jõhvi vald.....	20
5.2 Toila vald.....	21
5.3 Lügánuse vald	21
6. Katsetöödeks valitud ala ja selle lähiümbruse kirjeldus.....	23
6.1 Lühike geoloogiline ja hüdrogeoloogiline iseloomustus.....	24
7. Ettevalmistustööd	25
7.1 Piiride tähistamine.....	25
7.2 Katendi eemaldamine ja ladustamine	25
7.3 Maa-aluse situatsiooni kaardistamine.....	27
7.3.1 Geo- ehk maaradar	27
7.3.2 Katsepuurimised	30
8. Kontrollitud maapinna langatus ehk puur-lõhketööd.....	32
8.1 Seismiliselt ohutu laeng.....	32
8.1.1 Maksimaalne lubatud võnkekiirus	32
8.1.2 Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viites.....	35
8.1.3 Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis	36
8.2 Õhulööklaine.....	37
8.3 Puur-lõhketööde parameetrid ja kildude laialipaiskumist vähendavad abinõud.....	37

9.	Teostatud puur-lõhketööde kirjeldus, saavutatud tulemused ja analüüs	39
9.1	Katsetöödel teostatud puur-lõhketööd	39
9.2	Lõhketöödest põhjustatud maavõngete mõõtmine.....	43
9.3	Puur-lõhketööde alternatiivne korraldamine.....	44
10.	Katseala korrastamine.....	47
	Järeldused ja kokkuvõte.....	49
	Tänuavaldused	51
	Kirjanduse loetelu	52

Annotatsioon

Eestis on allmaakaevandamisega hõlmatud ligikaudu 320 km² suurune maa-ala, kus kaevandamisest põhjustatud maapinna langetusega ala pindala on ligi 110 km². Aktiivseid põlevkivikaevanduste mäeeraldisi on käesoleval hetkel ligikaudu 512 km² ulatuses. Tänapäevaks ammendatud aladest ~130 km² suurusel alal on järelhooldusperiood lõppenud, millest tulenevalt tuleb maapinna võimalike vajumiste ja varingute näol esinevad probleemid nendel aladel lahendada omavalitsuse ja riigi poolt. Rakvere ja Lüganduse vallas on kogu altkaevandatud alal järelhooldusperiood tänapäevaks lõppenud. Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja töötada ja välja pakkuda sobivad tehnilised lahendused altkaevandatud aladele jäävate kvaasistabiilsete alade stabiliseerimiseks maa pealt teostatud puur-lõhketöödega. Uuringu käigus viidi läbi katsetööd Kiviõli põlevkivikaevandusega kattuv alal, eesmärgiga stabiliseerida kvaasistabiilne ala, millele oleks tulevikus võimalik rajada päikeseelektrijaam. Valitud katsealal tehti ettevalmistustööd mahus, mis võimaldaksid georadariga maa-aluse situatsiooni kaardistamist. Täiendavalt kasutati kaardistamiseks katsepuurimist. Puur-lõhketööd viidi läbi kahes etapis – esmalt purustati Kiviõli kaevanduse veokäigu linttervikud ning seejärel kogu kaevanduse lasumis asuv lubjakivimassiiv. Lõhketööde järgselt katseala korrastati ning tagastati maaomanikule. Kokkuvõtteks võib öelda, et kvaasistabiilsete alade stabiliseerimine maa pealt teostatud puur-lõhketöödega on võimalik, kuid optimaalseimate tulemuste saavutamiseks on vajalik läbi viia täiendavad samasisulised katsetööd.

Stabilization of Post-Mining Areas and Expansion of Land Use Opportunities: A Case Study of the Kiviõli Oil Shale Mine

Abstract

In Estonia, an area of approximately 320 km² is covered by underground mining, with an area of about 110 km² that has experienced surface subsidence due to mining. Currently, there are active oil shale mining permits covering approximately 512 km². The post-mining maintenance period has ended in depleted areas totaling around 130 km², where local municipalities and the government have to solve potential issues related to ground subsidence and collapses. Post-mining maintenance period has already ended for the entire underground mining areas in the municipalities of Rakvere and Lüganduse. The aim of this MSc thesis was to develop and propose suitable technical solutions for stabilizing post-mining quasi-stable areas using drilling and blasting from the surface. Experiments were carried out in an area overlapping with the Kiviõli oil shale mine, with the aim of stabilizing quasi-stable areas for potential future use as a solar power plant. Preparatory work was done at the selected project site to enable mapping of underground conditions using ground-penetrating radars. Additionally, test drilling was used for further mapping purposes. Drilling and blasting were conducted in two stages – the pillar that holds up the Kiviõli mine's haulage track was the first object, followed by the entire overlying limestone massif. The test site was rehabilitated and returned to the landowner after the blasting operations. In conclusion, stabilizing quasi-stable areas through surface drilling and blasting is feasible, but further experimentation is necessary for achieving optimal results.

Jooniste loetelu

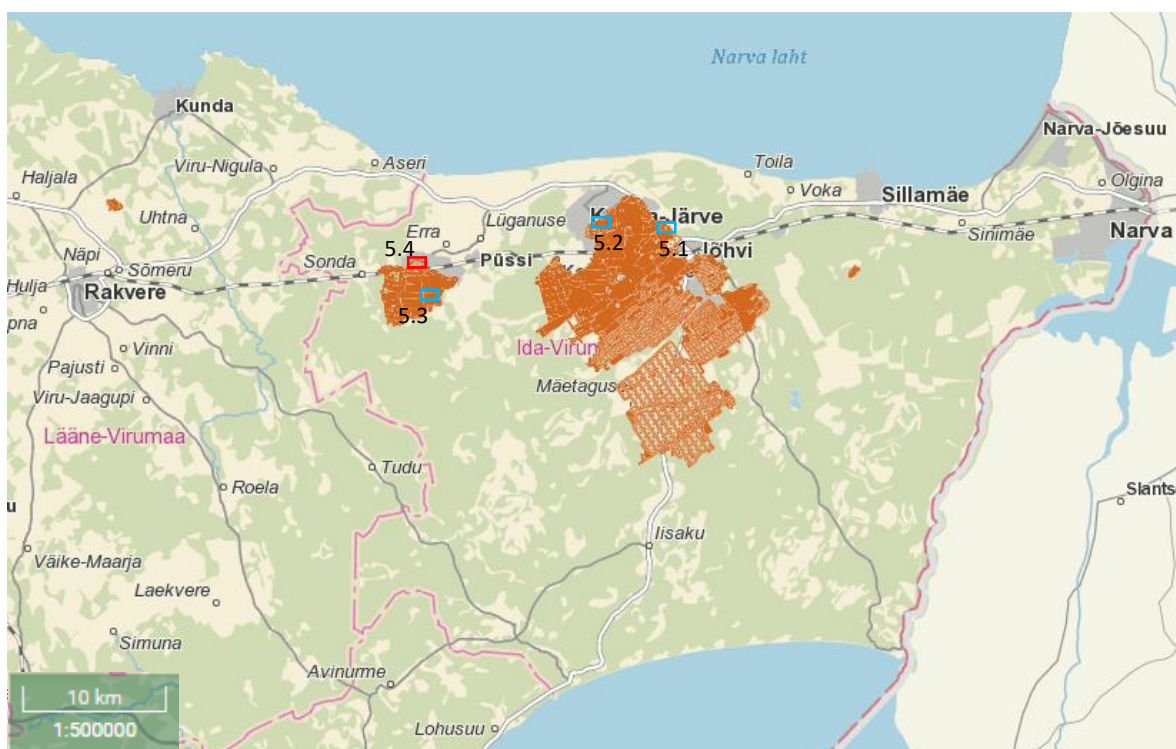
Joonis 1. Altkaevandatud alade kaart Lääne- ja Ida-Virumaal.....	8
Joonis 2. Uuringutöödeks ettevalmistatud katseala.....	10
Joonis 3. Põlevkivi kaevandatud kogused Eestis ajavahemikus 2010–2022.....	14
Joonis 4. Põlevkivi tootuskihind.....	18
Joonis 5. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Jõhvi valla territooriumil.....	20
Joonis 6. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Toila valla territooriumil.....	21
Joonis 7. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Lügánuse valla territooriumil.....	21
Joonis 8. Katsetöödeks valitud ala Lügánuse valla territooriumil.....	22
Joonis 9. Katseala paiknemine 1987. a koostatud Kiviõli kaevanduse mäetööde plaanil.....	23
Joonis 10. Pinnasetööde algusfaas, pildil nähtavad ka loodusesse märgitud piiripunktid.....	25
Joonis 11. Edasisteks töödeks ettevalmistatud katseala selle esimeses etapis.....	26
Joonis 12. 2D-profiil sügavushorisondil 9,0 m.....	28
Joonis 13. AS Teede Tehnokeskuse mõõtmisbuss katsealale sisenemas.....	28
Joonis 14. Mahamärgitud ruudustik.....	29
Joonis 15. Malå maaradarite mõõtmisandmete 3D-analüüsi tulemus.....	29
Joonis 16. Katsepuurimistöde skeem.....	31
Joonis 17. Linttervikute paiknemise skeem katsealal.....	31
Joonis 18. Hinnanguline situatsioon kaevanduses enne ja pärast tervikute purustamist.....	42
Joonis 19. Katseala peale lubjakivikonsooli puur-lõhketöödega kobestamist.....	43
Joonis 20. Korrastamistöde algusfaas.....	47
Joonis 21. Korrastatud katseala.....	48

Tabelite loetelu

Tabel 1. Maapinna püsivuse klassifikatsioon	12
Tabel 2. Põlevkiviga seotud aktiivsete mäeeraldiste ülevaatlik koondtabel seisuga 31.03.2023 ...	15
Tabel 3. Katendi mahud	26
Tabel 4. Konstruktsioonide ja seadmete vibratsiooni indikatiivsed piirväärtused	33
Tabel 5. Maavõngete mõõtmistulemused 18.10.2023	43
Tabel 6. Maavõngete mõõtmistulemused 22.12.2023	44

Sissejuhatus

Allmaakaevandamise moodusel on Eestis kaevandatud peamiselt põlevkivi, kuid lisaks sellele ka vähesel määral fosforiiti ja graptoliitargilliiti, kaasproduktina toodeti eelnevale lisaks ka klaasliiva. Suurem osa altkaevandatud aladest paiknevad Ida-Virumaal, jäädes Lüganuse, Alutaguse, Jõhvi, Toila valdade ning Kohtla-Järve linna territooriumile. Käesolevaks hetkeks moodustavad altkaevandatud alad Eestis vähemalt ligi 320 km² suuruse ala, hõlmates ligikaudu 0,75% kogu riigi maismaa pindalast (joonis 1). Aktiivseid põlevkivikaevanduste mäeeraldisi on Ida-Virumaal käesoleval hetkel ligikaudu 512 km² ulatuses, millest ammendunud altkaevandatud alad moodustavad ca 65%, st ligikaudu 333 km².



Joonis 1. Altkaevandatud alade (oranž) kaart Lääne- ja Ida-Virumaal. Sinisega on märgitud potentsiaalsed katsealad, punasega katsetöödeks valitud ala (*Maa-amet, i.a.a*)

Põlevkivi ja selle tööstuslik kaevandamine on alates 1918. aastast olnud üheks riigi oluliseimaks majandusharuks. Samas saab pikaajalise praktika tulemusena arutleda nii sotsiaalsete- ja keskkonnamõjude teemadel. Keskkonnamõju on erinevatest külgedest analüüsitud ja kirjutatud lõputöid, artikleid ning teadustöid (nt Erg, 2005; Selberg jt, 2009; Väizene jt, 2016; Orru jt, 2020). Kui maavara ammendamisele järgneval kaevanduste sulgemisel väheneb märkimisväärselt kaevanduse ja sealse tegevuse mõju keskkonnale, siis nende järjelmõjud võivad teatud juhtudel ennustamatult ka pragusel ajal ilmneda. Tänapäevani tuntavad kaevandamisest tulenevad mõjud on tihti esindatud maapinna vajumiste ja varingutena kvaasistabiilsetel aladel, põhjustades ulatuslikke kahjustusi muuhulgas ka altkaevandatud aladele rajatud eluhoonetele ja teistele ehitistele.

Altkaevandatud alad on liigitatud järgmiselt:

1. Püsiv maa;
2. Langetatud maa;
3. Stabiilne maa;
4. Kvaasistabiilne maa.

Kvaasistabiilseteks aladeks nimetatakse selliseid alasid, kus lae ja maa hoidmiseks ette nähtud tervikud, täiteriidad ja toestikuelemendid ei purune kaevandamise ajal, kuid see võib toimuda hiljem. Teadmiste kohaselt on selline maa põlevkivimaardlas:

1. **Avamusjoone lähedal, kus käikude kohal olev lasum on õhem kui 10–12 m;**
2. **Langetatud alal vajumismolli perve ja moldi ümbritseva püsiva või stabiilse maa vahel, eriti kaevelangi või -ploki alguses ja lõpus;**
3. Kamberkaevandatud alal, mille sügavus on suurem kui 35–40 m ja millede tugitervikud on kalkuleeritud kestusega kuni 2 aastat. (Reinsalu jt, 2015)

Käesoleva lõputööga hõlmatud katseala on fokuseeritud kahele esimesele tingimusele.

Loodusliku kivimimassiivi tugevust mõjutavad mitmesugused maapõuehäired, näiteks lõhed, kivimi moone, varieeruv poorsus ja niiskus. Seepärast peetakse tavaolukorras püsivate tervikute ootamatut purunemist hälbeks, kusjuures põhjuseks võivad olla geoloogilistest protsessidest tulenenud kivimi nõrgenemine, lubamatud või juhuslikud kõrvalekaldumised tehnoloogiad ja kivimi tugevuse harvaesinevad anomaalsed muutused.

Tugistruktuuride purunemise aega on väga keeruline prognoosida, mistõttu on tänaste teadmiste kohaselt kvaasistabiilsetele aladele hoonete ja rajatiste ehitamine rangelt mittesoovitav. Erandiks on geotehnilist ekspertiisi või projekti omavad alad. (Reinsalu, 2009) Eelnevast tulenevalt on Ida-Virumaal palju rikutud maad, kus tuleb lahendada kaevandamisjärgse maapinna ettearvamatute võimalike vajumiste ja varingutega seonduvad probleemid, et soodustada nimetatud maa-alade taaskasutusvõimalusi tulevikus. Kvaasistabiilsete alade stabiilseks muutmiseks on ka üksikuid teistsuguseid võimalusi, kuid käesolev lõputöö keskendub puur-lõhketöödega allmaatervikute purustamisele pealmatööde abil ehk maapinna stabiliseerimisele kontrollitud langatusega.

Vanade ja osaliselt suletud põlevkivikaevanduste taastamistööd tuleb teostada vastutustundlikult ja hoolikalt eelkõige selleks, et tagada taastamistööde ohutus ning nende vastamine keskkonnanõuetele. Ammendatud ja altkaevandatud alad on üldjuhul täitunud veega ning sellest tulenevalt on nimetatud aladele ligipääs raskendatud, mis omakorda muudab kaevandatud alade tagasitäitmise, näiteks põlevkivitööstuse jääkidega (aheraine ja tuhk) maa-aluste töödega, ohtlikuks ja võrdlemisi kulukaks tegevuseks.

Käesolev uuring on läbi viidud endise Kiviõli põlevkivikaevanduse aladel ning täidab peamiselt kahte eesmärki, mis avalduvad uudses idees ennetada altkaevandatud aladel uute vajumite ja varingute teket ebatraditsioonilise meetodiga:

1. allmaatervikute purustamine maa pealt teostatud puur-lõhketöödega ehk altkaevandatud alade kontrollitud langetamine pealmaatööde abil;
2. kaevandamisjäätmete kasutamise tagasitäitena uudne lahendus langetatud maa-ala korrastamiseks ning selle stabiliseerimiseks.

Eesmärgini jõudmiseks moodustati Ida-Viru maakonnas Lügánuse vallas Kiviõli linnas asuvalle Kiviõli ettevõtlusala 1 (katastritunnus 30901:004:0026) kinnistule 990 m² suuruse pindalaga katseala (joonised 1 ja 2). Katseala kattub endise Kiviõli põlevkivikaevandusega, kus mäetööd toimusid käsilaavadega 1930ndatel.



Joonis 2. Uuringutöödeks ettevalmistatud katseala

Katseala täpsem asukoht määrati Maa-ameti reljeefkaardi, Maa-ameti ja TalTechi koostöös koostatud altkaevandatud alade kaardi (Maa-amet, i.a.a) ning olemasolevate mäetööde plaanide abil. Mäetööde plaanid digitaliseeriti käesoleva lõputöö käigus. Katseala märgiti loodusesse, valmistati ette täiendavateks mõõtmisteks, langetati puur-lõhketöödega ning lõpetuseks korrastati ehk taastati katsetöödele eelnenud seisund. Katselapiga kattuva endise põlevkivikaevanduse situatsiooni väljaselgitamiseks kasutasin erinevate tootjate 80, 100 ja 250 MHz sagedustega maaradareid ning katsepuurimisi. Katsetööde tulemuste mõõdistamiseks kasutasin Trimble R12 GNSS süsteemi. Katseala mõõdistasin ja jälgisin selle arenguid kuue kuu jooksul peale teostatud puur-lõhketöid.

Uuringuülesande püstitus lähtub laiemast eesmärgist töötada välja uudne tehnoloogia altkaevandatud alade stabiliseerimiseks ja korrastamiseks eelkõige madalate (st maapinnale lähedaste) Eesti põlevkivikaevanduste tingimustes, kasutades maksimaalses ulatuses ehitus- ja kaevandusjäätmel ning vähendades seeläbi kaevandamisega rikutud alade negatiivseid (sotsiaal- ja keskkonnavalaseid) mõjusid tulevikus.

1. Varasem uuritus

Eesti on siiani üheks ainsaks riigiks kogu maailmas, kus on põlevkivi kaevandatud allmaakaevandamise moodusel nii väikestel sügavustel ning sellest tulenevalt on antud teemaga seotud uuringud läbi viidud peamiselt Eesti teadlaste ja inseneride poolt. Uuritud ja mõneselt väljatöötatud kaevanduste sulgemise tehnoloogiad pärinevad põhiliselt viimase 25 aasta jooksul teostatud uuringutest.

Maavarade, sh põlevkivi kaevandamine on paratamatult seotud ümbritseva keskkonna olulise mõjutamise ja sellele ühel või teisel määral kahju tekitamisega ning need ei lõpe mäetööde lõpetamise ja kaevanduse sulgemisega. Käesoleval ajal on võimalik põlevkivi kaevandamise keskkonnamõjusid oluliselt minimeerida juba mäetööde käigus. Kaevandamisjärgse keskkonnamõju vältimise ja leevendamise seisukohast on oluline altkaevandatud alade edasise haldamise korraldamine ning vältida igasuguste sanktsioneerimata prügilate tekkimist kaevandatud aladele. Altkaevandatud aladel on ülemised põhjaveekihid oluliselt tundlikumad, mistõttu tuleb hoolikalt järgida keskkonnanõuetest lähtuvaid piiranguid. Veerežiimi muutused vajavad igal konkreetsel juhul uurimist ning seire ja välitööde korraldamist. Maapinna deformeerunud aladel vajavad erikäsitlust langatusnõlvade kaldenurgad ja need tuleks õigete otsuste vastuvõtmiseks eelnevalt üle mõõdistada (Liblik jt, 2005).

