

**Tallinna Tehnikaülikool**

Loodusteaduskond

Geoloogia Instituut

Mäeosakond



# **VÄIKEKARJÄÄRI PROJEKTEERIMINE FOSFORIIDI TEHNILISEKS PROOVIMISEKS**

**Magistritöö**

ID nr: 1708M

**Peeter Koll**

Juhendaja: Enn Lüütse, PhD, Geoloogia Instituut ,

Spetsialist

Geotehnoloogia AAGM 02/09

2017

Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks

---

*Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.*

*Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvametele jmt viidanud.*

*(Peeter Koll)*

*(allkiri ja kuupäev)*

Juhendaja: *Enn Lüütse*

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

*(allkiri ja kuupäev)*

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

## ABSTRACT

The aim of this master thesis was to study different locations and methods to procure sample material of Estonian phosphorite. Four different locations were analysed in order to find out their suitability for technical sampling. Three different sampling methods up to 5000 t of phosphorite were proposed. Also the problems of graptolite argillite shale autoignition and groundwater inflow were addressed. In order to procure the sample with least amount of earthmoving the main principle of determining the suitability of potential exploration fields was linear stripping ratio. The base requirement of machinery selection was that the machine should be rentable in Estonia.

Analyses showed that the best stripping ratio is on the Kiviküla exploration field while Aru-Lõuna limestone quarry could offer better supportive infrastructure.

Large diameter borehole drilling is proposed to procure 9 t sample with rotary drilling rig. Due to possible groundwater inflow Kelly drilling system is to be used. The drilling of one borehole shall not take longer than 24 h and cost about 15 000€. A pit mining method is proposed to procure 1000 t of phosphorite. To break hard limestone overburden, drilling and blasting is recommended over hydraulic breaker. Time consumption of the project shall be 6 weeks and the specific cost is 45 €/t. A declining trench is proposed to procure 5000 t of phosphorite. The trench is expected to be pilot cut for the future full scale mine. Also drilling and blasting is recommended as primary rock breaking method for hard limestones. For shales and sandstones hydraulic breaker is chosen. Time schedule takes up to 15 weeks to complete and the specific cost would be 32 €/t.

As the primary utilisation method for graptolite argillite shale a special dump is proposed. The dump shall be built with local materials and be air - and watertight. Crushed and compacted limestone splinters is used as the base layer of the dump. Top layer shall be made of clay excavated during the sampling process.

Hydrogeological conditions are found to be manageable. Water inflow to the pit and trench is expected to be less than consumer grade waste water pumps can pump.

The results show that procuring a phosphorite enrichment sample for industrial testing is technically achievable.

## SISUKORD

Abstract.....	3
Sisukord .....	4
Tabelid.....	6
1  Sissejuhatus .....	7
2  Piirkonna valik.....	9
2.1  Rannu uuringuruum.....	9
2.2  Saka uuringuruum .....	10
2.3  Moldova uuringuruum.....	10
2.4  Aru-Lõuna Lubjakivikarjäär .....	11
2.5  Kiviküla uuringuruum .....	12
2.6  Uuringuruumi valik.....	14
2.7  Kiviküla uuringuruumi geoloogiline ehitus ja mäenduslikud tingimused .....	15
3  Suure diameetriga puuraugud .....	17
3.1  Puuraugu puurimine .....	17
3.2  Suure diameetriga puuraugu korrastamine.....	21
4  Kaevand.....	22
4.1.1  Kaevandi põhiparameetrid .....	22
4.1.2  Kaevandi ettevalmistus ja pehme katendi eemaldamine .....	23
4.1.3  Kaevandi avamine lubjakivides .....	24
4.1.4  Kaevisse töste .....	25
4.1.5  Kaevandamine.....	28
5  Väike katsekarjäär .....	32
5.1  Pehme katendi eemaldamine .....	32
5.2  Kaljuse katendi eemaldamine.....	33
5.3  Savide eemaldamine.....	34

5.4	Liivakivide ja kiltade eemaldamine .....	35
5.5	Tootsa kihindi raimamine.....	35
5.6	Ajakava nädalate kaupa.....	35
6	Graptoliitargilliidi käitlemine .....	37
7	Hüdrogeoloogia ja veekõrvaldus .....	40
7.1	Sissevool ja alanduslehter .....	40
7.2	Veekõrvaldus.....	42
7.3	Settebassein .....	43
8	Korrastamine .....	44
9	Majandusosa .....	46
9.1	Suure diameetriga puuraugu maksumus .....	46
9.2	Proovikaevandi maksumus.....	46
9.3	Väikekarjääri maksumus .....	47
	Kokkuvõte.....	48
	Kasutatud materjalid .....	49
10	LISAD.....	54
10.1	Graafiline lisa 1 – Võimalike uuringuruumide asukohad .....	54
10.2	Graafiline lisa 2 – Uuringuruumi plaan.....	54
10.3	Graafiline lisa 3 – Proovikaevandi plaan .....	54
10.4	Graafiline lisa 4 – Väikekarjääri plaan.....	54
10.5	Graafiline lisa 5 – Graptoliitargilliidi puistang .....	54

## **Tabelid**

Tabel 1 Võimalike alade võrdlustabel .....	13
Tabel 2 Kivimite tugevustunnused Kiviküla uuringuruumis (11) (10). .....	16
Tabel 3 Kaevikust eemaldatavate kaeviste maht .....	23
Tabel 4 Kaevandi rajamine lõhketöödega.....	30
Tabel 5 Kaevandi rajamine hüdrovasaraga.....	31
Tabel 6 Väikekarjääri rajamine variant 1.....	36
Tabel 7 Väikekarjääri rajamine variant 2.....	36

## 1 SISSEJUHATUS

2013. aastal lisandus Euroopa Komisjoni Ettevõtete ja Tööstuse peadirektoraadi eestvedamisel loodud toorme ühenduse (ingl *The Raw Materials Initiative*) koostatud kriitiliste toormete nimistusse (1) fosforiit. Fosforiidina mõistetakse kivimit, mis sisaldab suures koguses fosforit ning mis Eestis esineb oobulusliivakivina. Oobulusliivakivi on segu merepõhja settinud liivast ning brahhiopoodide kodadest, mis sisaldab suures koguses fosforit. See segu on madalas meres settinud ning tsementeerunud. Fosfor on üks kolmest põhilisest elemendist, mida väetiste koostises kasutatakse – 82% fosforitoodangust kulub maailmas väetiste tootmiseks (2). Eesti maavaravarude koondbilansis (3) oli 2015. aasta lõpu seisuga arvel pea 3 miljardit tonni passiivset fosforiidivaru. Viimastel aastatel on fosforiidi kaevandamise teemal korraldatud mitmeid konverentse ning kirjutatud lugematul hulgal artikleid. Palju on arutatud kas ja kuidas tuleks fosforiiti uurida ning kas võiks kaaluda selle kaevandamist.

Fosforiidi uurituse osas on mitmeid arvamusi – osade ekspertide arvates on kõik juba varasemalt uuritud ning teiste arvates on vajalik seda veel teha. Põhimõtteliselt on õigus mõlemal poolel. 20. saj. teises pooles tehtud geoloogilised uuringud Eesti fosforiidileiupaikade kaardistamiseks ning arvele võtmiseks vastasid omaaegsetele nõuetele ning vastavad ka tänapäeval Eestis kehtivatele tarbevaru uuringu nõuetele (4). Teada on fosforiidi ning kaasnevate kivimite levik, kasuliku ainese ( $P_2O_5$ ) sisaldus ning tootsa kihi paksus, piiritletud ja plokkideks jaotatud on 4 maardlat – Rakvere, Toolse, Aseri ja Tsitre (3). Täiendavaid uuringuid toetavad aga argumendid, et kunagised plokiid on määratud vastavalt Nõukogude Liidus kehtinud piiritingimustele, mis lähtusid floteerides rikastamisest. Kaasajal on valikus lisaks floteerimisele ka näiteks elektrotermiline või arendatud Hardi protsess (5).

2014. aastal koostatud majanduslike mõjude analüüsis (6) lähtus Viru Keemia Grupi (VKG) plaanist, mis arvestas rajatava kaevanduse võimsuseks 4,4 mln t kaevist aastas. VKG planeeris kaevanduse rajamist Sonda piirkonda, mis on küll geoloogiliselt uuritud ent fosforiiti seal varasemalt kaevandatud ei ole. Uute maardlate avamise põhireegel on aga see, et maardla avatakse kõige kergemini ligipääsetavast kohast. Põlevkivi puhul toimus Maardla avamine avamusalal Pavandus ja Vanamõisas. Fosforiidi kaevandamist alustati esialgu Ülgasel, kus fosforiit avaneb klindiasangus. Klindiasangus avanevad Aseri, Tsitre ja Toolse maardlad, kus seniajani kaevandatud ei ole. Võimalikult lihtne maardla avamine võimaldab tööstusel järkjärgult testida kaevandamist – ja rikastamistehnoloogiaid ning suurendada

toodangu kogust. Kaevanduse rajamine eeldab aga kogu väärtusahela olemasolu mille hulka kuulub ka rikastamine.

Lähtuvalt eelnevatest asjaoludest on käesoleva magistritöö eesmärk valida sobivaim koht Virumaal fosforiidimaardla avamiseks ning pakkuda välja variante kuidas rikastamiseks ning tehniliste lahenduste testimiseks erinevas koguses fosforiidiproove hankida või väiketootmist alustada. Kuna vajaminev proovikogus sõltub tööstuse arendaja soovist ning konkreetse rikastamisprotsessi nõuetest ei ole ülesandes piiritletud võetavat proovikogust. Varasemalt on tehniline fosforiidiproov võetud Lääne-Virumaalt Tigapõllust Toolse fosforiidimaardla detailuuringu käigus, kuid saadud kaevise katsetulemusi ei ole Eestis säilinud. Töö on teoreetiline ning tugineb kirjandusele, arhiiviandmetele ning muudele allikatele, praktilisi katseid käesoleva töö raames ei tehta. Tehniliste lahenduste valikul üritatakse käesolevas töös lähtuda masinate võimalikult lihtsast kättesaadavusest.