Pastarus jt (2011) on uurinud kaevanduste tagasitäitmist: kuivõrd täitmise tehnoloogia rakendamisel kaevandustes on suur positiivne mõju Eesti põlevkivitööstusele, kuna aitab kokku hoida maavaravaru ja seejuures tõsta tööde efektiivsust ning ohutust. Kaevandamise täitmise tehnoloogia kasutamiseks on vajalik kasutatava kaevandamisviisi moderniseerimine. Maailmapraktikas on laialdaselt levinud tagasitäitmine täitesegudega, mis põhinevad fossiilsete kütuste põlemisel tekkinud tuhal või rikastusjääkidel, kuid väljatöötatud tehnoloogiad ei ole Eesti tingimustes üks-ühele kasutatavad. Üldiselt kasutatakse erinevates maailma kaevandustes pea kõiki väljatöötatud täitmistehnoloogiaid ja paljude puhul on nende katsetamine algusjärgus (nt aheraine-lendtuha betoontökked, laustäitmine, kihiline valamine, mehaaniline ladustamine ja hüdrotäitmine). Erinevate tardsegudega, mis baseeruvad põlevkivituha, rikastusjääkide ja liiva baasil, täitmist on Eestis uuritud ja katsetatud alates 1980. aastast. Tänapäevaks on sellist tehnoloogiat praktiliselt katsetatud Kiviõli kaevanduse sulgemisel, kus täideti ca 30 tuhat m³ kaeveõõnsusi maapealsete objektide kaitseks. (Pastarus jt, 2011)

Väizene jt (2014) on läbi viinud Ida-Virumaa põlevkivi kaevandamisalade ruumilise planeeringu hinnangu, mille eesmärk oli koostada ekspert hinnang 2001. aastal kehtestatud Ida-Virumaa põlevkivikaevandamisega hõlmatud aladele. Projekti käigus analüüsiti kvaasistabiilsetele aladele ehitamistingimuste seadmist ja ammendatud karjäärialade taaskasutusvõimalusi. Kaevandamise tehnoloogiast ja maapinna püsivuse klassifikatsioonist lähtuvalt hinnati altkaevandatud maa püsivust ja selle kasutamise võimalusi hoonete ja rajatiste ehitamiseks ning põllu- ja metsamajanduslikuks maaviljeluseks erinevate varasemate uuringute põhjal (tabel 1).

Tabel 1. Maapinna püsivuse klassifikatsioon (Väizene jt, 2014)

	Kaevandamise tehnoloogia konstruktsioonid ja	Kaevandamis-sügavus (katte kivimite paksus), m	Väljamispaksus, m	Maa vajumise sügavus, m	Nõlva kaldenurk, °	Püsivuse klass	Hoonete, rajatiste chitamine	Põllu- ja metsamajanduslik maaviiljelus
1	Paarisstrekkiidega	12...15	2,5	≤0,7	2...3	Langetatud	Arvestada maa hilise vajumise võimalikkust ja suurust	Arvestada niiskuse- režiimi võimalikku muutust
2	Paarislaavadega	12...44	2,5	≤0,9	2...4	Langetatud		
3	Kombain	10...55	1,5	0,8...1,5	4...7	Langetatud		
4	Kamber Kamber (Sundvaristamine)	<35...40 >35...40 40...55	2,8 2,8 (3,8**)	≤0,025 1,5...2,0 1,5...2,0	0 4...6 4...6	Stabiilne Kvaasistabiilne Kvaasistabiilne	Kerged chitised Keelatud* Keelatud*	Piirangud puuduvad Kultuuride hävimise risk Kultuuride hävimise risk
5	Hoidetervikud, mahakantud varu	12...70	0	0	0	Püsiv	Piirangud puuduvad	Piirangud puuduvad
6	Strekid, käigud Strekid, käigud	<10...12 >10...12	3...4 3...4	<10 0	85...90 0	Kvaasistabiilne Stabiilne	Keelatud* Kerged chitised	Kultuuride hävimise risk Piirangud puuduvad
7	Konsoolne lagi	12...55	1,5...2,5	0,7...1,0	3...5	Kvaasistabiilne	Keelatud*	Kultuuride hävimise risk
8	Šurfid, šahtid	10...70	-	>10	80...90	Kvaasistabiilne	Keelatud*	Kultuuride hävimise risk
9	Puuraugud	10...70	-	0	0	Püsiv	Piirangud puuduvad	Piirangud puuduvad

*lubatud erandkorras geotehnilise ekspertiisi alusel; **ebapüsiva lae korral Estonia kaevanduses

Veiko Karu (2009) on välja toonud altkaevandatud maa püsivuse probleemid lähtuvalt sel ajal planeeritud taristuehitusobjektidest, milleks on Kukruse-Tammiku kõrvalmaantee (nr 13134) ja Pauliku raudteeviadukt. Artiklis on esitatud alternatiivsed võimalused objektide mullete rajamiseks, kuivõrd tavapärasest teedehituse praktikast lähtuvalt võivad maantee ja viadukti mulded vajumite tõttu deformeeruda või suuremaid kahjustusi saada. Põhiliselt käsitleti mulde ja viadukti rajamist vaiadele toetuvatele sammastele, mis omakorda toetuvad altkaevandatud alade lamamis lasuvale lubjakivikihi, mis kõrvaldab vajumise tekkimise võimaluse.

Kaevandatud alade tagasitaitmine on üldjuhul tehnoloogiliselt ja majanduslikult otstarbekas teha paralleelselt maavara väljamisega. Selliselt on võimalik minimeerida kaevandatava maavara kadu ning tagada kaevanduste efektiivsem toimimine ja turvalisus. Tagasitaitmiseks on sõltumata kaevanduse sügavusest, kuid sõltuvalt ala konkreetsetest geomehaanilistest tingimustest võimalik kasutada nii tsementeerimata kui ka tsementeeritud materjale. Enamlevinud materjalideks on kaevanduste tagasitaitmiseks kohapeal tekkiv aheraine, tsementeeritud kivitäide (CRF) kui ka erinevad hüdraulilised täitematerjalid. (Sivakugan jt, 2015)

Tarmo Tohver (2010) on käsitlenud kõrg-selektiivset kaevandamistehnoloogiat ja valikpurustamise kasutamist selliselt, mis võimaldaks koos põlevkiviga toota parima kvaliteediga aherainekillustikku. Kõrgema kvaliteediga, eelkõige külmakindlusega $F < 2\%$ ja $2\% < F \leq 4\%$, killustikku on muuhulgas võimalik kasutada teede- ja üldehituses, kuid sellest madalama kvaliteediga materjali saab edukalt kasutada kaevandatud alade tagasitaitmisel. Kuna maa-alustes tingimustes püsib temperatuur pidevalt üle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ei ole külmakindlus tagasitaitteks kasutataval materjalil oluline. Sarnaselt on Valdo Tohver oma bakalaureusetöös (2019) käsitlenud aheraine sõelmete kasutamist ja selle mõju keskkonnale. Töö eesmärgiks oli pakkuda välja tehniline lahendus jäätmete ladustamiseks maa alla kamberploki tingimustes ning anda majanduslik hinnang aheraine kasutamiseks täitematerjalina. Töös pakuti välja majanduslikult teostatav täitemistehnoloogia, mis baseerub täitesegu transpordil pump-betoonmikseritega ja segu hilisemal pumpamisel tervikute vahelistesse tühimikesse.

Väli jt rakendusuuring (2021) käsitleb põlevkivi kaevis allmaarikastamist ja rikastusjäädade ladustamist väljatöötatud alasse. Allmaarikastamisel on mitmeid eeliseid, millest eelkõige

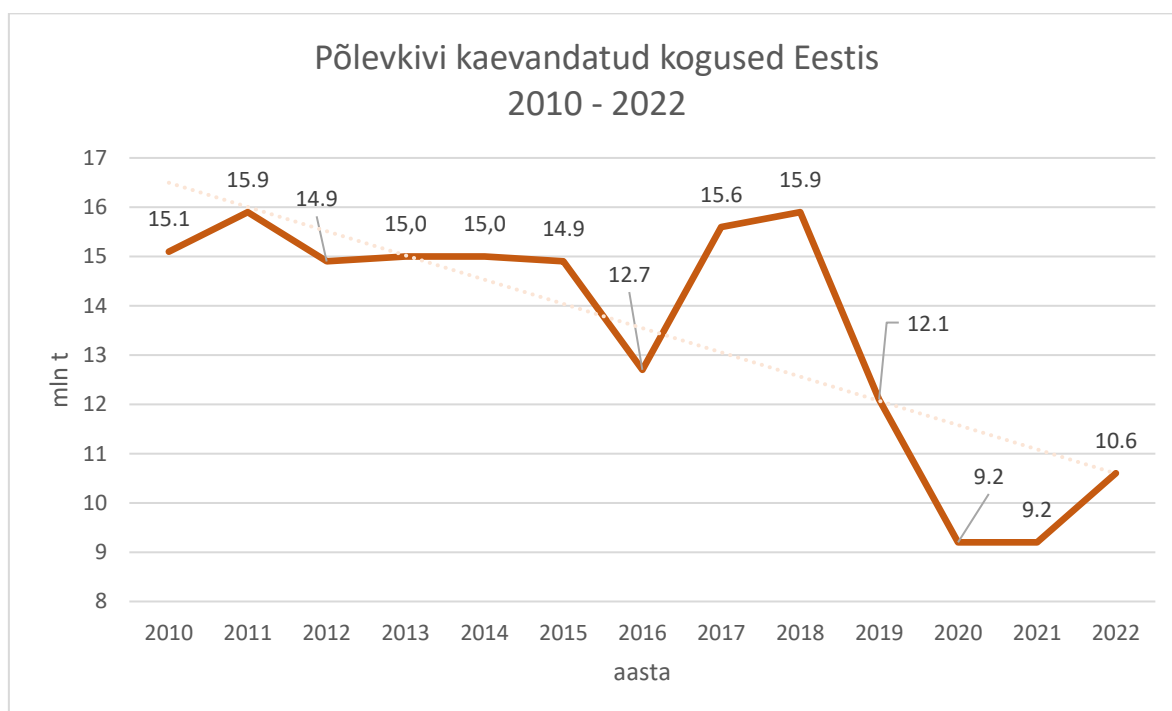
vähenevad kaevisse veo, tõste ning rikastamise kulud ning kulutused jäätmete ladustamisele maa peal. Samuti aitab allmaarikastamine kaasa maapealse tehno kompleksi ehituskulude vähendamisele, vähendab maapealset keskkonnamõju. Uuringu autorid pakuvad välja erinevaid viise allmaarikastamisel tekkivate jäätmete käitlemiseks nende ladustamise teel kamberplokkidesse väljatöötatud aladesse. Muuhulgas jõuti järeldusele, et Eesti põlevkivikaevanduste kamberplokkidesse rikastussõlmede rajamine on tehniliselt võimalik ning on kasulik nii keskkonnanohiu kui ka arendaja majanduslikus aspektis.

Madis Osjamets (2024) on välja töötanud meetodi altkaevandatud alade stabiliseerimiseks põlevkivitööstuse jääkmaterjalidega, mis on alternatiiviks minu käesolevas magistritöös käsitletud tehnoloogiale. Osjamets viis uuringu käigus läbi katsed kaevanduskäikude tagasitäitmiseks põlevkivielektrijaamast pärineva lendtuha ja vee seguga. Erinevalt varasematest tagasitäite uuringutest oli Osjametsa uuring fokuseeritud maapinnalt seguga tagasitäitmise meetodikal. Töö käigus täideti Kohtla-Järve linnas asuv 10 meetri pikkune kaevanduskäigu lõik lendtuha ja vee seguga. Tagasitäite pumpamiseks kaevanduskäiku puuriti kuus spetsiaalset puurauku, mille sisse paigaldati kaevanduse põhja ulatuv täitetoru. Tuhk segati veega *in-situ* ning see pärines Eesti elektrijaama kuivsilost. Kokku kasutati katsetöödel 74 m³ põlevkivi lendtuha, mis moodustas kaevanduskäiku pumbatuna keskmiselt 1,6 meetri paksuse tuhkbetooni keha. Kokku kulus segu segamiseks ja pumpamiseks koos tuha transpordiga 13 päeva, kuid täitmise kiirust on võimalik tõsta rohkemate ja võimsamate seguautode kasutamisega. Põlevkivituhaga tagasitäitmise mõjul tõuseb täiteala vahetus läheduses sulfaadisisaldus veelgi. Keskkonnakaitseliselt ongi see tagasitäitmise puhul kõige olulisem mõju. Seetõttu ei ole mõistlik põlevkivituhaga tagasitäitmist teha maapinnalähedase põhjaveekihi joogiveekaevude toitealadel. (Osjamets, 2024)

2. Põlevkivi kaevandamine Eestis

Põlevkivi (tuntud ka kui *kukersiit*) kaevandamine ulatub Eestis tagasi enam kui sajandi tagusesse aega. Esimesed põlevkivikarjäärid avati Eestis juba 1916. aastal (Toomik ja Liblik, 1998) Kohtla-Järve piirkonnas. Esimesena avatud karjääride hulka kuulusid näiteks Pavandu, Kukruse ja Järve karjäärid (Tammiksaar, 2015). Esimeses allmaakaevanduses, Kukruse kaevanduses, alustati põlevkivi kaevandamisega 1921. aastal (Jürs ja Reinsalu, 2015). Alates sellest ajast on põlevkivi kaevandamine olnud üks Eesti majanduse olulisemaid tahkusi, mis on endaga kaasa toonud ka kompleksed probleemid nii kohalikele kogukondadele kui ka looduskeskkonnale.

Põlevkivi kaevandamise tippajad olid 1980-ndate alguses, kui aastane tootlikkus ulatus 30 mln tonnini (Veiderma, 2003). Viimase kolmeteistkümnepäeva (2010–2023) aasta jooksul ulatus maksimaalne tootlikkus 15,9 mln tonnini 2011 ja 2018 aastal. Väikseimad tootlikkused olnud 2020 ja 2021 aastal, mil väljati 9,2 mln tonni põlevkivi (joonis 3) (Ots, 2022). Põlevkivi kaevandamise langustrend on eelkõige seotud riiklike ja rahvusvaheliste regulatsioonidega keskkonna- ja energiasektoris, mille eesmärk on vähendada süsinikuheitmeid energiatootmises.



Joonis 3. Põlevkivi kaevandatud kogused Eestis ajavahemikus 2010–2022 (andmed: Maa-amet, i.a.b)

Põlevkivi kaevandamine ja selle töötlemine on aegade algusest olnud keeruline protsess, kuna põlevkivi sisaldab palju erinevaid mineraale koos teiste vajalike orgaaniliste ühenditega. Üleilmselt peetakse Eestis leiduvat põlevkivi üheks kõrgeima kvaliteediga (st suurima kütteväärtusega) põlevkiviks maailmas, kuid kõrge kvaliteeditaseme säilitamine pikemas perspektiivis muutub kaevandamise laienemisel maardla äärealade suunas üha keerulisemaks (Veiderma, 2003). Seega

on vajalik arendada olemasolevaid ning võtta kasutusi uusi meetodeid ja tehnoloogiaid maavara kaevandamiseks ning kaevis rikastamiseks.

Käesoleva uuringu koostamise hetkel on Eestis registreeritud 18 põlevkivikarjääri ja -kaevanduse keskkonnaluba, millest suurem osa kuulub rahvusvahelisele energiaettevõttele Enefit Power AS. Täiendavalt on Vabariigi põlevkivisektoris esindatud ka Eesti suurtöösturid Viru Keemia Grupp AS, Kiviõli Keemiatööstuse OÜ ning Kunda Nordic Tsement AS. Aktiivsed põlevkivikarjäärid ja -kaevandused on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 1. Aktiivsed põlevkiviga seotud mäeeraldised hõlmavad Ida-Viru maakonnas ca 510 km² ning Lääne-Viru maakonnas ca 1,5 km² suuruse ala. (Maaamet, i.a)

Tabel 2. Põlevkiviga seotud aktiivsete mäeeraldiste ülevaatlik koondtabel seisuga 31.03.2023 (Maaamet, i.a)

Loa nr	Loa omaja	Mäeeraldise nimetus	Mäeeraldise pindala, ha	Jääkvaru, tuh t
KMIN-037	AS Kunda Nordic Tsement	Ubja põlevkivikarjäär	152,22	2092,9
KMIN-017	Enefit Power AS	Vanaküla karjääriväljad	88,56	484,6
KMIN-046	Enefit Power AS	Narva põlevkivikarjäär II	544,15	7375,5
KMIN-052	Enefit Power AS	Vanaküla karjääriväljad IV	6,18	19,4
KMIN-053	Enefit Power AS	Viru mäeeraldis	4148,37	28 416,1
KMIN-067	Enefit Power AS	Tammiku kaevandus	4013,93	33 746,0
KMIN-087	Enefit Power AS	Sirgala II põlevkivikarjäär	233,75	365,2
L.MK/329491	Enefit Power AS	Uus-Kiviõli kaevandus	4130,54	138 483,6
KMIN-119	Enefit Power AS	Ahtme II kaevandus	357,12	7 648,3
KMIN-054	Enefit Power AS	Estonia kaevandus	13824,23	104 042,7
KMIN-055	VKG Kaevandused OÜ	Ojamaa põlevkivikaevandus	1694,21	26 827,9
KMIN-066	VKG Kaevandused OÜ	Sompa kaevandus	3379,77	9 726,1
L.MK/333343	VKG Kaevandused OÜ	Uus-Kiviõli II kaevandus	2076,06	69 379,4
L.MK/333465	VKG Kaevandused OÜ	Viru II mäeeraldis	42,45	668,3
KMIN-045	KKT OIL OÜ	Põhja-Kiviõli põlevkivikarjäär	153,91	24,7
KMIN-105	KKT OIL OÜ	Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjäär	743,21	10 809,9
KMIN-073	Enefit Power AS	Narva karjäär	4255,55	25 351,7
KMIN-074	Enefit Power AS	Sirgala karjäär	11295,67	92 420,7

Kehtivate mäeeraldistega seotud põlevkivi plokkide jääkvaru on Maa-ameti poolt koostatud maavaravarude koondbilansside (seisuga 31.05.2023) andmetel 557,9 mln t, millest kaevandatava varu moodustab 332,6 mln t. Võttes arvesse viimase viie aasta keskmist põlevkivi kaevandamise mahtu 11,5 mln t, jagub kehtivate mäeeraldiste põlevkivist veel ~29 aastaks.

3. Põlevkivi kaevandamiseks kasutusel olevad kaevandamismoodused ja -viisid Eestis

Konkreetsed kaevandamistehnoloogiad valik ei sõltu tänapäeval enam klassikalistest mäendustingimuste kriteeriumitest, vaid nendest on saanud pigem piirangud ja sotsiaalsed piirangud on muutunud tingimusteks (Kolats jt, 2008). Eestis on põlevkivi väljamisel nii all- kui ka pealmaakaevandamisel kasutatud erinevaid kaevandamise viise, mis on valitud vastavalt maardla lasumusele ning kaevandamistehnoloogia ja -tehnikate arengule.

Allmaakaevandamisel endises Kiviõli kaevanduses on maardla põhjapoolses osas, kus põlevkivi lasub maapinnale lähemal, olnud kasutusel peamiselt käsikambritega või käsi- ja kombainlaavadega kaevandamine, lõunaosas aga kamberkaevandamine (Karu, 2011). Põlevkivi pealmaakaevandamisel on Eestis kasutatud ja kasutatakse tänase päevani auk-, väljak- ja vaalkaevandamise viise (Reinsalu jt, 2015).

3.1 Pealmaa- ehk avakaevandamine

Pealmaakaevandamine on enim levinud kaevandamismooduseks kogu maailmas, mida kasutatakse eelkõige siis, kui kasulikku kihti katva katendi paksus ei ole nii suur, et selle eemaldamine oleks üleliia kulukas. Pealmaakaevandamise suurimateks eelisteks allmaakaevandamise ees on võimalus kaevandada märkimisväärtete kadudeta (kamberkaevandamisel Eesti põlevkivikaevanduste puhul ligikaudu 30%) ning ka kaevandamiseks vajaliku taristu lihtsus.