## 2 PIIRKONNA VALIK

Käesolevas peatükis kirjeldatakse viit võimalikku uuringuruumi ja analüüsitakse nende sobivust katsekaevandi rajamiseks. Võimalike uuringuruumidena välja valitud alad asuvad Lääne – ja Ida-Virumaal Rannus, Sakas, Kivikülas ja Moldovas. Alad on esitatud kaardil (10.1). Arvestades, et projekti eesmärk on proovimaterjali võimalikult lihtne väljamine ning edasine käitlemine, lähtutakse asukoha valikul esmajärjekorras lineaarsest katenditegurist ning logistilisest taristust (maanteed, sadamad, raudteejaamad). Oluline on ka teadaolevalt keskkonnaohtliku graptoliitargilliidi võimalikult vähene esinemine uuringuruumis. Variantide kokkuvõttev võrdlus on esitatud tabelina (Tabel 1). Alade valik on tehtud Geoloogiafondi ning Maa-ameti geoportaali infole tuginedes, uusi geoloogilisi välitoid käesoleva magistritöö käigus ei tehtud.

### 2.1 Rannu uuringuruum

Ala asub Ida-Virumaal Aseri vallas Rannu külast kagus. Ala ligikaudsed koordinaadid L-Est97 süsteemis on X:6591608, Y:661544. Tegemist on osaga Aseri fosforiidimaardla plokist 19, mille kohal lasub Rannu lubjakivimaardla plokk 1 (3). Lähtuvalt varasemast geoloogilisest uuritusest (7) on Rannu tugevuseks võrreldes teiste aladega kõrge  $P_2O_5$  sisaldus, mis on üle 9% ning madalaim  $Fe_2O_3$  sisaldus, mis on 1%. Katendi kogupaksus on 19,1 meetrit, millest 13 meetrit moodustavad lubjakivid, 2,3 meetrit glaukoniitliivakivi. Graptoliitargilliidi paksus 2 meetrit vaadeldavatest aladest suurim. Graptoliitargilliidi kohal lasub 1,35 m savikiht. Tegemist on valdavalt maatulundusmaaga, mille pinnamood on tasane. Maapinna abs. kõrgused jäävad vahemikku 54...59 m ümp. Lähimad majad asuvad märgitud ala keskpunktist 300 meetri raadiuses. Alast idas asub Kestla soo, millel laiub Aseri maastikukaitseala. Samuti jääb ala idaserva, Kestla soo piirile, Meriküla oja. Lähimad puurkaevud kasutavad Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleksi vett. Logistiliselt on ala Tallinn-Narva maantee läheduses (põhimaantee nr. 1, E20), mis võimaldab maanteetranspordi edukat kasutamist. Lähim toimiv kaubasadam asub Kundas 26 km kaugusel (veotee mööda maanteed), Kiviõli ja Sonda raudteejaamad vastavalt 20 ja 23 km kaugusel.

## 2.2 Saka uuringuruum

Ala asub Ida-Virumaal Aseri vallas Kõrkkülas. Ala ligikaudsed koordinaadid L-Est97 süsteemis on X: 6591241, Y: 667375. Tegemist on osaga Aseri fosforiidimaardla plokist 21, mille kohal asub Suurkõrtsi lubjakivikarjäär, kus kaevandab AS Kiviluks (3). Saka uuringuruum on praktiliselt kõikide parameetrite (Tabel 1) poolest nõrgim variant. Fosforiidi kiht on üks õhemaid, ning katendi paksus suurim, ka 4,4 m paksuse ehituslubjakivi ploki 1 kaevandamise järgselt on kaljuse katendi paksus 10 m. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldus on ainsa variandina veidi alla 8%. Logistiliselt on asukoht hea, olemasoleva lubjakivikarjääri tõttu on juba olemas väljaveotee Tallinn-Narva maanteele. Lisaks on tõenäosus varasemalt kaevandatud alale täiendava geoloogilise uuringu või maavara kaevandamise loa saamine suurem kui kaevandamisega rikkumata alale. Olemasolev mäeeraldis võimaldaks kasutada ka valmisolevat teenindusmaad. Lähim maja asub olemasoleva mäeeraldise piirist 80 m kaugusel. Alast lõunasse jääb Purtse-Kestla maaparandussüsteem ning Sõreda oja. Kunda sadamasse on veotee pikkus 32 km ning Kiviõli raudteejaama 15 km.

## 2.3 Moldova uuringuruum

Käesoleva projekti raames Moldova uuringuruumi nimetust kandev piirkond on ala, mille emeriitprofessor Enno Reinsalu pakkus 2016. a. Geoloogia aprillikonverentsil (8) välja kui võimaliku rikastamisproovide hankimise koha. Ala keskpunkt asub ligikaudu koordinaatidel X: 6590677, Y:675591. Vastavalt nimetusele asub uuringuruum Moldova külast lõunas, Tallinn-Narva maantee ja Balti klindiastangu vahel, Aseri fosforiidimaardla 15. plokis. Reljeef on valdavalt tasane ning kaldega põhjasuunas. Maapinna absoluutkõrgused jäävad vahemikku 49...53 m. ümp. Ala lõunaosa on valdavalt põllumajandusmaa ning põhjaosas on rohkelt elumaju. Ala kirdeosasse jääb OÜ Kiviõli Keemiatööstuse Varad OÜ Moldova Kruusakarjäär. Piirkonda katab suhteliselt tihe kruusateede võrgustik. Veokaugus Kunda sadamasse on 42 km, Sillamäe sadamasse 44 km ning Kiviõli raudteejaama 14 km. Geoloogiliselt on tegemist ühe halvema valikuga. Fosforiidikihi paksus uuringuruumis on kõigest 1,1 m ning 20-meetrisest katendi paksusest pea 16 m moodustavad lubjakivid. Lisaks on graptoliitargilliidi kihi paksus 1,8 meetrit.