Aukkaevandamine on üldjuhul levinud ehitusmaavarade, näiteks liiva, kruusa, dolo- ja lubjakivi, väljamiseks. Karjääri avamisel aukkaevandamise viisil lükatakse või veetakse kasulikku kihti kattev katend koos aherainega mäeeraldiselt välja ning ladustatakse välispuistangutesse. Aukkaevandamist kasutatakse üldjuhul selliste karjääride avamisel, kus mäenduslike tingimuste tõttu pole katendimaterjali võimalik kaevandatud alasse ümber paigutada, kuna need kataksid maavara või seda ei ole piisavalt, et tekkinud auku täita. Sellist meetodit on varasemalt kasutatud ka põlevkivikarjääride avamisel, millelt on hiljem üle mindud vaalkaevandamisele. (Saarnak jt, 2014)

Vaalkaevandamine on üldlevinud kaevandamisviis kihtmaardlates, mille alla kuuluvad näiteks ka Eestis lasuvad põlevkivi-, turba- ja fosforiidimaardlad. Vaalkaevandamisel ladustatakse kasuliku kihi pealt eemaldatud katend koos aherainega tagasi äsja ammendatud alale, kus see ladustatakse sisepuistangutesse vaaludena. (Saarnak jt, 2014) Vaalkaevandamisega ammendatud karjäärides ilmnevad tihtipeale kaevandatud maa korrastamisel probleemid hüdrogeoloogiaga, kuna vaaludesse ladustatud katend ei ole erineva viljakusega puistematerjalide alusel sorteeritud (Pärn, 2016). Mäeeraldiselt eemaldatud ja vaaludesse ladustatud katend ei moodusta homogeenset pinnast, millest tulenevalt jääb kaevandatud alale anisotroopne hüdroloogiline režiim (Reinsalu jt, 2015) ning ebasoodsad tingimused maa isetaimestumiseks (Pärn, 2016).

Auk- ja vaalkaevandamise korral toimub põlevkivi väljamine vastavalt vajadusele kas buldooserile kinnitatud *ripperiga* selektiivselt või raimatakse põlevkivikiht kogu ulatuses puur-lõhketöödega ehk mitteselektiivselt. Kaevis laetakse kalluritele kopplaadurite, mehaaniliste labidate või hüdrauliliste ekskavaatoritega. Karjäärrikallurid veavad väljatud põlevkivi mööda veotranšeesid ja veoteid kas rikastusvabrikusse või purustus-sorteerimis-laadimissõlme. (Reinsalu ja Valgma, 2005)

Väljakkaevandamine on tavapäraselt kasutusel sellistes suurte pindaladega kihtmaardlates, kus maavara väljatakse kihtide kaupa. Kasuliku kihi peal lasuv katend ladustatakse välispuistangutes. Erinevalt eelmisest kahest kaevandamise viisist, toimub maavara väljamine õhukeste kihtidena koorides ehk (kõrg)selektiivselt kas freeskombainiga freesides või buldooseri külge kinnitatud *ripperiga* kobestades, peale mida tuleb kobestatud maavara hüdrauliliste ekskavaatorite või mehaaniliste labidatega kalluritele laadida. Freesimise korral toimub laadimine paralleelselt kaevandamisega.

3.2 Allmaakaevandamine

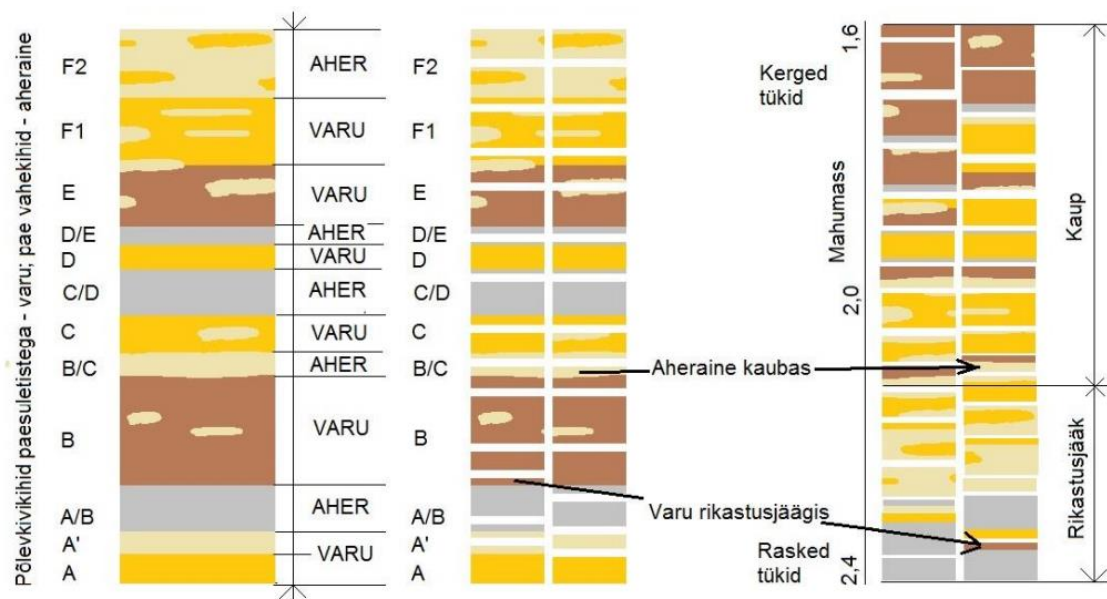
Piirkondades, kus maavara lasub maapinnast sügavamal ning kasulikku kihti katvat katendit ei ole tehnoloogiliselt või majanduslikult otstarbekas eemaldada, kasutatakse allmaakaevandamise moodust. Põlevkivi allmaakaevandamist on Eestis praktiseeritud üle 100 aasta, kuid ka tänapäeval kasutusel olev tehnoloogia kujunes välja 1960-ndatel, kui loodi kamberkaevandamine. Põlevkivi allmaakaevandamiseks on Eesti tingimustes võimalik kasutada erinevaid kaevandamisviise, paarisstrekkidega (käsikambritega), paarislaavadega (käsilaavadega), kamberkaevandamine ja kombainlaavakaevandamine. Eestis vanim kasutusel olnud allmaakaevandamise viis on paarisstrekkidega (tuntud ka kui käsikambritega) kaevandamine (Saarnak jt, 2014).

Paarisstrekkidega ehk käsikambritega kaevandamisel rajati paneelstrekist kas ühele või mõlemale poole 12–30 m laiused kambrid, pikkusega kuni 300 m. Kaevis väljamiseks kasutati kambrites puur-lõhketöid (lausväljamine), mille järel laaditi see käsitsi vagonettidesse. Kaevanduse lae toetamiseks laoti väljatava põlevkivi vahekihtidest saadavast lubjakivist täiteriidad. Esimeses etapis väljati kambrid üle ühe, mille vahele jäi põlevkivist hoidetervik. Järgnevalt väljati kambrite vahele jääv looduslik hoidetervik ning lage jäid toetama vaid täiteriidad. (Väizene jt, 2014) Kvaliteetsete lubjakivist täiteriitade korral on tagatud maapinna hea püsivus, kusjuures vajumite sügavus maapinnal ei ületa 0,7 m (Toomik, 1999). Samas on selliste vajumite eelduseks madal (ligikaudu 2,0 m paksune) väljatav kiht, mis esineb eelkõige vanemates põlevkivikaevandustes.

Paaris- ehk käsilaavadega kombineeritud kaevandamisviisil rajati paneelstrekid vahele ette kogumisstrekki ja kraapkonveieri monteerimiseks kahele poole ee alglõõrid. Kogumisstrekile monteeriti lintkonveier, mida kasutati põlevkivi laadimiseks paneelstrekis asuvatele vagonettidele (Saarnak jt, 2014). Üheaegselt põlevkivi laadimisega laavas asuvale kraapkonveierile eraldati kaevisest aheraine ehk lubjakivi. Ee-rinna pikkuseks on kuni 90 m, langi pikkuseks kuni 600 m. Kaevandatud alale laoti sarnaselt käsikambritega kaevandamisega lubjakivist täiteriidad, millele langetati kaevanduse lagi laava ee-rinna edasi liikudes. Täiteriidad laoti üheaegselt põlevkivi

laadimisega laavas asuvalle kraapkonveierile. (Väizene jt, 2014) Põlevkivi raimamiseks kasutati soonimist ja puur-lõhketöid. Hilisemalt asendati tööee toestamisel täitetervikud puidust ja metallist toepostidega (Saarnak jt, 2014).

Tänapäeval on enimlevinud põlevkivi allmaakaevandamise viisiks kamberkaevandamine, mille puhul jäetakse väljatavasse kihindisse põlevkivist hoidetervikud. Hoidetervikud tagavad maapinna ja kaevanduse lae stabiilsuse ning nende vahele moodustuvad kambrid, kus liiguvad mäemasinad. Kamberkaevandamisel moodustatavate kambriplokkide laius on üldjuhul 300–400 m, pikkusega 600–800 m (erandina ka kuni 1200 m) ning kuna väljatakse põlevkivikihid A-st kuni F1-ni (kaasaarvatud) (joonis 4), on kambri kõrgus ligi 2,8 m. (Saarnak jt, 2014) Suurim eelis kamberkaevandamisel on võimalus kasutada väljakujunenud efektiivset tehnoloogiat ja masinaid ning vältida katendi ja maapinna vajumist (Väizene jt, 2013). Tänapäevase tehnoloogiatega varustatud mäemasinate kasutamine aitab suurendada kaevanduse tootlikkust ning turvalisust. Kamberkaevandamisel jäetavate hoidetervikute tugevusarvutuste aluseks on nende pikaajaline tugevus. Varasema praktika kohaselt on tervikute tööeaks võetud kaks aastat, mis on võrdne kambriploki tööeaga. Tänapäeval on tervikute iga arvutatud ajale lõpmatus ning seega peaksid hoidetervikud teoreetiliselt tagama maapinna stabiilsuse igaveseks. (Väizene jt, 2014)



Joonis 4. Põlevkivi tootuskihind (Jürs ja Reinsalu, 2015)

Kombainlaavakaevandamisega alustati Eestis 1970-ndatel, mille käigus varistati kaevanduse lagi täielikult (Lauringson ja Reier, 1981) ning see osutus kasutatavateks sellistel alades, kus teiste kaevandamistehnoloogiate kasutamine ei olnud võimalik (Väizene jt, 2014). Alo Adamsoni juhtimisel projekteeriti spetsiaalselt Eesti põlevkivi kaevanduste jaoks koristuskombain. Kombain töötas edukalt Kohtla kaevanduses, kus väljati kogu põlevkivikihind A-E. Kombainkaevandamisel kasutatakse lankkaevandamist, kus kaeveväli valmistatakse ette rajades kombaini, konveieri ja toetuskompleksi monteerimiseks vajalikud kogumis- ja külgstrekid koos ee alglööriga. (Saarnak jt, 2014)

4. Alternatiivsed võimalused suletud ja mahajäetud kaevanduste stabiliseerimiseks Eesti tingimustes

Kaevandamisel paljandatakse kaeveõõnes kivimid (kaevanduse seinad, lagi), mis kaotavad aja jooksul oma püsivuse ning hakkavad varem või hiljem varisema. Parimate kaevandamistingimuste loomiseks tuleb kaevanduse lage toetada selleks ette nähtud konstruktsiooniga, olgu selleks looduslikud hoidetervikud, laotud kivitoestik, raamtoestik, (raud- või monoliit-) betoontoestik või tüübingtoestik. Küll aga tuleb silmas pidada, et ka põlevkivikaevanduste tervikute kandevõime väheneb aja jooksul – toimub protsess, mida nimetatakse vananemiseks (Väli jt, 2020). Paigaldatud toestik peab olema piisavalt tugev, jäik ja püsiv, et see suudaks kaevanduse lage või seinu selleks ette nähtud perioodil toetada.

Kaevanduste stabiliseerimine on arendajale majanduslikult otstarbekaim teha paralleelselt mäetööde liikumisega (Väli jt, 2021) ning kaevanduste sulgemisel tuleb vajadusel ette näha eraldiseisvad tööd kaeveõõnte täiendavaks stabiliseerimiseks. Eesti põlevkivikaevanduste kontekstis on enimlevinud toetamise tüübiks kujunenud hoidetervikute moodustamine, mis on turvalisuse ja püsivuse aspektist küll efektiivne, eeldusel, et hoidetervikud on jäetud piisavate mõõtmetega. Küll aga on maavara kadusid ning hoide- ja püsitervikute aja jooksul tekkinud nõrgenemist silmas pidades hoideterviku asemele hakatud otsima ja kasutusele võtma alternatiivseid lahendusi, mis võimaldavad maavara väljata maksimaalses võimalikus mahus ehk minimaalsete kadudega. Aktiivsetes allmaakaevandustes on üha enam arendatud tehnoloogiaid kaeveõõnte tagasitaitmiseks või mõne muu püsitoestuse tarbeks, mille kasutuselevõtmine pea 100 aasta vanustes kaevandustes on vaieldamatult liiga kallis ja ohtlik ettevõtmine.

Võrreldes kaasaegseid Eesti põlevkivikaevandusi tänaseks suletud või mahajäetud kaevandustega, kus alustati töödega 1900-ndate algusaegadel, on kaevandused liikunud kümneid meetreid sügavamale ning nendes on kasutusele võetud efektiivsemad lahendused tekkinud kaeveõõnte toetamiseks. Kuivõrd vanad tootmisalad on üldjuhul täitunud veega või on sisenemiseks liiga ohtlikud, ei ole kaasaegsete toetamistehnoloogiate kasutamine vanades kaevandustes enam paraku võimalik. Endises Kivõli põlevkivikaevanduses kaevandati käsilaavadega (vt ptk 3.2), kus kasutati kaeveõõnsuste püsivaks toetamiseks looduslikke põlevkivitervikuid, puitkonstruktsioone ning lubjakivist käsitsi laotud täiteriitasid. Tänapäevaks on need järgepidi hakanud oma struktuuri kaotama ning kuna endised kaevandused asuvad maapinnale niivõrd lähedal (minimaalselt 8 m maapinnast), on nende varisemise mõju maapinnal väga hästi nähtav ja ebastabiilne.

Eelnevast lähtudes tuleb tänapäevaks suletud kaevandustes ja altkaevandatud aladel välistada kõik võimalused, mis hõlmavad endas allmaatöid ning kaaluda erinevaid maa pealt teostatavaid töid. Ainsad allmaatööd, mille poole saame tulevikus liikuda on seotud mehitamata operatsioonidega olemasolevate hoidetervikute ja täiteriitade purustamiseks. Seega on hetkel ainus alternatiiv (pealmaatöödega) tervikute purustamisele maa pealt teostatud puur-lõhketöödega kaevanduskäikude tagasitaitmine täiteseguda maa pealt puuritud puuraukudega (Osjamets, 2024).

5. Katsetöö asukoha valik

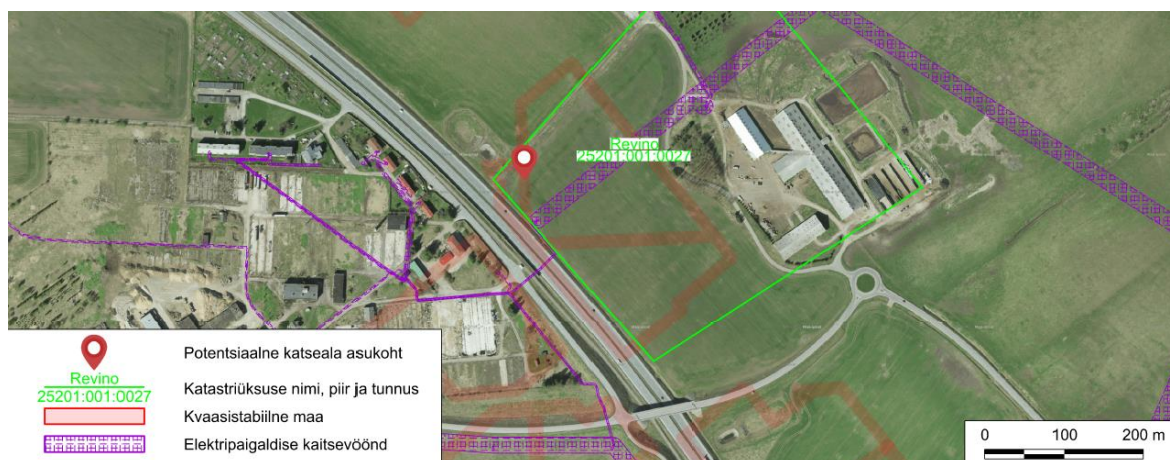
Käesoleva lõputöö ja uuringu üheks eesmärgiks oli läbi viia reaalsed katselõhkamised allmaatervikute purustamiseks maa pealt teostatud puur-lõhketöödega ehk altkaevandatud alade kontrollitud langetamiseks pealmaatööde abil. Katsetööde korraldamiseks oli tarvis leida selleks sobilik ala, mis pidi vastama vähemalt järgmistele tingimustele:

1. Ala peab asuma kvaasistabiilsel alal, eelistatult avamusjoone lähedal kus kaevanduskäikude kohal olev lasum on õhem kui 12 m;
2. Alal ega selle lähiümbruses ei tohi olla tundlikke objekte või muid olulisi kitsendusi;
3. Alale peab olema hea ligipääs rasketehnikaga.

Sellistele tingimustele vastavad alad on võimalik leida eelkõige Lüganuse, Jõhvi ja Toila vallast ning Kohtla-Järve linnast. Alternatiivsed alad, mis on küll kvaasistabiilsed, aga kus altkaevandatud alad paiknevad sügavamal kui 20 m, on võimalik leida ka Alutaguse vallast. Tänapäevast eelnevalt mainitud valdade territooriumitel asuvad mitmed tänaseks suletud põlevkivikaevandused – Kiviõli, Kukruse, Käva ja Kohtla kaevandused. Oma katsetöö läbi viimiseks leidsin kõige sobilikumad alad Jõhvi, Toila ja Lüganuse valdadest, seega tuli teha ettepanekud valla esindajatele ja kuulda ka nende arvamust.

5.1 Jõhvi vald

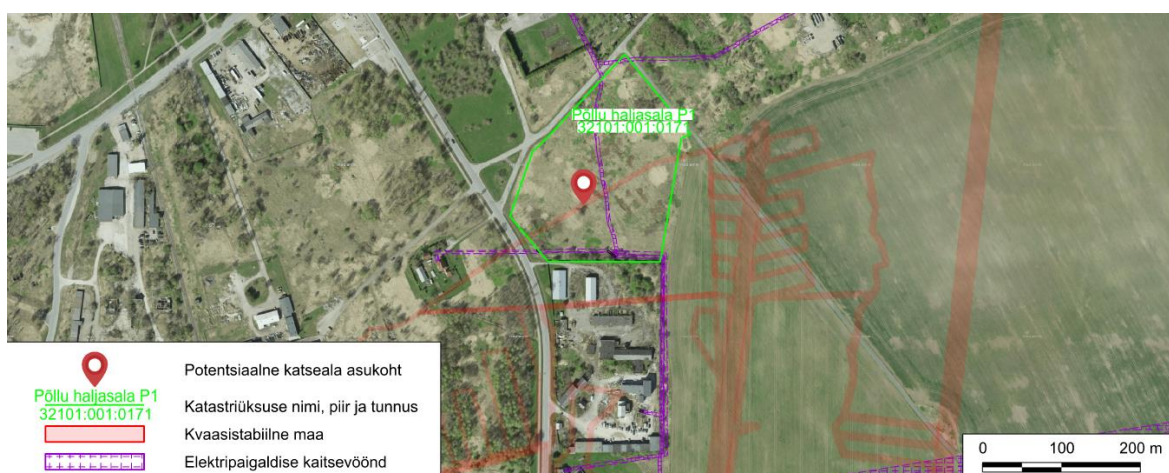
Jõhvi valla territooriumil asuv võimalik katseala jääb endise Kukruse põlevkivikaevanduse kirdepoolseimale avamusalale, kus kaevandus jääb maapinnast hinnanguliselt kuni 10 meetri sügavusele. Valitud ala jääb eraomandisse kuuluvatele kinnistutele Revino (katastritunnus 25201:001:0027) ja Suurpõllu (katastritunnus 25101:001:1063). Erakinnistutel tegutsemiseks on vajalik maaomaniku kooskõlastus. Nimetatud potentsiaalne katseala jääb vahetult Tallinna-Narva põhimaantee nr 1 äärde. Ainsad kitsendused, millega oleks pidanud tööde läbiviimisel arvestama on seotud eelnevalt mainitud maanteele kehtestatud teekaitsevööndiga ning Revino kinnistut läbiva elektriõhuliini 1-20 kV (keskpingeliin) ja selle kaitsevööndiga (joonis 5)



Joonis 5. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Jõhvi valla territooriumil (nr 5.1 joonisel 1)

5.2 Toila vald

Toila valda oli keeruline katsetöödeks sobilikku ala leida, kuivõrd altkaevandatud aladega kattuvad alad on suures ulatuses kasutusel põllumaana. Oma võimaluste laiendamiseks tegin ettepaneku katsetööde läbiviimiseks Kartuli (katastritunnus 32002:002:0108) kinnistu äärealal, mille puhul on samuti tegemist põllumaaga ning kahtluse all oli tööde tegemiseks vajaliku maaomaniku kooskõlastuse saamine. Ala kattub endise Käva põlevkivikaevanduse põhjaservaga, jäädes kaevanduse avamusalale. Kaevanduse sügavus maapinnast on hinnanguliselt kuni 10 meetrit. Ligipääsu ja kitsenduste poolest oli võimaliku katseala asukoht Toila vallas soodne (joonis 6).



Joonis 6. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Toila valla territooriumil (nr 5.2 joonisel 1)

5.3 Lügänuuse vald

Viimaseks, ja asjaolusid arvestades parimaks alternatiiviks oli katsetöödeks sobilik ala leida Lügänuuse vallas, kus see kattub endise Kiviõli põlevkivikarjääriga. Parimaks alternatiiviks tegi selle asjaolu, et Kiviõli kaevanduse kohta oli erinevatest arhiividest võimalik leida kõige rohkem kaardimaterjali – mäetööde plaanid, geoloogilised läbilõiked. Vallale tegin ettepaneku katselõhkamised läbi viia eraomandisse kuuluval Jõudemäe (katastritunnus 44901:001:0181) kinnistul. Kinnistu omaniku kooskõlastus oli tööde tegemiseks samuti olemas (joonis 7).



Joonis 7. Potentsiaalne katsetöödeks sobilik ala Lügänuuse valla territooriumil (nr 5.3 joonisel 1)

Kohtumisel Lüganuse valla esindajatega 2023 oktoobris tegi vald koos kohaliku ettevõtjaga ettepaneku viia katsetööd läbi Kiviõli ettevõtlusala 1 (katastritunnus 30901:004:0026) kinnistul, mis asub osaliselt kvaasistabiilisel alal. Kinnistule on planeeritud rajada päikesepark, mis on stabiilsusprobleemide tõttu senini olnud raskendatud. Kiviõli ettevõtlusala 1 kinnistu jääb Kiviõli põlevkivikaevanduse kõige põhjapoolsemale alale, avamusalale, kus kaevanduse sügavus maapinnast on ligikaudu 8 meetrit. Ligipääsu ja kitsenduste poolest on samuti tegu soodsa piirkonnaga (joonis 8).



Joonis 8. Katsetöödeks valitud ala Lüganuse valla territooriumil (nr 5.4 joonisel 1)

Nagu joonisel 8 nähtub, ei ole Maa-ameti kaardirakendusel ehk põlevkivi altkaevandatud alade planšettide digitaliseerimisel (Väizene jt, 2015) katsealaks valitud asukoht kvaasistabiilse maana fikseeritud (joonisel 8 punase tooniga märgitud kvaasistabiilne maa). Lähtuvalt kvaasistabiilse ala definitsioonist asuvad kvaasistabiilsed alad langetatud ala vajumismolli perve ja moldi ümbritseva püsiva või stabiilse maa vahel. Sellised alad asuvad muuhulgas ka pea kõikide tervikute ümbruses.

6. Katsetöödeks valitud ala ja selle lähiümbruse kirjeldus

Katsetööde tegemiseks sobilik ja selleks valitud ala paikneb Ida-Viru maakonnas Lüganuse vallas Kiviõli linnas, jäädes eraomandisse kuuluvale Kiviõli ettevõtlusala 1 (katastritunnus 30901:004:0026, 50% ärimaa ning 50% tootmismaa) kinnistule. Katsetöödeks vajalik ala hõlmab kinnistust < 1%. Alale on hea ligipääs Sämi-Sonda-Kiviõli teelt ja kinnistule rajatud pinnasteelt. Valitud kinnistu omanikul on huvi ja soov piirkonna arendamiseks ning katsetöödeks valitud alal on päikesepargi rajamine kvaasistabiilsete alade tõttu ajutiselt peatatud.

Uuringu läbiviimiseks valitud ala kattub endise Kiviõli põlevkivikaevandusega, mis jääb antud piirkonnas maapinnast ~8–10 m sügavusele. Katseala kattub 1937. aastal kaevandatud kambri veostrekiga (joonis 9). Veostreki toestavad kaks põlevkivist maa alla jäetud linttervikut. Mäetööde plaanidelt saadud informatsiooni kohaselt peaksid linttervikute laiused olema ~4–6 m ning nende keskele jääva veokäigu laius ~5 m. Alal ja selle lähiümbruses võib lisaks esineda käsitsi laotud paeritasid, mille kaardistamine on olemasolevate andmete põhjal väga keeruline.



Joonis 9. Katseala (tugevama punase joonega) paiknemine 1987. a koostatud Kiviõli kaevanduse mäetööde plaanil (Enefit Power AS Estonia kaevanduse peahoone arhiiv)

Kiviõli ettevõtlusala 1 kinnistu keskosas paiknevad eraomandisse kuuluvad Mäealuse põik 1 (katastritunnus 30901:001:0139) ja Mäealuse põik 7 (katastritunnus 30901:001:0137) kinnistud, kuhu on katselapist ~80 m kaugusele rajatud pumbamajad koos puurkaevudega olmevee saamiseks. Ümbruskonnas paikneb hõredalt erinevaid tootmis- ja kõrvalhooneid, millest lähimad on Kiviõli ettevõtlusala 1 kinnistust vahetult, katsetööde alast ~130 m kaugusel, loodes asuv töökoda Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul. Kemikaalide ladu Mäealuse tee 7 (katastritunnus 30901:001:0008) kinnistul jääb katselapist ~135 m kaugusele loodesse.

Kontorihoone (kaalumaja) koos autokaaluga jäävad katsetöödega seotud alast ~195 m kaugusele kirdesse Mäealuse tee 5 (katastritunnus 30901:004:0017) kinnistule.

Katsetööde alast ~700 m kaugusele lõunasse, teisele poole Sämi-Sonda-Kiviõli teed nr 17120 jääb Kiviõli Keemiatööstus. Kiviõli krossirada koos vana tuhamäe ja seal paikneva Kiviõli Seikluskeskusega jäävad katsetööde alast vähemalt ~200 m kaugusele idasse, teisele poole Mäealuse teed nr 3090092. Lähim looduskaitsete piirangutega ala, Kiviõli looduskaitseala (KKR kood KLO1101896), jääb katselapist ~1,6 km kaugusele kagusse. Muid unikaalseid ja muinsuskaitsealuseid hooneid, ohustatud loodusobjekte või teisi olulisi piiranguid põhjustavaid objekte või kaitsealuseid liike katsetööde alal ega selle lähiümbruses ei asu.

6.1 Lühike geoloogiline ja hüdrogeoloogiline iseloomustus

Katsetööde tegemiseks valitud ala jääb Kirde-Eesti lavamaale, põlevkivi lasundi põhjapiirile, mille reljeefis esineb jää- ja jääjärve setteid, mida katavad muld ja/või täitepinnas. Jää- ja jääjärve setted on esindatud saviliivmoreeni, liivsavi ja saviliivaga. Pinnakatte paksus piirkonnas on 1,0–2,8 m.

Vaadeldaval alal lasuvad kristalsel aluskorral aluspõhja Vendi (V_2) liivakivid, aleuroliidid ja savid kogupaksusega 90–100 m. Järgnevad vettpidavad Alam-Kambriumi (C_{m1}) savid, mille paksus on ~70 m. Kambriumi savidel lasuvad Ordoviitsium-Kambriumi (O_1-C_{m1}) liivakivid ja aleuriidid kogupaksusega 15–20 m. Viimastel lasuvad Ordoviitsiumi (O_{1-2}) karbonaatsed kivimid, mille paksus on 33–45 m ning mis paljanduvad vahetult pinnakatte all. (Metsur ja Eller, 2002)

Katselapil moodustavad pinnakatte moreenne lubjakivirähk, mida katavad tehnogeenne täitepinnas ja kasvukiht. Pinnakatte all lasub ~5,5 m paksune õhukeste kukersiidi vahekihtide või läätsedega lubjakivi, mille lamamis asub osaliselt kaevandatud põlevkivikiht paksusega ~2,0 m.

Pinnakattesetetes esinevad nii surveta vett sisaldavad ja vahetult meteoroloogilistele mõjuritele alluvad poorsed põhjaveekihid kui ka survelised põhjaveekihid. Pinnakatte ülemine osa või kohati kogu pinnakate kuulub aeratsioonivöösse, kus peale filtratsioonivoolude liigub hulk vett auruna või kapillaarjõudude toimel. Suuremal osal Lüganuse valla piirkonnast esineb maapinnalt esimene aluspõhjaline veekiht Ordoviitsiumi lõhelistes ja karstunud karbonaatesetes kivimites, kus põhjavee liikumise kiirus on suur lõhedes ja maapinnalähedastes karstiõõnsustes. (Metsur ja Grigorjeva, 2020) Suure tõenäosusega on suletud ja ammendunud ala täitunud veega, kuna kaevandusest vee välja juhtimiseks vajalikud pumbad on ammu välja võetud. Seda kinnitas ka suuline vestlus piirkonna arendajaga ning katsetöödel teostatud puurimine.

7. Ettevalmistustööd

7.1 Piiride tähistamine

Katsetöödega alustamiseks tuli selleks ettenähtud ala Kiviõli ettevõtlusala 1 kinnistul looduses maha märkida. Ala täpse asukoha määramiseks kasutasin Maa-ameti Geoportaali kaardirakendusi (reljeefkaart, maardlate rakendus) ning Eesti suurima põlevkivikaevanduse „Estonia“ peahoones asuvast arhiivist leitud Kiviõli põlevkivikaevanduse mäetööde plaane.

Loodusesse märgitud tööala piirid peavad olema selgelt nähtavad ja üheselt mõistetavad. Piiride ja katseala nurgapunktide märkimisel otsustasin kasutada ~0,5 m pikkuseks lõigatud armatuurvaiasid, mille külge kinnistasin piiripunktide pärema nähtavuse saavutamiseks ohulindi (joonis 10). Lisaks piiripunktide tähistamisele tähistasin katsealale toova tee sildiga „Ohutsoon“. Tegu on küll eramaa ja -teega, kuid alale potentsiaalselt sattuvate kõrvaliste isikute võimalike vigastuse vältimiseks oli töö- ja ohuala täiendav tähistamine vajalik.



Joonis 10. Pinnasetööde algusfaas, pildil nähtavad ka loodusesse märgitud piiripunktid

7.2 Katendi eemaldamine ja ladustamine

Parimate tingimuste saavutamiseks tuli katsealalt eemaldada kogu pude pinnas, et edaspidised tööd saaksid toimuda siledal paepinnal ning puur-lõhketööde jaoks vajalike puurimistöde maht oleks minimaalne. Katendi eemaldamiseks sobis kasutada eksvaatorit massiga 20–30 t (kopa maht vastavalt masina spetsifikatsioonidele) ning seega jäi valikuks partneri masinaparki kuuluv diiselenergiat töötav roomikekskavaator Kobelco SK210LC.

Katsealal moodustavad lubjakivimassiivi katva katendi moreenne lubjakivirähk ja sellel lasuv tehnogeenne täitepinnas koos kasvukihiga. Eemaldatava katendi kogupaksus oli ~1,0–1,5 m, millest alumise ~1,0–1,2 m paksuse kihi moodustas lubjakivirähk ning ülemise ~0,2 m paksuse kihi kasvukiht. Kohati esines alal ka tehnogeenset täitepinnast. Katsealalt eemaldatava katendi mahu arvutused tein arvutiprogrammiga Bentley PowerCivil V8i ning tulemused on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Katendi mahud			
Materjal	Pindala, m²	Keskmine paksus, m	Maht, m³
Kasvukiht	990	0,2	198
Lubjakivirähk	990	1,0	990
Lubjakivi	990	5,5	5 455

Katsealalt eemaldatud katend ladustati vahetult tekkinud süvendi piirile vallides, et seda saaks otstarbekalt, ilma suurema ümberladustamiseta, kasutada ala hilisemal tehnilisel korrastamisel. Kuivõrd kasvukiht on oluline ala bioloogiliseks korrastamiseks, otsustasin selle muust materjalist eraldi ladustada (joonis 11). Säilitamiseks mulla bioloogilist aktiivsust, ei tohtinud moodustatud auna tihendada. Edaspidistel sarnase eesmärgiga teostatavatel uuringutel ja katsetöödel ei ole katendi eemaldamine nii suure mahus vajalik.



Joonis 11. Edasisteks töödeks ettevalmistatud katseala selle esimeses etapis

Katseala paljandamisel jäi silma kaks selget murrangujoont, mis on tekkinud veostrekist läänes ja idas asuvate laavade kaevandamisaegsel langetamisel. Murrangud andsid kinnituse tervikute paiknemisele katsealal, samuti andis aimu nende konkreetsemast suunast ja paiknemisest. Lisaks eelnevale, tuli paljandamise käigus täitematerjali alt välja kaevanduse tuulutusšurf, mis oli osaliselt täidetud. Lähtuvalt omandatud teadmistest võis oletada, et šurf on rajatud vertikaalselt veokäiku

toestavasse tervikusse, nagu seda reeglina tol ajal rajati. Tänu nendele kahele avastusele sain katseala paremini olemasolevate ajalooliste mäetööde plaanidega siduda.

Altkaevandatud ala kontrollitud stabiliseerimise ja alal tekkivate võimalike vajumite selgitamiseks viisin alal läbi topo-geodeetilise mõõdistuse (3 x 3 m sammuga), et fikseerida langetustööde nullpind. Mõõdistuse tegemiseks kasutasin Trimble R12 integreeritud GNSS süsteemi (täpsus mõõdistamisel 9 mm H, 13 mm V) (Trimble, i.a). Saadud andmetest koostas Bentley MicroStation V8i arvutiprogrammi abil 3D-mudeli, mida sain hilisemate mõõtmistulemuste ja nende kohta koostatavate 3D-mudelitega võrrelda. Koostatud mudelid aitasid paremini analüüsida puur-lõhketöödega tervikute purustamise mõjutusi maapinnal.

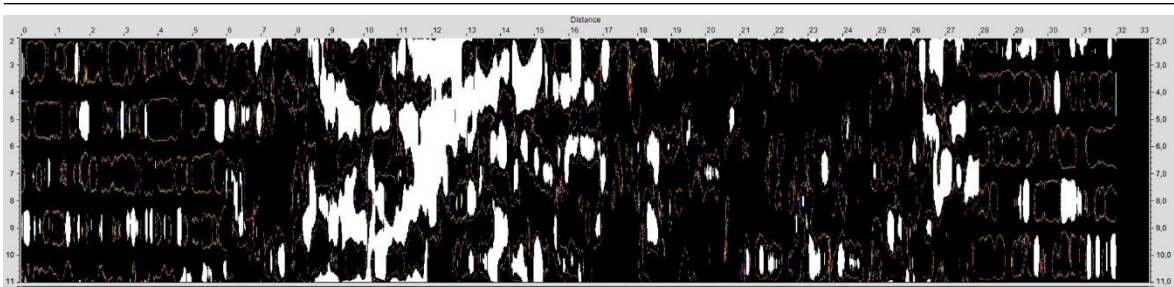
7.3 Maa-aluse situatsiooni kaardistamine

7.3.1 Geo- ehk maaradar

Käesoleva uuringuga hõlmatud katseala asub endise Kiviõli põlevkivikaevanduse veostreki ja seda toestavate põlevkivist linttervikute kohal. Katsealal on eesmärk purustada tervikud pealmaa puur-lõhketöödega. Puur-lõhketööde tegemiseks on vajalik fikseerida maa all paiknevate linttervikute ja strekkide asukohad nii täpselt, kui olemasolevad vanad mäetööde plaanid ja kättesaadav tehnika seda võimaldavad. Parimaks lahenduseks paistis mulle esialgu geo- ehk maaradari kasutamine. Selleks kaasasin projekti maaradariga seotud tööde tegemiseks AS-i Teede Tehnokeskus, mille spetsialistidel on vajalikud teadmised, oskused ja tehnika maa-aluste kaardistamistööde tegemiseks. Mõõtmistöödel olin ka ise nii palju abiks, kui seda mulle võimaldati ja vajati.

Esimesed mõõtmised viisime läbi Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) maaradariga, mis oli varustatud järelveetava 100 MHz antenniga (GSSI, i.a). Kasutatud seadme mõju ulatub ideaaltingimustes maksimaalsetes kuni 30 m sügavusele, tavatingimustes reeglina 10–15 m sügavusele. Kasutatud maaradar vajab stabiilset toitelahendust ning seega pidime antenni lohistama AS Teede Tehnokeskuse mõõtmisbussi kõrval (joonis 13). Mõõtmised viisime läbi tiheda „triibustikuna“, ristsuund oli mõõtmiseks liiga lühike (bussiga ei olnud võimalik piisavalt manööverdada). Ühekordse triibustikuga saadud tulemused ei olnud rahuldavad, seega otsustasime ala ka teist korda mõõta.

Survey Systems, Inc. 100 MHz antenniga mõõdetud tulemuse üksikprofiilid ei olnud eraldivõetuna hästi loetavad, seega viis AS Teede Tehnokeskus läbi radarandmete 3D-analüüsi. Põhjuseid, miks saadud tulemused loetavad polnud võis olla mitmeid: nt kaevanduskäikudes esinev vesi või mõõtmisbussi poolt põhjustatud liigne müra. Ka madalam veekiht kaevanduskäikudes võib maaradari kasutamisel põhjustada signaali peegeldumist ning sellest tekkivat üleliigset müra. Kasutades lubjakivi jaoks rahvusvahelise kirjanduse baasil dielektrilise läbitavuse Er väärtust 9,0 on sügavushorisondil 9,0 m koostatud 2D-profiil esitatud joonisel 12.