## 2.4 Aru-Lõuna Lubjakivikarjäär

Aru-Lõuna lubjakivikarjäär on karjäär Lääne-Viru maakonnas Sõmeru vallas, kus kaevandab tehnoloogilist (tehnilist) lubjakivi Kunda Nordic Tsement AS. Kuna karjäärist on juba kaevandatud võimaliku fosforiidikaeviku või karjääri katendiks olevat lubjakivi oleks eemaldatava katendi maht selle võrra väikesem. Karjääri põhja kõrgus jääb vahemikku 37...41 m ümp. Vastavalt geoloogiliste kihtide lasuvusele on karjääri põhi kaldu lõuna suunas. Karjääri ümbruses jäävad maapinna kõrgused vahemikku 48...53 m ümp, seega on karjääri lõunaosas katendi eemaldamisel võit ligikaudu 15 meetrit. Seda asjaolu on välja toodud mitmetel konverentsidel ning mõttevahetustel. Vaadates mäeeraldise piiresse jäävaid lõunapoolseid puurauke 938 ja 942 on kaljuse katendi paksus keskmiselt vahemikus 25...26 meetrit, seega oleks vajalik eemaldada veel umbes 10 m lubjakivi, 1 m glaukoniitliivakivi, 2,3 m savi ning 1,4 m graptoliitargilliiti. Tootsa kihindi paksus jääb vahemikku 1,8...2 m. Aru-Lõuna Lubjakivikarjääri lõunaosaga kattuvad Toolse fosforiidimaardla passiivse tarbevaru plokid 9 ja 11 kus keskmine  $P_2O_5$  sisaldus on vastavalt 10,7% ja 9,6%. Raua sisaldus 2% ning magneesiumi sisaldus 0,5%.

Aru-Lõuna lubjakivikarjääri uuringuruum omab sarnaseid eeliseid nagu Saka uuringuruum (2.2). Olemasolevas karjääris on olemas teenindusmaa ning karjääritehnikale sobiv taristu – karjääri on rajatud raudtee tehnoloogilise lubjakivi transportimiseks Kundasse.

## 2.5 Kiviküla uuringuruum

Kiviküla uuringuruum asub Lääne-Virumaal Viru-Nigula vallas Kivikülas. Ala keskpunkti ligikaudsed koordinaadid L-Est97 süsteemis on X: 6597646, Y: 639514. Ala jääb Toolse fosforiidimaardla põhjaosasse, ligikaudu 1,8 km ida pool asub kunagine Tigapõllu uuringušurf (Pilt 1) (9). Ala on valdavalt kasutuses põllumaana ning tasane, maapinna kõrgused jäävad vahemikku 53...56 m ümp. Ala kirdenurgas voolab Toolse jõgi.

Kiviküla suurim eelis on oluliselt suurem fosforiidikihi paksus (>3 m) (9) (3) kui teistel võrreldavatel aladel ning õhem katend, millest tulenevalt on lineaarne katenditegur 6,1. Logistiliselt on võimalik kasutada 9 km kaugusel olevat Kunda sadamat ning AS Kunda Trans hallatavat Kunda-Rakvere laiarööpmelist raudteed.



Pilt 1 Tigapõllu kaevandi rajamine (9)

Tabel 1 Võimalike alade võrdlustabel

	Rannu	Saka	Moldova	Aru-Lõuna	Kiviküla
Kihi paksus	1,3	1,2 (0,5)	<b>1,1</b>	1.8...2.0	<b>3,1</b>
Katendi paksus	>19	<b>&gt;20</b>	>18	<b>15</b>	16-19
Lineaarne katenditegur	14,6	16,7 (40)	16,4	7,9	<b>6,1</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9,2	<b>8</b>	8,7	<b>10</b>	8,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>1,0</b>	<b>2,7</b>	1,5	2.0	1,3
MgO	0,8	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
Kvaternaari setete paksus	0,4	0,3	0,5	<b>0</b>	<b>1,2</b>
Lubjakivi paksus	<b>6,1</b>	12	<b>15,9</b>	10	<b>6,1</b>
Glaukoniitlubjakivi paksus	6,9	2,7	1,6	-	2,3
Glaukoniitliivakivi paksus	2,3	1,5		1,0	1,2
Aleuoliitsavi paksus	1,4	-		2,3	2,6
Graptoliitargilliidi paksus	<b>2,1</b>	1,9	1,8	1,4	<b>1,1</b>
Katendi liivakivi paksus	-	1,5		0,2	<b>4,2</b>