Joonis 12. 2D-profiil sügavushorisonil 9,0 m. Heledate laikudena näha signaali eristuvad amplituudid ehk anomaaliad

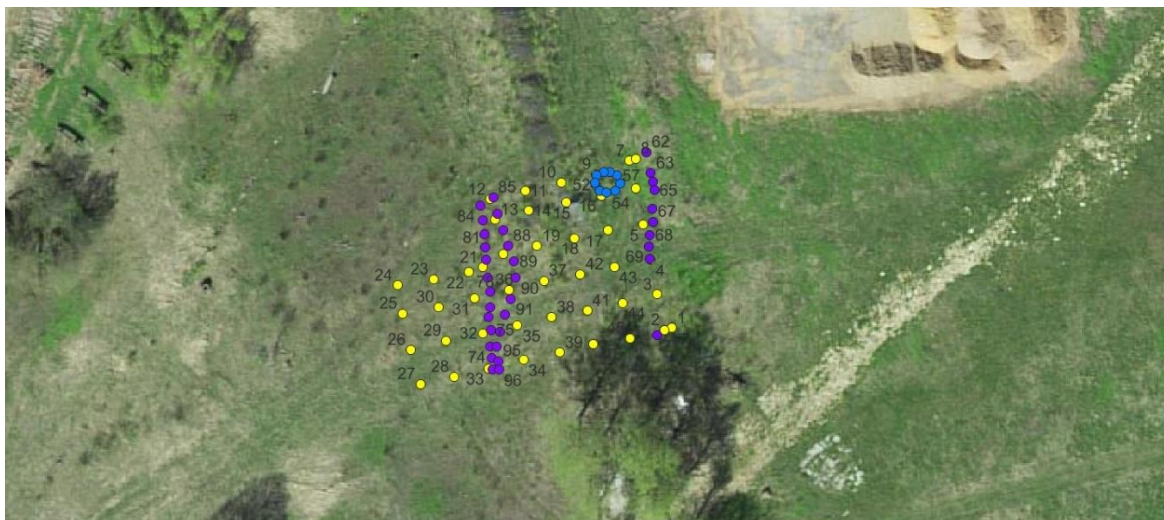
Teoorias peaksid profiilidel eristuvad kohad andma meile informatsiooni muutuste kohta pinnases. Küll aga on 100 MHz antennist saadav informatsioon erisugusele mürale väga tundlik ja seetõttu ei saagi mõõdetud profiile eraldiseisvalt vaadata – neid tuleb analüüsida ning vaadata kogumina. Kui samas piirkonnas erinevate mõõtmiste amplituudid kattuvad ehk on samasuunalised, joonistuvad niinimetatud anomaaliad 3D-profiilil vastavalt tumedama või heledamana välja. Nendest saab omakorda teha järeldusi maa all oleva situatsiooni kohta. Eeldasime, et kuna tegu on väga muutliku maa-aluse situatsiooniga (linttervikud, tühimikud jm), siis on ka mõõtmisprofiilid hästi loetavad.



Joonis 13. AS Teede Tehnokeskuse mõõtmisbuss katsealale sisenemas

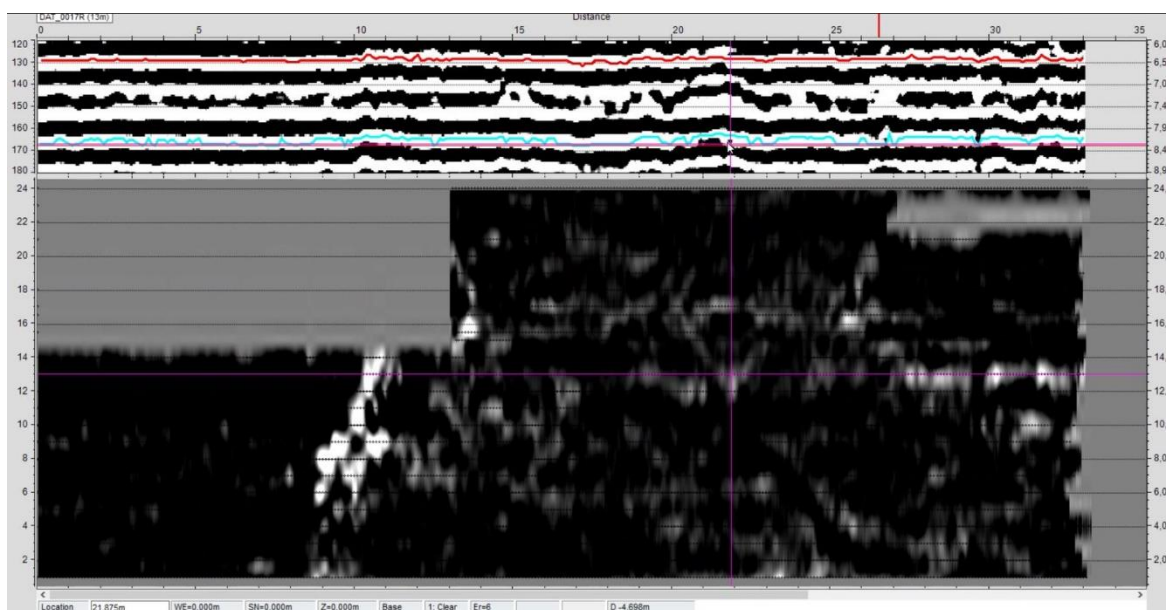
Kahjuks tekitab mõõtmisbussiga sedavõrd piiratud alal toimetamine üksjagu probleeme, samuti olid murekohtadeks erinevad ebatasasused ning eelnevalt mainitud murrangujooned kaevandust katvas lubjakivimassiivis. ATV-ga oleks mõõtmine olnud üldjoontes tunduvalt lihtsam, kuid mõõtmiseks ettevalmistamine oleks olnud omakorda kordades keerulisem ja aeganõudvam, eriti stabiilse maaradari toimimiseks vajaliku toitelahenduse loomine. Liigset müra tekitas maaradari GSSI 100 MHz antennile veel ka selle bussi kõrval vedamine, mida teisel katsel üritasime leevendada antenni bussi järel haakesse ühendades. Selle võrra muutus keerukamaks tööde läbiviimine kitsal alal. 100 MHz antenniga meil usaldusväärseid või selgelt loetavaid tulemusi saada ei õnnestunud.

Järgmiseks otsustasime koos AS-iga Teede Tehnokeskus katsealal proovida veel maaradareid Malå GX koos 80 MHz (Guideline Geo, i.a.a). ning Malå ProEx koos 250 MHz antennidega (Guideline Geo, i.a.b). Malå radaritega tegutsemiseks tuli maha märkida 5x5 m (osaliselt 5x4 m) ruudustik, vertikaalne tuulutussaht ning murrangujoonte paiknemine, mida sai hiljem kasutada mõõtmisandmete sidumiseks ja analüüsimiseks (joonis 14).



Joonis 14. Mahamärgitud ruudustik (kollane – 5x5 m, 5x4 m ruudustik; sinine – tuulutussaht ja lilla – murrangujooned)

Malå maaradarid on, erinevalt GSSI omast, akutoitega ning käsitsi opereeritavad. Seega puudus nendega vajadus mõõtmisbussi järele, tänu millele oli viimase maaradariga katsealal hulganisti lihtsam tegutseda. Eelnevast tulenevalt olid saadud mõõtmistulemused samuti selgemad. Malå maaradarite mõõtmisandmetest tuvastasime, et ~6,5–8,5 m sügavusel (150 ns) paikneb rikutud või anomaalne kiht, mis kinnitab veostreki paiknemist katseala piires (joonis 15).



Joonis 15. Malå maaradarite mõõtmisandmete 3D-analüüsi tulemus, anomaalne kiht punase ja sinise pidevjoone vahel

Sarnaselt esimestele mõõtmistele ei õnnestunud siiski maaradari mõõtmistulemusest selgelt välja lugeda põlevkivikaevanduse linttervikute täpsed asukohti. Lisaks murrangujoone anomaalsele kohale distantside 9–12 vahemikus (vasakul pool) on näha teist sarnast rikkena väljapaistvat kohta distantside 27–33 vahemikus (paremal pool) (joonis 15). Tegu võib eeldatavalt olla linttervikut läbiva paneeli veokäiguga, kuid kinnitust see tulevikus ei leidnud. Suurimaks probleemiks, mis tingisid maaradari mõõtmistulemuste halva loetavuse, võis olla kaevanduse veokäigus olev vesi, mis peegeldab signaali ning tekitab liigset müra.

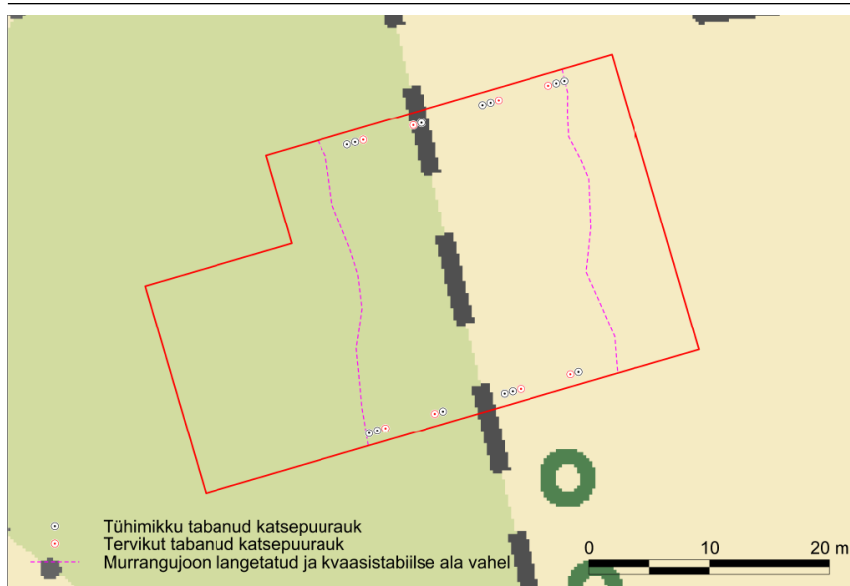
7.3.2 Katsepuurimised

Geo- ehk maaradariga tehtud mõõtmise puudulike tulemuste korral olin sunnitud alal linttervikute täpsete asukohtade fikseerimiseks kasutusele võtma katsepuurimised. Maaradaritega tehtud mõõtmistel esinenud liigse müra tõttu ei olnud võimalik siduda katsealal esinevat reaalselt situatsiooni olemasolevate mäetööde plaanidega. Tööde ja majanduslikku efektiivsust silmas pidades otsustasin katsepuurimised teha minimaalses võimalikus mahus, vahetult enne puur-lõhketöödeks vajalike lõhkeaukude puurimist, sama puurmasina abil.

Katsepuurimisega seotud ja selleks vajalike ettevalmistustööde tegemiseks kaasasin projektiga KMG OÜ, mis omab tööde tegemiseks vastavat tehnikat koos oma ala spetsialistidega. Katsepuurimised viisime läbi puurpingiga Sandvik DX780 (Advanced Mining, i.a), mis oli varustatud 89 millimeetrise puurkrooniga. Puuraugud otsustasin lasta puurida katseala lõuna- ja põhjaküljele, eesmärgiga selgitada olukord mõlemas katseala otsas. Olemasolevate teadmiste kohaselt sain eeldada, et katsealale jäävad linttervikud on moodustatud sirgjooneliselt ning seega ei pidanud töömahtude kokkuhoidmise eesmärgil vajalikuks katsepuurauke puurida ala keskossa. Otsusele aitas muuhulgas kaasa asjaolu, et puuraukude puurimisel tühimikku on suurendatud tõenäosus kasutatavast puurkroonist ilma jääda, sest see võib tühjas ruumis vibreerides puurvarda küljest ootamatult eralduda.

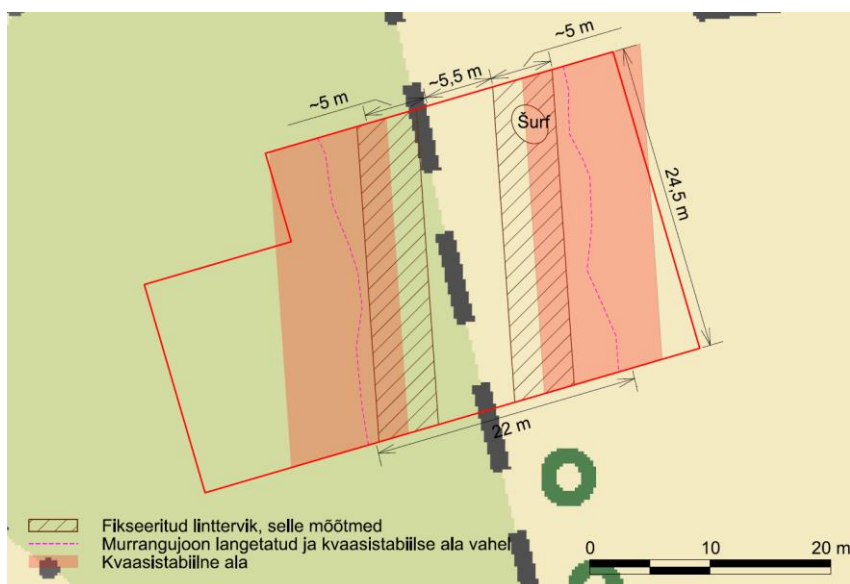
Puurimistöödega alustasime katseala põhjapoolsest servast ning seejärel liikusime katsela lõunapoolsele servale. Katsepuurimiste alguspunktid mõlemas väljaku otsas määrasime ala läbiva murrangujoonte järgi, mis aitasid eeldada, kus põlevkivist linttervikud ligikaudselt paiknevad.

Esimeses etapis puurisime puuraugud ~0,7 m sammuga, et fikseerida linttervikute olemasolu ning nende umbkaudne paiknemine (joonis 16). Kuna tegemist ei olnud südamikpuurimisega, mille käigus jääb alles terve puursüdamik, tuli jälgida puuraugust välja paiskuvat tolmu värvust. Hallikas tolm viitas puuri lubjakivi läbindamisele, pruunikas tolm põlevkivile ning tolmu puudumine koos puuri vastupanuta liikumisega tühimikule. Puurimise käigus avastatud tühimikud viitasid omakorda kas väljatud käsilaavale või tervikutevahelisele veokäigule.



Joonis 16. Katsepuurimistööde skeem

Katsepuurimiste esimese etapi lõpetamine andis kinnitust ala läbivate linttervikute olemasolust, seega jäi üle need täpsemalt lokaliseerida. Katsepuurimistööde teises etapis otsisime välja eelnevas etapis 0,7 m sammuga puuritud puuraugud, kus algas ning lõppes puurimine põlvkivisse. Seega jäi üle leida põlvkivist linttervikute võimalikult täpne kontuur (joonis 17), mille tarbeks otsustasime puurimist nendel aladel jätkata 0,15 m sammuga. Tihedam samm oleks tähendanud liigset töö- ja ressursikulu ning puur-lõhketööde aspektist poleks see enam vajalik olnud. Viimaseks jäi üle ühendada ja maha märkida nii põhja- kui ka lõunapoolsetel külgedel leitud linttervikute välimised ja sisemised piirid.



Joonis 17. Linttervikute paiknemise skeem katsealal

Katseala tehniliste ettevalmistustööde (siia hulka ei kuulu georadariga ning käsijaamaga teostatud topogeodeetilised mõõtmised) ajakulu oli kolm tööpäeva.

8. Kontrollitud maapinna langatus ehk puur-lõhketööd

Käesoleva lõputöö ja uuringu üheks peamiseks eesmärgiks on maa-aluste linttervikute purustamine maa pealt teostatud puur-lõhketöödega ehk altkaevandatud ja kvaasistabiilsete alade kontrollitud stabiliseerimine pealmaatööde abil. Lõhketööde tegemine on reguleeritud majandus- ja taristuministri poolt 08.09.2017. a välja antud määrusega nr 49 „Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded“. Maa-aluste tervikute purustamiseks puur-lõhketöödega on vaja lõhatavale massiivile vastavalt projektis kirjeldatud vahekaugustele puurida laenguaukude võrk.

Puur-lõhketööde põhiliseks eesmärgiks esimeses etapis oli purustada maa-alused linttervikud kasuliku kihi piires katsealaga kattuva osa ulatuses, et põlevkivitervik puruneks „pulbriks“ ja paiskaks kogu materjali tühimikku ehk strekki. Viru kaevanduses on katsetatud maapinna sundlangetamist puur-lõhketöödega, mille käigus purustati kaevanduse tugitervikud. Pärast lõhkamist vajus maapind sellel alal ligikaudu 1,5–1,7 m. Sarnane, kuid mõnevõrra väiksem, tulemus oli ootuseks ka käesoleva lõputöö käigus teostatud puur-lõhketööde esimeses etapis.

Teises etapis tuli kobestuslaengutega lõhata ka kaevanduse lasumis asuv lubjakivimassiiv. Lõhketööde tulemusena stabiliseerub maapind aja möödudes selleks vajalikus ulatuses taristu, ehitiste ja muude rajatiste ehitamiseks ning ettevõtlusega seotud toiminguteks.

Käesoleva uuringu eesmärgini jõudmiseks ja katsela tingimustes on laenguaukud paigutatud nii linttervikutesse kui ka lubjakivimassiivi. Põlevkivisse puuritud laenguaukude sügavus on vastavuses katsealaga kattuva põlevkivikihi lamami sügavuse ehk Kiviõli põlevkivikaevanduse põhjaga (antud piirkonnas ~8 m). Lubjakivimassiivi puuritud laenguaukude põhi asus ligikaudu massiivi alumise kolmandiku peal (maapinnast ~3,5 m sügavusel). Lõhkamine viidi läbi viite meetodil, mis tagas üheaegselt lõhatava lõhkeaine ohutu koguse ning seeläbi oli võimalik vähendada lõhketöödest tulenevat lööklainet, maavõnkeid, müra, tolmu ja plahvatusgaase.

8.1 Seismiliselt ohutu laeng

8.1.1 Maksimaalne lubatud võnkekiirus

Puur-lõhketööde projekteerimisel ja läbiviimisel tuleb arvestada asjaolu, et tekkivad maavõnked ei tohi ohustada lõhatava ala lähedusse jäävaid hooneid ja muid taristuobjekte. Hoonete ja taristuobjektide tundlikkust võngetele iseloomustatakse võnkekiirusega. Enamik lubatavaid maavõnke kiiruseid on kehtestatud eelnevalt nimetatud määrusega nr 49 (Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded, 2017). Selleks, et vähendada uurimuse käigus tehtud katsetöödega kaasnevaid asjaajamisi, valisin katseala selliselt, et viimase lähiümbrusesse ei jääks ülemäära palju piiranguid põhjustavaid objekte.

Lõhketööde projekteerimisel arvutatakse maksimaalne lubatud võnkekiirus ehitise kohta järgmise valemi abil:

$$v_{max} = v_1 \times F_k \text{ (cm/s)} \quad [1]$$

kus:

v_1 – kaitstava ehitise kaugusest ja tema aluspinnasest sõltuv suurim lubatud võnkekiirus (cm/s);

F_k – ehitise liigist sõltuv parandustegur (määruse nr 49 lisa, tabel 2).

Katsealal teostatavatele puur-lõhketöödele lähim raudteerelss paikneb lõhkamise piirist ~100 m kaugusel loodes Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul. Kinnistul paiknev raudtee on lõiguti üles võetud ja oma algotstarvet silmas pidades käesoleval hetkel kasutuskõlbmatu. Kuna pole teada, kas see nii ka jääb, siis tuleb ohutu vibratsioonikiirus määrata ka raudteele. Määramise aluseks on võetud Soome Vabariigi Transordiameti poolt koostatud juhised puur-lõhketööde teostamiseks raudtee läheduses (Liikennevirasto, 2013). Juhendi tabelis L3.1 on märgitud ohutu piirväärtus raudteele ja raudtee külge kinnitatud seadmetele, milleks on kuni 100 mm/s vertikaalkomponendilist võnkekiirust (tabel 3).

Tabel 4. Konstruktsioonide ja seadmete vibratsiooni indikatiivsed piirväärtused (Liikennevirasto, 2013)

E. Raudteed ja nendele kinnitatud seadmed			
R, m	v _{Ve} , mm/s	W, kg	nW, kg
10	100	18	110
20	100	73	442
40	100	292	1 767
60	100	656	3 976
80	100	1 166	7 068
100	100	1 822	11 044
150	100	4 100	24 848
200	100	7 289	44 174

Tabelis on kasutatud järgmisi tähiseid:

R – Mõõtmiskoha ja detonatsioonikoha vaheline kaugus;

v_{Ve} – Vertikaalkomponendiline võnkekiirus;

W – suurim ühe viitega lõhatava lõhkeaine kogus;

nW – suurim lõhatava lõhkeaine kogus.

Lähim hoone on Mäealuse põik 7 (katastritunnus 30901:001:0137) kinnistul asuv kaevumaja, mis paikneb lõhatavast alast ~80 m kaugusel edelas. Seega saame maksimaalseks lubatud võnkekiiruseks kaalumajale arvutada järgnevalt:

$$v_{max} = v_1 \times F_k = 1,85 \times 1,20 = 2,22 \text{ cm/s} = 22,2 \text{ mm/s.}$$

Seejuures tuleneb väärtus v_1 antud juhul lisaks kaugusele lähimast lõhkamiskohast ka asjaolust, et lähtuvalt katseala piirkonna geoloogiast ja erinevate ümbruskonnas paiknevate puursüdamike andmetele tuginedes on ümberkaudsete ehitiste vundamendi aluspinnaseks pehme lubjakivi. F_k väärtus on tuletatud ehitusregistri andmetest, mis ütlevad, et tegu on madalvundamendile rajatud tellistest seintega hoonega. Kaevumaja sees paiknev puurkaev on Keskkonnaagentuuri poolt hallatava VEKA registrist avalikult saadaval oleva informatsiooni kohaselt 75 m sügavune. Seejuures on puurkaev lõhatava ala laengute paiknemise sügavuselt (~9 m) ehk sügavuselt, kus läheduses aset leidev lõhkamine seda kivimikihtides ja nende vahel paiknevate lõhede tõttu kõige enam mõjutada võiks, kolmekordselt manteldatud. See annab aluse arvata, et puurkaevu seinad on piisavalt tugevad ning lõhketööde seismika kasutatud lõhkeainete koguste juures ei suuda kuidagi mõjutada ei puurkaevu enda struktuuri ega vee kvaliteeti.

Sama loogika kehtib ka lõhatavast alast ~120 m kaugusel kagus, Mäealuse põik 1 (katastritunnus 30901:001:0139) kinnistul paikneva puurkaevu osas, kuna see puurkaev on sama sügav ja sarnaselt manteldatud. Eesti Vabariigi seadusandluses, ühtlasi määruses nr 49 (Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded, 2017), pole välja toodud ühtegi tegurit või parameetrit, mille alusel puurkaevudele lubatud suurimat võnkekiirust ja suurimaid lubatud laengukoguseid määrata, siis pole arvutuslikku mõjuhinnangut võimalik selle kohta välja tuua ning mõlemal juhul piirduda avaliku lähteinfo põhjal kujunenud arvamusega.

Katsealast ~195 m kauguse loodes, Mäealuse tee 5 (katastritunnus 30901:004:0017), paikneb kontorihoone (kaalumaja) koos aktiivses kasutuses oleva autokaaluga. Seega saame maksimaalseks võnkekiiruseks kontorihoonele arvutada järgnevalt:

$$v_{max} = v_1 \times F_k = 1,40 \times 1,20 = 1,68 \text{ cm/s} = 16,8 \text{ mm/s}.$$

Seejuures tuleneb väärtus v_1 antud juhul lisaks kaugusele lähimast lõhkamiskohast ka asjaolust, et lähtuvalt katseala piirkonna geoloogiast ja erinevate ümbruskonnas paiknevate puursüdamike andmetele tuginedes on ümberkaudsete ehitiste vundamendi aluspinnaseks pehme lubjakivi. F_k väärtus on tuletatud ehitusregistri andmetest, mis ütlevad, et tegu on madalvundamendile rajatud tellistest seintega hoonega. Samal kinnistul paiknevad ülejäänud hooned ja rajatised pole ehitusregistris arvel ning seetõttu on nende konstruktsioonid ja kvaliteet teadmata.

Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) paikneb töökoda, mis jääb lõhatavast alast ~130 m kaugusele loodesse. Maksimaalseks võnkekiiruseks töökojale saame arvutada järgnevalt:

$$v_{max} = v_1 \times F_k = 1,60 \times 1,50 = 2,40 \text{ cm/s} = 24,0 \text{ mm/s}.$$

Seejuures tuleneb väärtus v_1 antud juhul lisaks kaugusele lähimast lõhkamiskohast ka asjaolust, et lähtuvalt katseala piirkonna geoloogiast ja erinevate ümbruskonnas paiknevate puursüdamike andmetele tuginedes on ümberkaudsete ehitiste vundamendi aluspinnaseks pehme lubjakivi. F_k väärtus on tuletatud ehitusregistri andmetest, mis ütlevad, et tegu on madalvundamendile rajatud teraskonstruktsiooniga hoonega (kaarhall).

Kemikaalide ladu paikneb lõhatavast alast ~135 m kaugusel loodes, Mäealuse tee 7 (katastritunnus 30901:001:0008). Seega saame maksimaalseks võnkekiiruseks lahoonele arvutada järgnevalt:

$$v_{max} = v_1 \times F_k = 1,60 \times 1,20 = 1,92 \text{ cm/s} = 19,2 \text{ mm/s}.$$

Seejuures tuleneb väärtus v_1 antud juhul lisaks kaugusele lähimast lõhkamiskohast ka asjaolust, et lähtuvalt katseala piirkonna geoloogiast ja erinevate ümbruskonnas paiknevate puursüdamike andmetele tuginedes on ümberkaudsete ehitiste vundamendi aluspinnaseks pehme lubjakivi. F_k väärtus on tuletatud ehitusregistri andmetest, mis ütlevad, et tegu on madalvundamendile rajatud tellistest seintega hoonega.

Muid unikaalseid ja muinsuskaitsealuseid hooneid, ohustatud loodusobjekte või muid piiranguid põhjustavaid objekte lõhkamistöde läheduses ei ole.

8.1.2 Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viites

Maksimaalne seismiliselt ohutu laeng ühes viites arvutatakse lõhketööde projekteerimisel järgmise valemi abil:

$$Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 (kg) \quad [2]$$

kus:

v_{max} – ehitise suurim lubatud võnkekiirus (cm/s);

r – kaugus lõhkamiskohast hoitava objektini (m);

K – pinnase seismilisuse tegur (määruse nr 49 lisa, tabel 3).

Katse- ehk lõhkamisalale lähim raudteerelss paikneb lõhkamise piirist ~100 m kaugusel läänes Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul. Vastavalt Soome Vabariigi Transpordiameti koostatud juhistele puur-lõhketööde teostamiseks raudtee läheduses (Liikennevirasto, 2013) on ohutu kaugus raudteele ja raudtee külge kinnitatud seadmetele ühes viites juhendi tabelist L3.1, käesoleva töö tabelist 3, lähtuvalt:

$$100 \text{ m} = 1\,822 \text{ kg}.$$

Lähim hoone on Mäealuse põik 7 (katastritunnus 30901:001:0137) kinnistul asub kaevumaja, mis paikneb lõhatavast alast ~80 m kaugusel edelas ning maksimaalne laeng ühes viites:

$$\text{põlevkivist linttervikutes: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [2,22^2 \times 80^{2,7}] \div 300^2 \approx 7,5 \text{ kg};$$

$$\text{lubjakivimassiivis: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [2,22^2 \times 80^{2,7}] \div 200^2 \approx 16,9 \text{ kg}.$$

Lõhatavast alast ~195 m kaugusel loodes, Mäealuse tee 5 (katastritunnus 30901:004:0017) kinnistul paikneva kontorihoone kohta on maksimaalne laeng ühes viites:

$$\text{põlevkivist linttervikutes: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [1,68^2 \times 195^{2,7}] \div 300^2 \approx 47,8 \text{ kg};$$

$$\text{lubjakivimassiivis: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [1,68^2 \times 195^{2,7}] \div 200^2 \approx 107,6 \text{ kg}.$$

Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul paiknev töökoda jääb lõhatavast alast ~130 m kaugusele loodesse, maksimaalne laeng ühes viites laohoonele on:

$$\text{põlevkivist linttervikutes: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [2,40^2 \times 130^{2,7}] \div 300^2 \approx 32,6 \text{ kg};$$

$$\text{lubjakivimassiivis: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [2,40^2 \times 130^{2,7}] \div 200^2 \approx 73,5 \text{ kg}.$$

Lõhatavast alast ~135 m kaugusel loodes Mäealuse tee 7 (katastritunnus 30901:001:0008) kinnistul paikneva kemikaalide lao kohta on maksimaalne lubatud laeng ühes viites:

$$\text{põlevkivist linttervikutes: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [1,92^2 \times 135^{2,7}] \div 300^2 \approx 23,1 \text{ kg};$$

$$\text{lubjakivimassiivis: } Q_{max} = [v_{max}^2 \times r^{2,7}] \div K^2 = [1,92^2 \times 135^{2,7}] \div 300^2 \approx 52,1 \text{ kg}.$$

8.1.3 Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis

Tulenevalt määrusest nr 49 (Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded, 2017) loetakse lühiviitlõhkamisel korraga plahvatavaks laenguks ühes viitegrupis olevat laengut, kui viitesamm on vähemalt 50 ms. Väiksemate viitesammude korral tuleb arvutuslik seisemiselt ohutu ühes viitegrupis olev laeng jagada parandusteguriga, mille väärtus on:

- 1,2 kui viitesamm on 35...50 ms;
- 1,4 kui viitesamm on 25...35 ms;
- 1,5 kui viitesamm on alla 25 ms.

Seega, kuna puur-lõhketöödel planeeritav ja kasutatud viitesamm oli 42 mm, siis tuleb arvutuslik seisemiselt ohutu laeng ühes viitegrupis põlevkivist linttervikute lõhkamisel jagada parandusteguriga 1,2. Lubjaivimassiivi lõhkamisel jääb viitesamm kohati alla 25 ms, mistõttu tuleb arvutuslik seisemiselt ohutu laeng ühes viitegrupis viimase lõhkamisel jagada parandusteguriga 1,5.

Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis lõhatavast alast ~100 m kaugusel läänes paikneva raudteerelsi kohta Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul on:

$$Q_{max} = 1\,822 \div 1,2 \approx 1\,518,3 \text{ kg}.$$

Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis lõhatavast alast ~80 m kaugusel edalas asuva kaevumaja kohta Mäealuse põik 7 (katastritunnus 30901:001:01387) kinnistul on:

$$\text{põlevkivist linttervikutes: } Q_{max} = 7,5 \div 1,2 \approx 6,3 \text{ kg};$$

lubjakivimassiivis: $Q_{max} = 16,9 \div 1,5 \approx 11,3 \text{ kg}$.

Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis lõhatavast alast ~195 m kaugusel loodes paikneva kontorihoone kohta Mäealuse tee 5 (katastritunnus 30901:004:0017) kinnistul on:

põlevkivist linttervikutes: $Q_{max} = 47,8 \div 1,2 \approx 39,8 \text{ kg}$;

lubjakivimassiivis: $Q_{max} = 107,6 \div 1,5 \approx 71,7 \text{ kg}$.

Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis lõhatavast alast ~130 m kaugusel loodes asuva töökoja kohta Sonda tee 7a (katastritunnus 30901:001:0022) kinnistul on:

põlevkivist linttervikutes: $Q_{max} = 32,6 \div 1,2 \approx 27,2 \text{ kg}$;

lubjakivimassiivis: $Q_{max} = 73,5 \div 1,5 \approx 49,0 \text{ kg}$.

Maksimaalne ohutu laengu suurus ühes viitegrupis lõhatavast alast ~135 m kaugusel loodes paikneva kemikaalide lao kohta Mäealuse tee 7 (katastritunnus 30901:001:0008) kinnistul on:

põlevkivist linttervikutes: $Q_{max} = 23,1 \div 1,2 \approx 19,3 \text{ kg}$;

lubjakivimassiivis: $Q_{max} = 52,1 \div 1,5 \approx 34,7 \text{ kg}$.

8.2 Õhulööklaine

Võttes aluseks majandus- ja taristuministri poolt 08.09.2017. a välja antud määruse nr 49 lisa p 8.4, ei ole õhulööklaine ohtlikku mõju vaja arvestada kuna topise pikkus ületab 15 lõhkeaugu läbimõõtu.

8.3 Puur-lõhketööde parameetrid ja kildude laialipaiskumist vähendavad abinõud

Käesoleva uuringu käigus viisin katsealal puur-lõhketööd läbi puuraugu meetodil. Puur-lõhketööd teostasime kahes etapis – kõigepealt linttervikud ning seejärel lubjakivimassiiv. Puuraugud puurisime 89 mm puurkrooniga varustatud puurpingiga, kolme reana jadas mööda lintterviku kulgemise suunda (sammuga 1,5 x 1,25 m). Kokku puurisime tervikutesse 74 laenguauku. Tervikuid on alal kaks, mõlemad laiusega ~5 m. Tervikuid eraldab ligikaudu 5–6 meetri laiune veokäik ning linttervikute teisele küljele jääb täielikult väljatud, tänaseks varisenud, ala. Teises etapis lubjakivimassiivi lõhkamisel kasutasime sama puurpinka ja -krooni, puuraugud puurisime sammuga 2,0 x 2,0 m. Lubjakivikonsooli puurisime kokku 112 laenguauku.

Padrundatud 60 mm läbimõõduga, 470 mm pikad ja 1,6 kg kaaluvad lööklaengud paigutati laenguauku põhja või põhja lähedale üksteise peale. Laengud paigutasime esimeses etapis ainult põlevkivitervikutesse, teises etapis ainult kaevandust katvasse lubjakivimassiivi. Mäenduslikult ja geoloogiliselt muutlike olude tõttu võis lõhketööde läbiviimise eest vastutav isik lasta teha lõhkeaukude puurimisel nende asukohaga seonduvaid tarvilikke muudatusi.

Lõhatava massiivi tingimustes on lubatud laengukogus ühes puuraugus suhteliselt väike ning seega puurisime lõhkeaugud vahekaugusega 1,5 m. Laenguridade vaheline kaugus oli 1,25 m, mis jättis lõhkeridadest lõhatavate linttervikute mõlema küljeni ~1,25 m paksuse riba. Põlevkivist linttervikusse jäävad laenguaugud olid ligikaudu 8,7 m sügavused, lubjakivimassiivis kuni 4 m. Kuna põlevkivi on võrreldes lubjakiviga tugevusest oluliselt nõrgem ning lubjakivimassiivi lamamisse jääv ala on varasemalt lõhatud (tegu on tühja ruumiga), siis puudus vajadus ülepuureks.

Lõhketööde eesmärgiks oli kivimite kobestamine võimalikult väikeseks tükisuuruseks ja kivimikihtide langetamine kvaasistabiilse maapinna stabiliseerimise eesmärgil ning seetõttu ei olnud otsest vajadust minimaalse topise pikkuse arvutamiseks. Topise pikkus tervikute lõhkamisel oli ~6,8 m, mis ületas lõhkeaugu läbimõõtu 76-kordselt. Lubjakivikonsooli kobestamisel oli topise pikkus ~2,0 m, mis ületas lõhkeaugu läbimõõtu 22-kordselt. Puuraukude topistamisel kasutasime killustikku fraktsiooniga 0–16 mm. Laengu massi maksimaalsed suurused puuraugus valiti vastavalt käesoleva töö peatükis 8.1.3 kirjeldatule. Kõikjal võeti aluseks vähim lubatud maksimaalne ohutu laengu suurus (6,3 kg I etapis, 11,3 kg II etapis). Tervikute kobestamisel kasutasime ühe viitegrupi (ehk iga laenguaugu) kohta 3,5 padrunit ehk laengu suuruseks kujunes 5,6 kg ja lubjakivikonsooli lõhkamisel 7 padrunit ehk 11,2 kg. Ülejäänud osas tuli juhendada lõhketöid teostava ettevõtte kehtivatest ohutustehnika eeskirjadest ja juhenditest.

9. Teostatud puur-lõhketööde kirjeldus, saavutatud tulemused ja analüüs

Lõputöö käigus viisin läbi puur-lõhketööd ettenähtud katsealal kahes etapis. Mõlemat etappi on käsitletud eraldiseisvalt alljärgnevates peatükkides.

9.1 Katsetöödel teostatud puur-lõhketööd

Katsetööde käigus tuli puur-lõhketöödega purustada Kiviõli põlevkivikaevandust toestavad linttervikud. Tervikute purustamise põhimõtteks on nende laiali paiskamine maa-alusesse tühimikku, seejuures eesmärgiga langetada ja stabiliseerida kaevanduskäigu kohal asuv maapind. Küll tasub silmas pidada, et reaalselt maa-alust situatsiooni ning tühja ruumi on vanade kaevanduste puhul praktikas pea võimatu kaardistada ning tuleb lähtuda puhtteoreetilistest hinnangutest. Sama kehtib käesoleva tööga hõlmatud Kiviõli kaevanduse puhul. Seda kinnitas ka lõputöö käigus puur-lõhketöödele eelnenud maa- ehk georadarite kasutamine (ptk 8.3), mille esialgselt oodatud tulemused pidid andma vajaliku baasinformatsiooni puur-lõhketööde projekteerimiseks ja teostamiseks nii käesoleva kui ka tulevaste potentsiaalsete tööde tarbeks.

Kahjuks ei osutunud võimalikuks katsealale jäävat maa-alust situatsiooni ka erineva tundlikkusega georadaritega täpselt kindlaks teha ning teostatud katsepuurimised ei ole piisavalt täpsed, mistõttu ei saa ma olla kindel reaalses maa-alustes tingimustes. Selleks pean hinnangu andmiseks lähtuma teoreetilisest arvutuslikust meetodist. Arvutuslikult saan leida Kiviõli põlevkivikaevanduse mäetööde plaanide ja katsepuurimist abil fikseeritud linttervikute ja tühja ala, mis võib piirkonnas esinenud varingute tõttu reaalsuses oluliselt erineda:

$$V_{PKmassiiv} = n * a * b * h = 2 * 5m * 25m * 2m = 500m^3 \quad [3]$$

$$V_{tühi} = (v + [n * v_T]) * b * h = (6m + [2 * 3m]) * 25m * 2m = 600m^3 \quad [4]$$

$$V_{kokku} = V_{PKmassiiv} + V_{tühi} = 500m^3 + 600m^3 = 1100m^3 \quad [5]$$

kus:

n – linttervikute arv katsealal, tk;

a – lintterviku laius katsealal, m;

b – lintterviku pikkus katsealal, m;

h – kasuliku kihi paksus ehk lintterviku kõrgus, m;

v – veokäigu laius, m;

v_T – tervikute ja langetatud ala vahelisele alale jääv hinnanguline tühimik, m.

Lähtuvalt kirjandusest (Vesiloo, 2012) jääb pudedate pooltihedate kivimite (sh põlevkivi ja veeriseline kruus) kobestustegur K_{PK} vahemikku 1,2 ... 1,3 ning lubjakivi kobestustegur

K_{LBK} vahemikku 1,4 ... 1,6. Seega saan kobestatud materjali puistemahu ehk puistekuupmeetrid arvutuslikult leida, kui korrutan põlevkivimassiivi ehk linttervikute ruumala läbi kivimi kobestusteguriga K , milleks arvestasin 1,2:

$$V_{PKpuiste} = V_{PKmassiiv} * K_{PK} = 500m^3 * 1,2 = 600m^3 \quad [6]$$

kus:

K_{PK} – põlevkivi kobestustegur.

Arvestades katsetööde käigus teostatud puur-lõhketöödega hõlmatud projektala pindalaga 550 m² saan arvutuslikult leida, mis ulatuses suudab lõhatud kivim maa-alustes tingimustes maksimaalselt ära täita. Jagades linttervikute puistemassi projektala pindalaga maa all, saan kobestatud materjali kihi paksuse kaevanduskäikudes leida valemiga:

$$H_{puiste} = \frac{V_{PKpuiste}}{A_p} = \frac{600m^3}{550m^2} \approx 1,1 m \quad [7]$$

kus:

A_p – katsetööde pindala, m².