## 2.6 Uuringuruumi valik

Arvestades erinevate võimalike uuringuruumide kohta varasemalt välja toodud andmeid eristuvad parimate variantidena Kiviküla ja Aru-Lõuna. Mõlema ala katenditegurid on oluliselt väikesemad kui alternatiivsetel variantidel. Tulenevalt Kiviküla uuringuruumis olevast suuremast tootsa kihi paksusest oleks ka maardla tootlus ühe ruutmeetri kohta seal suurem kui Aru-Lõunas. Aru-Lõuna suurim eelis võrreldes Kivikülaga on juba olemasolev mäetööstusmaa ning taristu. Tänapäevaseid NIMBY (ing. k. *Not In My Back Yard* – Mitte minu tagahoovis) ning kõigele vastu olemise liikumisi arvestades oleks Aru-Lõuna lubjakivikarjääris geoloogilise uuringu loa saamine oluliselt tõenäolisem, kui Kivikülas. Kuna perspektiivsed alad asuvad lähestikku ning on lähedase geoloogilise ehitusega valitakse käesolevas töös edasiseks analüüsimiseks Kiviküla uuringuruum, kuna sealsed tehnilised lahendused on vajadusel rakendatavad ka Aru-Lõunas.

## **2.7 Kiviküla uuringuruumi geoloogiline ehitus ja mäenduslikud tingimused**

Uuringuruum on piiratud nelja puurauguga, mis on rajatud Toolse fosforiidimaardla detailuuringu (9) raames – PA-429, PA-604, PA-456 ja PA-579. Uuringuruumi pindala on 39,64 ha. Uuringuruumi nurgapunktide koordinaadid on toodud uuringuruumi plaanil (10.2) Puuraukude suudmete absoluutkõrgused jäävad vahemikku 51,04...55,12 m ümp. Kvaternaari pudedate setete paksus jääb valdavalt vahemikku 1,2...1,3 meetrit, puuraugus PA-579 on setete paksus 0,1 m. Kaljused kivimid algavad valdavalt Kunda lademe lubjakiviga, mille keskmine paksus on 6,5 m. Puuraugus PA-429 lasub Kunda lademel ka 0,8 m paksuselt Aseri lade. Kunda lademe lamamiks on keskmiselt 2,5 m paks Volhovi lademe lubjakivi. Volhovi lademe lamamis on Hunnenbergi ja Billingeni lademed, mille galukoniitliivakivid on kokku keskmise paksusega üks meeter. Glaukoniitliivakividele järgneb keskmiselt 2,7 meetrit paks Varangu lademe savikiht. Pakerorti lademe Türisalu kihistu graptoliitargilliidi paksus savikihi all on keskmiselt 1,5 meetrit. Projekti suurimat huvi pakkuv Pakerorti lademe Mäeküla kihistu paksus on keskmiselt 7 meetrit, millest 4,1 meetrit on määratud tootsaks kihindiks. Kõik puuraugud on vähemalt 0,3 m jagu puuritud Mäeküla kihistu lamamisse – Tsitre kihistu aleuroliiti. Puursüdamiku väljatulekuna on geoloogid märkinud keskmiselt 73% graptoliitargilliidis ning 92%.

Mäetehniliselt tugevaim ja raskemini raimatav kiht on Kunda lademe lubjakivi, mille üheteljeline survetugevus on määratud kuni 126 MPa (10). Volhovi lademe savikam lubjakivi on teadaolevalt väiksema tugevusega. Hunnenbergi ja Billingeni lademe glaukoniitliivakivi survetugevusena on kirjanduses välja toodud 3 MPa (11), Varangu savil 4 MPa ning Pakerorti liivakivil 2 MPa. Tootsa oobuluskonglomeraadi survetugevus on 17 MPa. Võimaliku mäeeraldise põhjaks jääva Tsitre kihistu aleuroliidi survetugevus on 6 MPa. Kivimite tugevustunnused on välja toodud tabelina (Tabel 2).

Uuringuruumis esineb kaks põhjaveekihti, neist esimene Ordoviitsiumi lubjakivides ning teine Alam-Ordoviitsiumi ja Kambriumi liivakivides. Põhjaveekihte eraldab omavahel Alam-Ordoviitsiumi savidest ja kiltadest veepide. Puuraukude puurimise ajal määratud veetasemed jäid vahemikku 42,58...49,44 m abs. Madalaim on veetase puuraugus PA-604, mis asub kõige lähemal Toolse jõe, kõrgeim on veetase lõunapoolseimas puuraugus PA-456. Kuigi

## Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks

veetasemed on määratud pea 50 aastat tagasi võib eeldada, et üldine põhjaveevee liikumissuund uuringuruumis on Toolse jõe suunaline.

Tabel 2 Kivimite tugevustunnused Kiviküla uuringuruumis (11) (10).