Arvutuslikult täidavad kobestatud põlevkivist linttervikud maa all puur-lõhketööde tulemusena tekkinud tühja ruumi maksimaalselt kuni 1,1 m ulatuses, kuhu ei ole sisse arvestatud lõhketööde tagajärjel kaevanduse laest pudenevat lubjakivi või puistematerjali jaotumise ebaühtsusega. Tühimikesse laialipaisatud põlevkivist linttervikutest tulev materjal peab lõhketööde tulemusena moodustama võimalikult ühtlase kihi, mis jääb ajapikku tihenema selle peale vajuva maapinna poolt põhjustatud raskusjõu ja surve tõttu. See toimub aga eeldusel, et kaevanduse lasumis olev lubjakivikonsool ei jää enda ajutisest tugevusest ja vastupidavusest pidama ja „õhku rippuma“. Selline stsenaarium on väga tõenäoline eelkõige väiksemate projektalade puhul. Sarnane olukord tekkis ka käesoleva lõputöö katsetööde käigus peale puur-lõhketöid (joonis 17). Alt toestamata ning puur-lõhketööde tõttu mõraline ja lõheline lubjakivikonsool tekitas katsealale olukorra, kus ettenägematu aja jooksul võivad puur-lõhketöödest mõjutatud alal tekkida üksikud hinnanguliselt kuni 1 m sügavused varinguaugud.

Eelnevalt kirjeldatud olukorra aitavad kindlaks teha katseala mõõdistamised enne ja peale teostatud puur-lõhketöid. Sarnaselt ettevalmistöödele, viisin topo-geodeetilised mõõtmised katselal läbi ka vahetult ja 9 nädalat peale lõhketöid. Mõõdistuste tegemiseks kasutasin eelnevalt kasutusel olnud Trimble R12 integreeritud GNSS süsteemi, andmete analüüsimiseks ja 3D-mudeldamiseks kasutasin arvutiprogrammi Bentley MicroStation V8i.

Andmeanalüüsi ja mudeldamise tulemustest lähtuvalt nägin katseala pealispinnal mõningaid puur-lõhketöödest tekkinud mõjutusi (mikromõrad ja praod lubjakivis), põhjapoolsel serval on mõõtmisandmetest lähtuvalt näha ka konsooli pinna paarisentimeetrist tõusu. Esialgsete mõõtmistulemustega võrreldes tõusnud maapinnapunktid on eeldatavalt põhjustatud puur-

lõhketöödel tekkinud lööklainest, mille tulemusena ebaühtlustus lubjakivimassiivi struktuur tekitab sellesse (mikro)mõrad. Võttes arvesse käesoleva uuringuga hõlmatud katseala olemust tekkis puur-lõhketöödega lintterviku purustamisel olukord, kus võis eeldada, et maapind muutus osaliselt veelgi ebastabiilsemaks ning ettearvamatuks ja prognoosimatuks. Koheselt peale puur-lõhketöid tekkis suurim vajum põlevkivist lintterviku ja varasemalt langetatud alade vahelisel pinnal, jäädes vajumismolli pervele, st kvaasistabiilsele alale, kuhu tekkis kuni ~0,4 m sügavune lohk. Selle põhjuseks oli langetatud ja tervikutel püsiva maapinna vahelisele alale jääva pudeda materjali osaline tihenemine ning varisemine kaevanduskäiku (joonis 18). Sarnaselt pudenes katsealale jäänud tuulutusšahti täitmiseks kasutatud materjal kaevanduskäikudesse.

Lubjakivimassiivi ehk -konsooli rippuma jäämise tõenäosus ja võimalus väheneb kui üheaegselt teostatavaid puur-lõhketöid laiendada piki linttervikut, et lubjakivikonsool ei saaks omal jõul pidama jääda ning kaevanduse lagi saaks korraga langeda samaaegselt maksimaalses võimalikus ulatuses. Samas tuleb puur-lõhketööde projekteerimisel arvestada selliste viidete ja laengutega, mis võimaldavad lõhatud tervikutel ühtlaselt tühja ruumi laiiali paiskuda. Lubjakivikonsool on piki linttervikute telge kahest suunast varasema varisemise käigus purunenud ning seega tuleb parima tulemuse saavutamiseks tervikutega paralleelselt kontuurlaengutega purustada ka kaevanduse laes asuva lubjakivikonsooli otsad, et viimane oleks külgnevast maapinnast igal suunal lahti ühendatud.

Käesoleva lõputöö raames korraldatud katsetöödega hõlmatud ala asub erakinnistul ning kinnistu omanikuga kokkulepitud tingimustel tuli maa üle anda projekti lõppedes ning täielikult korrastatud. Kuna tervikute lõhkamisel võrdlemisi väikesel alal ei õnnestunud tekitada oodatud langatust, olin kohustatud läbi viima täiendavad puur-lõhketööd, seekord kaevanduse lasumis asuvas lubjakivis. Selleks, et saaksin maaomanikule kinnistu tagastada oodatud olukorras, otsustasime kokkuleppel maaomaniku ja lõhkajatega kobestada katsealale jääva lubjakivikonsooli kogu paksuses. Kogu lubjakivikonsooli kobestamise eeliseks oli kohese kontrollitud olukorra saavutamine.

Arvestades kogu eelnevalt toodud informatsiooni ning lubjakivi kobestustegurit 1,4 sain eeldada, et kogu konsooli kobestamisel tekib puur-lõhketöödega hõlmatud alale kobestatud lubjakivist positiivne pinnavorm (joonis 19). Tekkiva pinnavormi teoreetilise keskmise kõrguse nullpinnast saan leida valemiga:

$$H_{KOB} = h_1 * K_{LBK} - (H - H_{puiste}) - h_1 = 5,5m * 1,4 - (2,0m - 1,1m) - 5,5m = 1,3 m \text{ [8]}$$

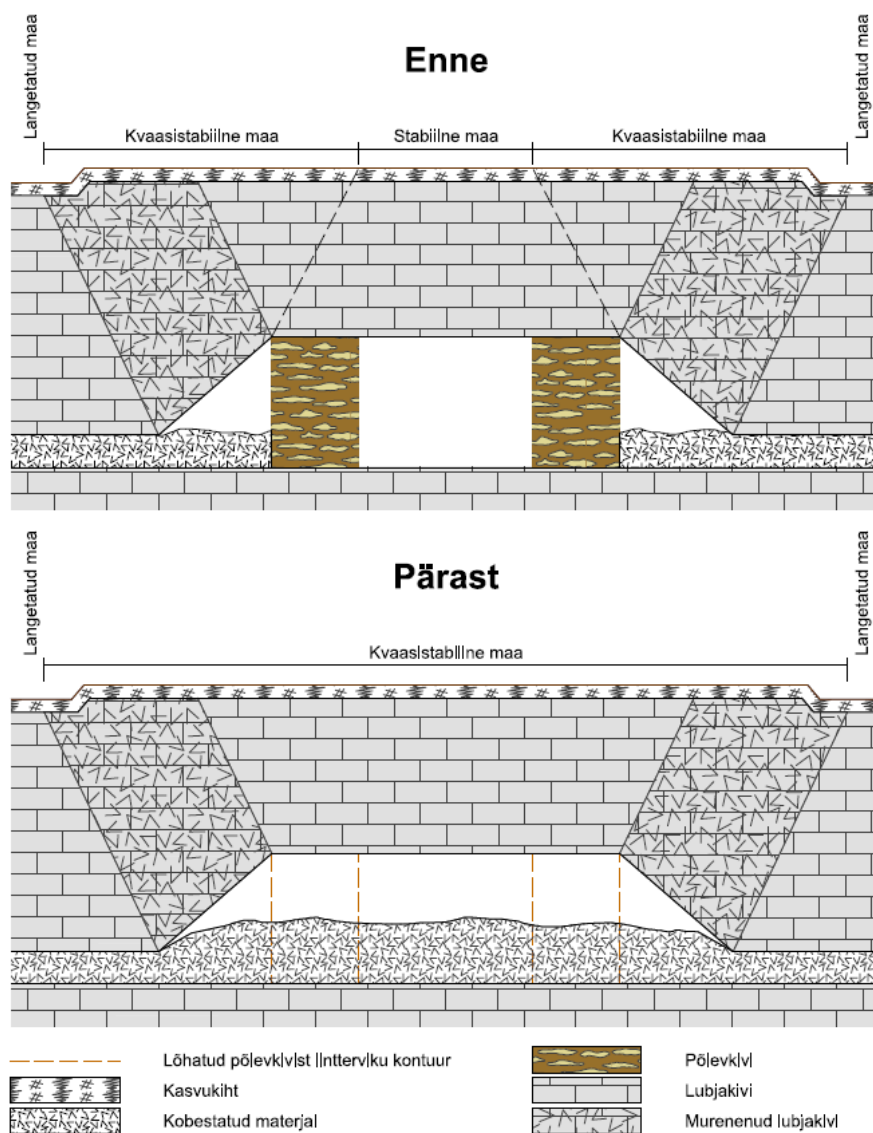
kus:

h_1 – lubjakivikonsooli paksus, m;

K_{LBK} – lubjakivi kobestustegur;

H – kaevanduse kõrgus/kasuliku kihi paksus, m;

H_{puiste} – kobestatud tervikute puistekõrgus, m.



Joonis 18. Hinnanguline situatsioon kaevanduses enne ja pärast tervikute purustamist

Enne ja pärast lubjakivikonsooli kobestamist teostatud mõõdistuste tulemusi analüüsid ja arvutiprogrammiga Bentley PowerCivil V8i mudelleerides leian, et kobestamisel tekkinud lubjakivist pinnavormi keskmine kõrgus jääb ligikaudu 1,2 m kõrgemale lõhkamisele eelnenud maapinnast. Seega saan kinnitada teoreetiliste arvutuste korrektsust. Mõõtmistulemustest on näha, kuidas lõhketööde tulemusena kuhjus materjal rohkem katseala kirdenurka, kus maksimaalne kõrguste vahe ulatus kuni 1,8 meetrini ning väikseimaks jäi edelapoolses nurgas, kuhu tekkis ligikaudu 1,3 m sügavune horisontaalmõõtmelt väike süvend. Lubjakivikonsooli lõhkamise tulemusena tekkis käesoleva lõputöö katsealale ligikaudu 8–9 meetri paksune ühtlaselt täidetud, visuaalselt suhteliselt ühtlase terasuurusega killustikupadi. Täpset killustiku fraktsiooni ma käesoleva lõputöö käigus ei määranud. Puur-lõhketööde ajakulu oli neli tööpäeva.



Joonis 19. Katseala peale lubjakivikonsooli puur-lõhketöödega kobestamist

9.2 Lõhketöödest põhjustatud maavõngete mõõtmine

Puur-lõhketöödest põhjustatud maavõngete parameetrite (võnkekiiruse komponendid, võnkekiirendus ja sagedusvahemikud) mõõtmist olin kohustatud korraldama lähimate rajatiste juures. Mõõtmised tuli teostada mõlemal korral, mil puur-lõhketööd toimusid. Maavõnkeid mõõtsin Mäealuse tee 5 (katastritunnus 30901:004:0017) kinnistul paikneval autokaalul (MP1) ning Mäealuse põik 7 (katastritunnus 30901:001:01379) kinnistul asuvas puurkaevu hoones (MP2).

Esimesed puur-lõhketööd toimusid 18.10.2023. Geofoonid kinnitasin mõõtepunktis MP1 autokaalu betoonist aluse seinale vinkliga (geofoon 1) ja betoonist aluse peale (geofoon 2). Puurkaevu hoonesse, mõõtepunktile MP2 paigutasin vibratsioonianduri koos raskusalusega hoone betoonist põrandale. Mõõtmisel kasutasin seismograafi Vibracord Tellus (Vibracord, i.a), vibratsiooni analüsaatorit SVAN 979 (Svantek, i.a.a) ning aktseleerimeetrit SVAN SV81A (Svantek, i.a.b).

Põlevkivist linttervikute kobestamise eesmärgil teostatud lõhketöödest põhjustatud maavõngete mõõtmistulemused on esitatud alljärgnevas tabelis 5.

Tabel 5. Maavõngete mõõtmistulemused 18.10.2023				
Lõhkamise nr		1		
Kuupäev		18.10.2023		
Mõõtmiskoht		Mäealuse tee 5 (30901:004:0017)	Mäealuse põik 7 (30901:001:0137)	
Kaugus lõhkamiskohast mõõtmispunktini, m		~200		~80
Parameeter		Geofoon 1, MP1	Geofoon 2, MP2	Aktseleerimeeter
Võnkekiirus, mm/s	Max. (vektorsumma)	2,46	2,31	-

Teised puur-lõhketööd katsealal toimusid 22.12.2023. Katsetöödel läbi viidud puur-lõhketööde teises etapis, lubjakivikonsooli kobestamisel, viisin maavõngete seiremõõtmised läbi samade

objektide juures, kuid seekord kasutasin seismograafi Nomis Mini-Supergraph II. Teise löhkamise põhjustatud maavõngete mõõtmistulemused on esitatud tabelis 6.

Tabel 6. Maavõngete mõõtmistulemused 22.12.2023			
Löhkamise nr		2	
Kuupäev		22.12.2023	
Mõõtmiskoht		Mäealuse tee 5 (30901:004:0017)	Mäealuse põik 7 (30901:001:0137)
Kaugus löhkamiskohast mõõtmispunktini, m		~200	~80
Parameeter		Geofoon 1, MP1	Geofoon 2, MP2
Võnkekiirus, mm/s	Max. (vektorsumma)	2,56	24,20

Antud kaugustel mõõdetud võnkekiiruse maksimaalsed väärtused (vektorsumma) ei ületa majandus- ja taristuministri 08.09.2017. a määruses nr 49 (Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded, 2017) silikaattelistest ja betoonist ehitistele kehtestatud piirväärtusi. Kõik kasutatud mõõteseadmed olid kalibreeritud.

9.3 Puur-lõhketööde alternatiivne korraldamine

Puur-lõhketöödega hoidetervikute purustamisele ja seeläbi kvaasistabiilsete alade langetamisele ja stabiliseerimisele on võimalik läheneda ka pisut teistsuguse tehnoloogiaga, kui ma käesoleva lõputöö käigus praktiliselt katsetasin. Edaspidi kirjeldatava tehnoloogia kasuks ei otsustanud ma lõputööga seotud katsetööde projekti võrdlemisi väikese ajaraami tõttu, kuivõrd tulemusteni jõudmiseks on vajalik kuni ligikaudu viie aasta pikkust monitoorimist. Kui käesoleva töö praktilises lahenduses lähtusin vaid põlevkivist linttervikute purustamisel ja maapinna langetamisel, mis oleks teoreetiliselt võinud olla kiiremate tulemustega, siis alternatiivselt on puur-lõhketööd võimalik üheaegselt teostada nii hoidetervikutes kui ka osaliselt kaevanduse laes olevas lubjakivikonsoolis.

Sellise alternatiivse lahenduse korral kobestatakse kaevanduskäike toetavad tervikud ning kaevanduse laes olev materjal piisavas vajalikus mahus, mis täidab piisava varuteguriga kogu kaevanduskäikudesse jääva tühimiku. Sellise lahenduse korral ei teki maapinnal külgnevate aladega võrreldes olulisi vajumeid, kuid seejuures stabiliseeritakse probleemseteks olevad kvaasistabiilsed alad. Põlevkivist hoidetervikute puur-lõhketöödega purustamisel tuleb lähtuda peatükis 10.1 toodud käsitlustest. Võtan alternatiivse lahenduse teoreetilise osa kirjeldamisel abiks käesoleva lõputööga hõlmatud katsealaga sarnase situatsiooni, kus:

- tööala hõlmab põlevkivikaevanduse veokäiku (laiusega 6 m) ja kahte põlevkivist linttervikut (laisuga 5 m), kaevanduse kõrgus 2 m;
- tööala moodustatakse 50 m ulatuses piki linttervikuid;
- kaevanduse lasumis asub vähemalt 5 m paksune lubjakivikonsool.

Võttes aluseks eelnevalt välja toodud tulemused ja hinnangud, mille kohaselt tervikute ja langetatud ala vahelisele alale jääv tühimik on laiuslega 3 m ning kirjandusest lähtuvalt on põlevkivi kobestusteguriks K_{PK} 1,2 ning lubjakivil K_{LBK} 1,4. Seega saan arvutuslikult leida vajalikud parameetrid – tervikute, tühimike ja kogu kaevandusala ruumala:

$$V_{PKmassiiv} = n * a * b * h = 2 * 5m * 25m * 2m = 1000m^3$$

$$V_{tühi} = (v + [n * v_T]) * b * h = (6m + [2 * 3m]) * 50m * 2m = 1200m^3$$

$$V_{kokku} = V_{PKmassiiv} + V_{tühi} = 1000m^3 + 1200m^3 = 2200m^3, \text{ kus}$$

n – linttervikute arv katsealal, tk;

a – lintterviku laius katsealal, m;

b – lintterviku pikkus katsealal, m;

h – kasuliku kihi paksus ehk lintterviku kõrgus, m;

v – veokäigu laius, m;

v_T – tervikute ja langetatud ala vahelisele alale jääv hinnanguline tühimik, m.

$$V_{PKpuiste} = V_{PKmassiiv} * K_{PK} = 1000m^3 * 1,2 = 1200m^3$$

Arvestades katsetöödega hõlmatud maa pindalaks 1100 m², saan leida, kui suure ala suudavad lõhatavad linttervikud maa-alustes tingimustes maksimaalselt täita:

$$H_{PKpuiste} = \frac{V_{PKpuiste}}{A_p} = \frac{1200m^3}{1100m^2} \approx 1,1 \text{ m.}$$

A_p – katsetööde pindala, m².

Seega täidavad laialipaisatavad põlevkivist linttervikud kaevanduskäigu kuni 1,1 m paksuse kihina ning võttes aluseks kaevanduse kõrguse 2 m, tuleb põlevkivikaevanduse laest kobestatava lubjakiviga täita veel lisaks $H_{LBKpuiste}$ -le keskmiselt 0,9 m ulatuses, millele omakorda lisanduks lõhatava lubjakivikihi paksus. Lähtudes lubjakivi kobestustegurist K_{LBK} 1,4 saan tuletada minimaalselt vajaliku lõhatava lubjakivikonsooli kihi paksuse alljärgnevast võrrandisüsteemist:

$$H_{LBKlõhatav}: \quad K_{LBK} * x = x + H_{LBKpuiste} \quad [9]$$

$$1,4x = x + 0,9$$

$$1,4x - x = 0,9$$

$$0,4x = 0,9$$

$$x \approx 2,3.$$

Seega kujuneb minimaalseks vajalikuks lõhatava lubjakivikonsooli kihi paksuseks, mis täidaks puistematerjaliga ära ka kogu ülejäänud ala, vähemalt 2,3 m. Võttes aluseks Ida-Viru maakonnas leviva situatsiooni, kus kvaasistabiilsed alad asuvad langetatud stabiilsest alast üldjuhul ligikaudu

0,4 m (kohati kuni 1 m) kõrgemal, siis ei ole otsest vajadust arvestada puur-lõhketöödega kobestatud materjali täiendava tihenemisega ning piisab lubjakivikonsooli kobestamisest vähemalt 2,3 m paksuses kihis. Puur-lõhketöödega kobestatav materjal tiheneb osaliselt juba materjali piiratud alale laialipaiskamisel. Seega ei ole maapinnal töödejärgselt oodata olulisi lokaalseid vajumisi või varingauke. Samas tuleb meeles pidada, et puur-lõhketööde täpsemad parameetrid tuleb projekteerida iga konkreetse ala kohta eraldi ning üldistusi sarnaste tööde lõikes teha ei saa.

Küll aga ei pruugi maa pealt teostatud puur-lõhketöödega põlevkivikaevanduse hoidetervikute purustamine osutuda võimalikuks eelkõige tihedama asutustega aladel. Tiheasustusega aladel ning kohtades, kus lähimad ehitised paiknevad vahetult tööalal või selle lähiümbruses võivad puur-lõhketöödest tulenevad lööklained ja maavõnked nendele liigset ohtu kujutada. Samuti võib tehnilisi probleeme tekkida tervikute lõhkamisel sügavamate alade korral, kui on raskendatud lõhkeaine paigutamine selleks ettenähtud sügavuste vahemikku. Selliste situatsioonide korral on otstarbekas eelistada kaevanduskäikude tagasitõitmist maa pealt (Osjamets, 2024).

10. Katseala korrastamine

Käesoleva lõputöö käigus teostatud katsetööd viisin läbi Ida-Viru maakonnas Lüganuse vallas Kiviõli linnas asuval eraomandisse kuuluval Kiviõli ettevõtlusala 1 (katastritunnus 30901:004:0026) kinnistul. Maaomanikul on kinnistule plaan rajada päikeseelektrijaam, mistõttu pidin katseala tagastama esimesel võimalusel täielikult korrastatult. Seega tuli likvideerida katseala ettevalmistus- ja katsetööde käigus maapinnale tehtud visuaalsed muutused ning tekitatud auk täita.

Peale puur-lõhketöid tuli ala korrastamist alustada kobestatud lubjakivi tasandamisest ning selle esmasest tihendamisest. Korrastamistööl kasutasin sama Kobelco SK210LC roomikekskavaatorit, mida kasutasin edukalt ka ettevalmistustööl (joonis 20). Selleks, et vältida lõhatud ala lohku vajumist tulevikus, otsustasin kogu kobestatud materjali jätta vaid puur-lõhketöödega rikutud alale, s.t kobestatud materjali ei lükatud külgnevatele aladele. Kiirendamiseks kobestatud lubjakivi tihenemist otsustasin tasandatud ala tihendamiseks kasutada 15t ühe trumliga tee- ehk pinnaserulli Ammann ARS110. ARS110 oli piisava suuruse ja manööverdamisvõime tõttu tööks sobilik.



Joonis 20. Korrastamistöölde algusfaas

Sarnaselt kobestusteguriga ($K_{LBK} 1,4$) saab lõhatud kivi (ingl k. *blasted rock*) tihendamisel kasutada tihenemistegurit, milleks ettevõtte Loadscan kogemustel ja veebilehe andmetel saab kasutada väärtust 1,3 (Loadscan, i.a). Antud väärtus on arvestatud lõhatava kivimi kobestusteguri 1,5 korral, seega kasutan käesoleva uuringuga hõlmatud ala teoreetilise tihendamise arvutamisel tegurit 1,2. Eelnevat arvestades on teoreetiline lõhatud kivi tihenemine katsealal $\sim 1,1$ m. Samas tuleb silmas pida, et kobestus- ja tihedustegurid annavad reeglina vaid üldised hinnangud ning sisaldavad potentsiaalselt suurt veamäära. Lõhatud kivi esmaseks tihendamiseks sõideti pinnaserulliga katseala üle kolm korda. Esmase tihendamise tulemused mõõdistasin Trimble R12 GNSS-iga. Mõõtmistulemuste andmetel toimus lõhatud kivi tihenemine keskmiselt 0,7 m ulatuses. Oletuslikult saan eeldada, et olulist täiendavat tihenemist lõhatud kivis ei toimu, küll ei saa välistada võrdlemisi kindlaid, kuid mõõtmiselt väiksete lohku teket lähitulevikus.

Peale lõhatud kivi tasandamist ja tihendamist kasutasin ülejäänud süvendi täitmisel sealt eelnevalt väljakaevatud pinnast. Kuna tervikute purustamisega ei õnnestunud saavutada maapinna kontrollitud langetamist, siis kulus kogu väljakaevatud materjal täiteks ära (joonis 21). Süvendisse laotatud pinnast lasin ekskavaatoril kopaga täiendavalt tihendada. Viimasena tuli katsealale tagasi laotada sellelt eelnevalt kooritud kasvukiht. Sõltuvalt vajadusest võib selle asendada ka killustikuga. Korrastamistöde ajakulu oli kolm päeva ning sellele lisanduvad vajadusel tehtavad hilisemad tööd. Olulisi vajumisi katsealal peale töödega rikutud ala korrastamist ei tekkinud.

Olukordades, kus analoogsete tööde tulemusel tekib vajum ehk maapind langeb, saab täitmisel lisaks kasutada inertseid ehitus- ja kaevandusjätmeid (aheraine, tuhk). Jäätmete kasutamise uudne lahendus eelnevalt kvaasistabiilsete, kuid tööde läbiviimisel stabiliseeritud aladel soodustaks omakorda maa taaskasutusvõimaluste teket ning panustab ringmajandusliku kasutuse valdkonna arengule ja sellekohaste keskkonnamõjude vähendamisele.



Joonis 21. Korrastatud katseala

Järeldused ja kokkuvõte

Kvaasistabiilsete alade maa pealt teostatud puur-lõhketöödega stabiliseerimise peamiseks eesmärkideks erinevate tehnoloogiate kasutamise korral on:

- tekitada kvaasistabiilsele alale sunnitud langatus;
- täita kaevanduskäigud kobestatud kiviga;
- eemaldada kõik eeldused kvaasistabiilse ala jaoks tervikute ja kogu kaevanduskäike katva massiivi lõhkamisel, seejuures stabiliseerida maapind.

Käesoleva uurimistöö jooksul tehti praktilised katsed Ida-Viru maakonnas Lüganuse vallas Kiviõli linnas asuval Kiviõli ettevõtlusala 1 (katastritunnus 30901:004:0026) kinnistul, eesmärgiga stabiliseerida põlevkivi kaevandamisel tekkinud kvaasistabiilne ala. Kinnistu omanikul on plaan käsitletavale alale rajada päikeseelektrijaam, mille rajamine on kinnistu alla jääva Kiviõli põlevkivikaevanduse tõttu tänaseni pausil olnud. Katsetööde käigus valmistati ala ette maa pealt teostatud puur-lõhketööde läbi viimiseks.

Ettevalmistustööde käigus märgiti katsetöödeks sobilik ala loodusesse ning eemaldati katend kuni ühtlase lubjakivikonsoolini, et oleks tagatud ideaalsed tingimused situatsiooni kaardistamiseks maa- ehk georadariga. Reaalse olukorra kaardistamiseks kasutasin erinevaid maaradareid ja katsepuurimisi. Katsepuurimine oli vajalik georadariga saavutatud mitterahuldavate tulemuste tõttu. Ettevalmistustööde (v.a georadariga mõõdistamine) ajakulu oli kolm tööpäeva. Tulevaste sarnaste projektide teostamisel ei ole ettevalmistustööd nii suures mahus vajalikud, piisab vaid reaalse olukorra kaardistamiseks vajalikest katsepuurimistest.

Katsealale jäid endise Kiviõli põlevkivikaevanduse veokäik ja seda toetavad linttervikud, mille täpse asukoha fikseerisin katsepuurimistega. Katsetööde käigus viisin läbi puur-lõhketööd linttervikute purustamiseks, mille tarbeks tuli puurida laengaugud ning paigutada laengud linttervikusse. Puur-lõhketööde peamine eesmärk oli purustada tervikud ning tekitada katsealal sunnitud langetus, mille tulemusena stabiliseeruks alale jääv kvaasistabiilne ala. Esimesed puur-lõhketööd ei saavutanud oma esialgset eesmärki, eeldatavalt katseala väikeste dimensioonide tõttu ning seega oli vajalik teostada järgmised lõhketööd – seekord kaevanduse lasumis asuvas lubjakivikonsoolis. Teises etapis teostatud puur-lõhketöödel kobestati kogu mineraalmassiiv, mis saavutas oma eesmärgi konkreetsel katsealal ehk katsealaga kattuvad kvaasistabiilsed alad said stabiliseeritud. Tervikute lõhkamisel maa pealt teostatud puur-lõhketöödega ei juhita kaevanduskäikudesse ja põhjaveekihti tehiskive ning saastavaid aineid, seega puudub töodel eeldatav oluline mõju pinna- ja põhjavee kvaliteedile või piirkonna veerežiimile. Põhjavee vaatluseid käesoleva lõputöö käigus ei teostatud.

Üldjoontes saavutati uuringute ja teostatud katsetöödega käesoleva lõputöö eesmärk. Kuigi uuringu tulemus on positiivne, on tulevikus parima võimaliku lahendi väljatöötamiseks vajalik katsetöödega hõlmata piki linttervikut suuremad alad, et oleks võimalik saavutada maapinna

ühtlane langetus. Samuti on vajalik katsetada puur-lõhketöödega tervikute purustamist osaliselt koos kaevandust katva lubjakivimassiiviga selliselt, et kaevanduskäigud oleksid kobestatud materjaliga täidetud maksimaalses võimalikus ulatuses.

Altkaevandatud alade kontrollitud langetamiseks pealmaatööde abil on mitu alternatiivi ning kõikide võimaluste korral on võimalik rakendada erinevaid, täpsele situatsioonile vastavaid tehnoloogiaid. Allmaatervikute purustamisel maa pealt teostatud puur-lõhketöödega on kvaasistabiilsete alade stabiliseerimisel suur potentsiaal eelkõige piirkondades, mille lähipiirkonnas (lõhketööde ohualas) ei asu tiheasustust ega muid olulisi rajatisi, mida võiks töödega kahjustada.

Tänuavaldused

Täna oma magistritöö juhendajaid Vesta Kaljustet ja Erik Väli projekti kaasamise eest, mis andsid idee lõputöö tegemise teemaks ning töö sisuliste nõuannete eest. Lisaks täna oma kaasjuhendajat Heidi Elisabet Soosalu, kes oli abiks käesoleva magistritöö vormistamisel. Samuti täna ettevõtteid AS Teede Tehnokeskus, OÜ KMG ja OÜ Inseneribüroo STEIGER, kes olid suureks abiks nõu, jõu ja tehnikaga lõputöö käigus tehtud katsetöödel.

Kirjanduse loetelu

- Advanced Mining (i.a). *DX780*. Kasutatud 25.05.2024 <https://www.advmining.sa/DX780.php>
- Erg, K. (2005). *Groundwater Sulphate Content Changes in Estonian Underground Oil Shale Mines*. [Doktoritöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/87c98105-6382-4285-825d-a78d83a1df3d>
- GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) (i.a). *100 MHz – Shielded antenna*. Kasutatud 18.05.2024. <https://www.geophysical.com/antennas#>
- Guideline Geo. (i.a.a). *Mala Ground Explorer*. Kasutatud 18.05.2024. <https://www.guidelinegeo.com/product/mala-groundexplorer/>
- Guideline Geo. (i.a.b). *Mala ProEX*. Kasutatud 18.05.2024. <https://www.guidelinegeo.com/product/mala-proex/>
- Jürs, E. ja Reinsalu, E. (2015). *Eesti põlevkivi töötlemine*. Tallinna Tehnikaülikool. <https://doi.org/10.13140/2.1.3041.3600>
- Karu, V. (2009). Altkaevandatud alale ehitamisel tuleb arvestada võimalike stabiilsusprobleemidega. Verš, E., Amon, L. ja Laumets, L. (toim), *Piirideta geoloogia. Schola Geologica V*, Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu (lk 109–113).
- Karu, V. (2011). Suletud põlevkivikaevanduste ressurss – kaevandusvesi. *Maa ressursid. Schola Geologica VII*, Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu (lk 83–92).
- Kolats, M., Valgma, I., Grossfeldt, G. ja Saum, M. (2008). Kaevandamise protsesside sõltuvus mäendustingimustest. Valgma, I. (toim), *Maavarade kaevandamise ja kasutamise protsessid*. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn (–).
- Lauringson, V. ja Reier, A. (1981). *Eesti NSV maapõuevarad ja nende kaevandamine*. Perioodika.
- Liblik, V., Toomik, A. ja Rätsep, A. (2005). Suletud ja suletavate kaevanduste keskkonnamõju. Liblik, V. ja Punning, J.-M. (toim), *Keskond ja põlevkivi kaevandamine Kirde-Eestis*. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn (lk 31–53).
- Liikennevirasto [Transpordiagentuur]. (2013). *Louhintatyöt rautatien läheisyydessä* [Kaevetööd raudtee lähedal]. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2013-23_louhintatyot_rautatien_web.pdf
- Loadscan. (i.a). *Bulking & Compaction Factors*. Kasutatud 11.04.2024. <https://www.loadscan.com/bulking-compaction/>

Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded. (12.09.2017). *Riigi Teataja*. Kasutatud 11.03.2023. <https://www.riigiteataja.ee/akt/112092017004>

Maa-amet. (i.a.a). *Geoportaali maardlate kaardirakendus*. Kasutatud 14.06.2023. <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>

Maa-amet. (i.a.b). *Maavaravarude koondbilansid*. Kasutatud: 14.06.2023. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geoloogilised-andmed/Maavarade-register/Maavaravarude-koondbilansid-p193.html>

Metsur, M. ja Eller, E. (2002). *Põlevkivi poolkoksi kuivladestamine ja poolkoksist täiteaine valmistamine*. Maves.

Metsur, M. ja Grigorjeva, I. (2020). *Lüganuse valla põhjaveevarude ümberhindamine*. Maves.

Orru, H., Viitak, A., Herodes, K., Veber, T. ja Lukk, M. (2020). Human Biomonitoring in the Oil Shale Industry Area in Estonia - Overview of Earlier Programmes and Future Perspectives. *Frontiers in Public Health*, 8, 582114. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.582114>

Osjamets, M. (2024). Põlevkivituhaga tagasitaitmise teostatavus ning mõju põhjaveele. Aaloe, A., Amon, L. ja Hints, O. (toim), Eesti Geoloogia Seltsi Bülletään 10. Kliimast, geoloogiast, ringmajandusest ja ajaloost. Aprillikonverents 2024, Eesti Geoloogia Selts, Tallinn (lk 21–24).

Ots, A. (2022). *Põlevkivi kaevandati mullu sama palju kui aasta varem*. Maa-amet. Kasutatud 15.06.2023. <https://maaamet.ee/uudised/polevkivi-kaevandati-mullu-sama-palju-kui-aasta-varem>

Pastarus, J., Valgma, I., Väizene, V. ja Pototski, A. (2011). Kaevandamise täitmisuuringud. XIX Aprillikonverentsi "Eesti mere- ja maapõue uuringutest ning arukast kasutamisest" teesid. Aprillikonverents 2011, Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn (lk 38–41).

Pärn, P. (2016). *Metsaökosüsteemi taastumise analüüs põlevkivikarjääride taasmetsastamisel*. [Magistritöö, Eesti Maaülikool]. <https://dspace.emu.ee/items/7fbb4701-0a7c-44d1-9c66-0e6ff471fb95>

Reinsalu, E. (2009). Altkaevandatud maa tehnogeoloogilised erisused. *Keskkonnatehnika*, 3, 10–11. <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:73530>

Reinsalu, E. ja Valgma, I. (2005). *Põlevkivi kaevandamise tehnoloogilise struktuuri optimeerimine*. Tallinna Tehnikaülikool. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1097.5447>

Reinsalu, E., Toomik, A. ja Valgma, I. (2015). *Kaevandatud maa*. Tallinna Tehnikaülikool.

Saarnak, M., Uibopuu, L., Valgma, I., Nurme, M. ja Väizene, V. (2014). Eesti põlevkivi kaevandamisviisid. Valgma, I., Väizene, V., Kolats, M., Grossfeldt, G., Karu, V. (toim). *Mäendus. Mäeinstituut 2014*. Tallinna Tehnikaülikool (lk 56–68).

Selberg, A., Viik, M., Pall, P. ja Tenno, T. (2009). Environmental Impact of Closing of Oil Shale Mines on River Water Quality in North-Eastern Estonia. *Oil Shale*, 26(2), 169–183. <https://doi.org/10.3176/oil.2009.2.09>

Sivakugan, N., Veenstra, R. ja Naguleswaran, N. (2015). Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(18). <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0020-8>

Svantek (i.a.a). *Class 1 Sound & Vibration Analyser SVAN 979*. Kasutatud 25.05.2024 <https://svantek.com/products/svan-979-class-1-sound-vibration-level-meter/>

Svantek (i.a.b). *SV 81 – Accelerometer 500mV/g*. Kasutatud 25.05.2024 <https://svantek.com/accessories/sv-81-accelerometer-500mv-g-tnc-top-10-32-mounting-hole/>

Tammiksaar, E. (2015). *Main Features of the Development of Oil Shale Industry in Estonia*. Viru Keemia Grupp. <https://www.vkg.ee/cms-data/upload/ajalugu/pohijooni-polevkiviolitootuse-arengust-eestis-inglise.pdf>

Tohver, T. (2010). Utilization of Waste Rock from Oil Shale Mining. *Oil Shale*, 27(4), 321–330. <https://doi.org/10.3176/oil.2010.4.05>

Tohver, V. (2019). *Aheraine sõelmete kasutamine ja selle mõjust keskkonnale Estonia kaevanduse näitel*. [Bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/et/item/1939eaeab-12dc-43aa-a201-e86b33ab87ec>

Toomik, A. (1999). Allmaakaevandamise mõjud maapinnale ja nende hindamine; Põlevkivi kaevandamise ja töötlemise mõjud Kirde Eestis. *TPÜ Õi publikatsioonid*, 6, 109–129.

Toomik, A. ja Liblik, V. (1998). Oil shale mining and processing impact on landscapes in north-east Estonia. *Landscape and Urban Planning*, 41(3-4), 285–292. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(98\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(98)00066-8)

Trimble. (i.a). *GNSS Systems. Trimble R12*. Kasutatud: 21.04.2024 <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-r12>

Veiderma, M. (2003). Estonian Oil Shale - Resources and Usage. *Oil Shale*, 20(3S), 295–303.

Vesiloo, P. (2012). *Kohaliku omavalitsuste keskkonnaspetsialistide mäetööstuse pädevuskoolitus 2012. Kaevandamise tehnoloogia konspekt*. Tallinna Tehnikaülikool.

Vibracord (i.a). *Vibraquipo. Tellus*. Kasutatud: 25.05.2024 https://vibraquipo.com/brochures/VibrationMeters_en.pdf

Väizene, V., Valgma, I. ja Pastarus, J. (2014). *Ida-Virumaa põlevkivi kaevandamisalade ruumilise planeeringu hinnang*. Tallinna Tehnikaülikool. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4751.1766>

Väizene, V., Valgma, I., Iskül, R., Kolats, M., Nurme, M. ja Karu, V. (2013). High Selective Oil Shale Mining. *Oil Shale*, 30(2S), 305–325. <https://doi.org/10.3176/oil.2013.2S.10>

Väizene, V., Valgma, I., Karu, V. ja Orru, M. (2016). Environmental impact of oil shale mining. *Environmental Earth Sciences*, 75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-016-5996-4>

Väizene, V., Valgma, I., Uibopuu, L., Kolats, M., Grossfeldt, G., Karu, V. ja Rahe, T. (2015). *Põlevkivi altkaevandatud alade planšettide digitaliseerimine ja stabiilsushinnangu andmine*. Tallinna Tehnikaülikool.

Väli, E., Lüütre, E., Reinsalu, E., Pöldema, T. ja Kauril, R. (2020). *Estonia kaevanduse II päikeseelektrijaama ala stabiilsuse uuring*. Tallinna Tehnikaülikool.

Väli, E., Reinsalu, E., Lüütre, E., Kauril, R. ja Pöldema, T. (2021). *Põlevkivi kaevisse allmaarikastamine ja rikastusjäädade ladustamine väljatöötatud aladesse*. Tallinna Tehnikaülikool.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hendrik Klaas

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Altkaevandatud alade stabiliseerimine ja maakasutuse võimaluste laiendamine Kiviõli põlevkivikaevanduse näitel“,

mille juhendajad on Vesta Kaljuste, Erik Väli ja Heidi Elisabet Soosalu,

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 loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.