Kiht	Kivim	Survetugevus (Mpa)			Tõmbetugevus (Mpa)
		Piki	Risti	Suhe (piki/risti)	
Kunda	lubjakivi		126		
Volhov	GL lubjakivi				
Hunnenberg	GL liivakivi	3			0.19
Billingen		3			0.19
Varangu	Aleuroliitsavi		3.6	0	0.35
Türisalu	Graptoliitargilliit		23		1.2
Pakerort	Liivakivi	0.205	2.12	0.10	0.089
Pakerort	Oobuluskonglomeraat	14	16.7	0.84	
Tsitre	Aleuroliit		5.5		



### 3 SUURE DIAMEETRIGA PUURAUĞUD

Suure diameetriga puuraukude puurimist prooviti tehnilise proovi võtmiseks kasutada Toolses 1960-1970. a. Kuid kuna puurauke ei suudetud kuivaks pumbata ei saadud sealt ka proovimaterjali (9). Tänapäeval on suurediameetriliste puuraukude rajamine valdavalt ehitusliku eesmärgiga. Erinevaid puurimisviise kasutatakse põhiliselt vaivundamentide rajamiseks (12). Geoloogilistel uuringutel on nimetatud tehnikat kasutatud näiteks Jordaania Attarat Um Ghudrani põlevkivimaardla uurimisel (Pilt 2) (13). Maailma juhtiva masinatootja Bauer tootekataloogis on masinaid maksimaalse puurdiameetriga 4700 mm. Puuragregaatidena kasutatakse tavaliselt ümber ehitatud roomikekskavaatoreid või – kraanasid.

#### 3.1 Puurauğu puurimine

Arvestades suure vee sissevooluga (9) Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihi on mõistlik seal valida puurimiseks täielikult toetatud meetod, kus esmalt puuritakse maapinda manteloru. Manteloru sees puuritakse välja kivimiproov. Tõste tehakse uuringu käigus 0,5 m tagant. Vajalikus kohas avatakse puurpea (Pilt 3) põhi ning pea tühjendatakse. Geoloogilise uuringu puhul on vajalik iga tõstega saadud proovimaterjali eraldi hoiustamine, mistõttu tuleks kasutada eraldi konteinereid. Ühe tõstega saadav proovikogus 1800 mm puurpeaga on umbes 4 m<sup>3</sup> mis sõltub palju konkreetse puurauğu tingimustest. Pärast puurpea tühjendamist puuritakse manteloru uue tõste võrra sügavamale ning jätkatakse puurauğu puurimist. Tühjendamist ning puurtarvikute liigutamist toetab vahetatavate tööorganitega frontaallaadur.

Proovi saamiseks sobivad puurpead on mõeldud 10-100 MPa survetugevusega kivimitele, mis rahuldab käesoleva projekti nõudeid vaid puurauğu alumises osas. Katendis esinevad üle 100 MPa survetugevusega lubjakivide puurimiseks on vajalik kasutada pöörlevate näriksatega kärni puurpead (Pilt 4). Üle 100 MPa survetugevusega kivimite puurimiseks sobiliku puuri maksimaalne välisläbimõõt on 1830 mm (14). Kuna puuragregaaadi puurpead on vahetatavad saab erinevaid kivimikihte puurida sama puurmasinaga puurpäid vahetades. Kui lubjakivides on puurauk läbitud vahetatakse puurpea ning alustatakse manteloru puurimisega pehmetesse kivimitesse. Välistamiseks võimalust, et manteloru paigaldamine valmis puuritud lubjakivi intervallis takerdub tuleks võtta manteloru diameeter astme võrra väikesem, kui on lubjakivis kasutatava puurpea diameeter, ehk 1650 mm. Vastava tehnoloogiaga puurmasinad on Eestis

olemas näiteks AS-1 Temiir, kuid nende kasutatav seadmestik lubab puurida kuni 450 mm diameetriga puurauke kuni 12 m sügavusele (15), mis käsitletava Kiviküla uuringuala puhul ei ole piisav. Lemminkäinen Eesti AS-i betoonrajatiste – ja geotehnikaosakond rajab puurvaiu diameetriga kuni 1500 mm (16) ka sügavamale kui 20 m. Kuna Eestis olemasoleva Lemminkäineni puurmasina BG 20 maksimaalne puurdiameeter on 1500 mm jääb proovi võtmiseks puurpea maksimaalse diameetriga 1350 mm.

Lähtuvalt Toolse maardla 3. Ploki keskmisest paksusest 3,4 m on ühest puuraugust saadava proovi kogus 4,3 m<sup>3</sup> ehk 9 t. 1000 ja 3000 t proovi saamiseks on vajalik vastavalt 111 ja 333 puurauku. Puurmasina jõudluse hindamiseks kasutatakse valemit (Valem 1) (17). Kuna valem on koostatud lähtuvalt Ameerika Ühendriikides kehtivale mõõtsüsteemile on vajalik parameetrite teisendamine. Kasutades valemis parameetreid lähtuvalt puurmasinast BG 20 H on jõud puurpeale (W, t) 21 tonni, pöörlemiskiirus (R, p/min) 60% maksimaalsest 20 p/min. Kivimite survetugevused (UCS, MPa) on vastavalt kivimitele 130 ja 20 MPa, samuti puurpea diameetrid (D, mm) 1500 ja 1350 mm.

$$P = (61 - 28 \log_{10}(0,145 \cdot UCS)) \cdot W \cdot R / 250D$$

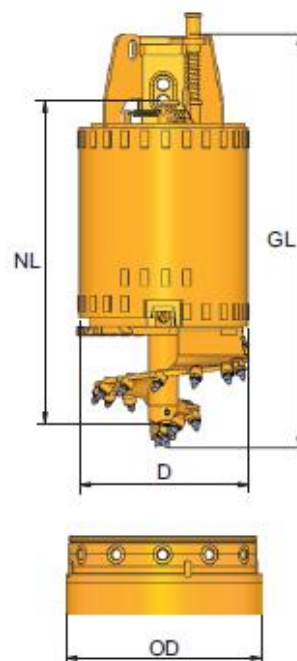
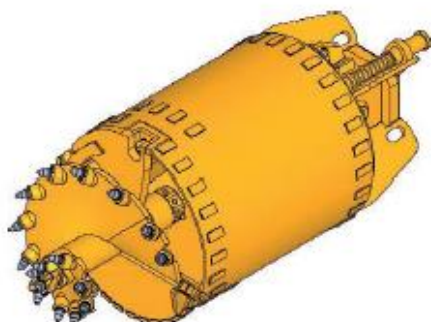
Valem 1 Puurmasina jõudluse hindamine (17)

Nimetatud parameetritega arvutades on puurmasina jõudlus lubjakivides 0,6 m/h ning 1,0 m/h graptoliitargilliidis ja liivakivides. 3 MPa survetugevusega vahekihtides on 1350 mm puurpeaga jõudlus 1,5 m/h. Ühe puuraugu puurimiseks Kiviküla uuringuruumi tingimustes kulub seega aega 24 tundi. Kuna Valem 1 arvestab ka puurmasina tugioperatsioonidele kuluvat aega võib saadud tulemuse lugeda masina tehniliseks tootlikuseks.



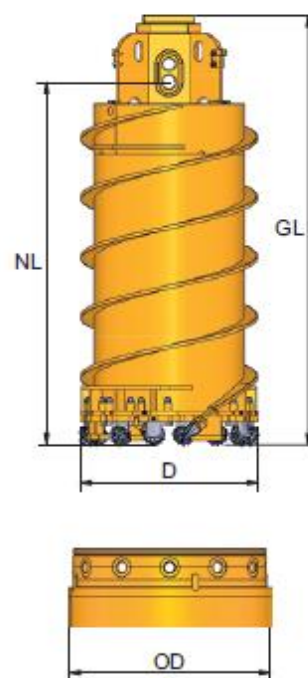
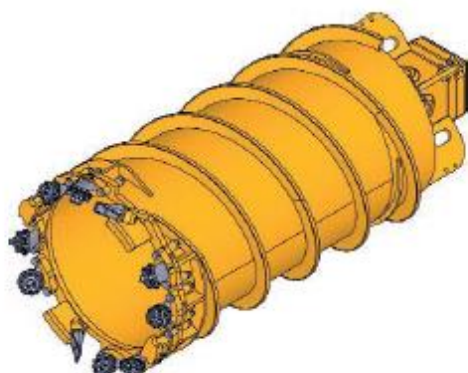
Pilt 2 Suure diameetriga puuraugu puurimine Jordaania (18)

KBF-P



Pilt 3 Südamikpuurpea (14)

KR-RM-HF



Pilt 4 Puurpea üle 100 MPa survetugevusega kivimitele (14)

### 3.2 Suure diameetriga puuraugu korrastamine

Kuna käesoleva töö kirjutamise jooksul (veebruar-mai 2017) ei ole Keskkonnaminister uut puuraukude likvideerimist käsitlevat määrust kehtestanud lähtutakse kuni 01.01.2017 kehtinud määrusest "Üldgeoloogilise uurimistööga, geoloogilise uuringuga ja kaevandamisega rikutud maa korrastamise kord" (19). Kuivõrd suure diameetriga puurauk sarnaneb mõtteliselt pigem kaevandile kui puuraugule, siis lähtutakse korrastamisel ka kaevanditele esitatavatest nõuetest.

Korrastamise esimeses etapis eemaldatakse puuraugust manteltorud, mida saab kasutada ka järgmiste puuraukude puurimiseks. Kui manteltorude eemaldamine ei ole võimalik lõigatakse toru ots maha vähemalt 0,5 m sügavuselt allpool maapinda ning tehakse vastav märke puuraukude likvideerimisakti. Vastavalt määrusele tuleb puuraugu vettandev osa täita puhta loodusliku inertse puistematerjaliga. Rajatava puurauguga avatakse kaks vett andvat intervalli – Ordoviitsiumi-Kambriumi ning Ordoviitsiumi. Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihi täidetakse puurauk puurimisel saadud liivaga. Kuna umbes pool Pakerorti lademe kivimitest võetakse tehnilise proovina kasutusse on vajalik puuraugu sulgemisel tuua liiva juurde. Kobestustegurit arvestamata on vajamineva liiva kogus 5 m<sup>3</sup>. Kuivõrd graptoliitargilliit kasutatakse ära tema rikastatavuse uurimiseks või maetakse keskkonnaohutult (6 Graptoliitargilliidi käitlemine) ei paigutata teda korrastamisel tagasi puurauku. Sarnaselt graptoliitarilliidile võib uuringute tarbeks ära kuluda ka glaukoniitliivakivi. Puursüdamiku maksimaalse kasutamise korral Kiviküla uuringuruumis on vajalik vettpidavas kihis asendada 3,6 m<sup>3</sup> savikaid kivimeid. Lubjakivi intervall kui kaljune kivim tuleb täita ehitusbetooniga, betooni kulu on 15 m<sup>3</sup>. Pinnakatte osas kasutatakse puurimisel eemaldatud materjali. Puuraugu täitmiseks ja uuringuruumi korrastamiseks kasutatakse puurimise käigus kasutatud frontaallaadurit. Puuraugu korrastamiseks ei kulu rohkem kui üks tööpäev.

## 4 KAEVAND

Kaevandi idee tuleneb otseselt Tigapõllu uuringukaevandi kontseptsioonist. Maa-ameti kaardirakenduselt mõõtes on kaevandist alles jäänud järve pindala 1300 m<sup>2</sup>. Teadaolevalt tehti võetud proovimaterjaliga rikastamiskatseid Venemaal ning toonasesse Nõukogude Eestisse katsetulemused ei jõudnud. Toolse fosforiidimaardla detailuuringu aruandes oleva pildi (Pilt 1) pealt on näha, et kaevand rajati vähemalt kahe mehaanilise ekskavaatoriga. Kasutati mitut astangut ning korduvat materjali ümberekskaveerimist. Ekskavaatorite kopamaht oli hinnanguliselt 1 m<sup>3</sup>. Pildilt on näha, et ülemisel astangul töötab draglain ning alumisel pöördkopp-ekskaator. Arvestades asjaolu, et trossekskavaatorite raimamisvõime ei ole kuigi hea võib eeldada, et raimamisel kasutati puur-lõhketöid. Kuigi draglaini raimamisvõime on madal on tegemist küllalt efektiivse laadimismasinaga (17). Käesoleva projekti raames on kaevandi eesmärk võtta tehniline proov suurusega 1000 t fosforiiti ning kaevand korrastada. Kaevand on ajutine ning kuna ta pärast tööde lõppu korrastatakse ei ole vajalik arvestada rajatiste pikaajalise säilimisega.

### 4.1.1 Kaevandi põhiparameetrid

Lõputöö autori lahendus oleks kasutada kaevandi põhjas raimamiseks kompakset ekskavaatorit, millele saab paigaldada ka hüdrovasara. Kaevisetõstmiseks maapinnale kasutatakse greiferkopaga trossekskavaatorit või kraanat. Kaevandi rajamisel lähtutakse kivimite nõlvanurkadest lubjakivis 86<sup>0</sup> ning pehmetes kivimites 45<sup>0</sup>. Kaevandi olulisim komponent on ramp, mööda mida fosforiidikihidini jõuda. Rambi kalle lubjakivi osas on valitud vastavalt roomikekskavaatorite maksimaalsele suutlikusele 35<sup>0</sup> ning pehmetes kivimites arvestades kivimite väiksemat püsivust 29<sup>0</sup>. Ehitusotstarbeliste maantesobilike kallurite maksimaalne koormaga läbitav nõlvus ei ole üle 30% (17<sup>0</sup>) ning seega ei ole võimalik neid käesoleva kaevandi puhul kasutada sügavamal kui lubjakivikihi lamam. Liigendkallurite maksimaalne nõlvus koormaga on 40% (22<sup>0</sup>), mis annab sügavuses 1 m võidu. Kaeviku põhjapindala on arvestatud 1000 tonni fosforiidi väljamiseks ehk 115 m<sup>2</sup>. Kuna esitatud parameetritega kaevandi puhul ei ole autotransport lõpuni võimalik on vajalik kasutada kaeviset transpordiks mingisugust tõsteseadet, kraanat. Kaevandi skeem on toodud joonisel (Graafiline lisa 3 – Proovikaevandi plaan) ning tekkivad materjalikogused on esitatud tabelis (Tabel 3).

Tabel 3 Kaevikust eemaldatavate kaeviste maht

Kaervis	Kogus, m <sup>3</sup>
Katend	4000
Lubjakivi	9300
Savi (sh. Galukoniit liivakivi)	2600
Graptoliitargilliit	660
Liivakivi	745
Fosforiit	635

#### 4.1.2 Kaevandi ettevalmistus ja pehme katendi eemaldamine

Kaevandi rajamiseks eemaldatakse katend maa-alalt pindalaga 3100 m<sup>2</sup>, mis katendi keskmist paksust arvestades tähendab 4000 m<sup>3</sup> pinnase teisaldamist. Katend ladustatakse hilisemaks kaevandi korrastamiseks paljandatud ala perimeetrile, mille pikkus on 220 m. Jättes perimeetrile 20 m vaba ruumi ligipääsuks on katendipuistangu jooksev pikkus 200 m. 4000 m<sup>3</sup> materjali mahutamiseks tuleks sellisel juhul kasutada puistangut, mille ristlõike pindala on 20 m<sup>2</sup>. Katendi eemaldamiseks kasutatakse tavaliselt kahte alternatiivset varianti - buldooseriga lükates või ekskavaatori ja kalluri koostöös.

Kasutades katendi eemaldusel buldooserina laialt levinud keskmise võimsusklassi masinat CAT D6N või sellega analoogset on võimalik tagada buldooserile suhteliselt head töötingimused. Kuna paljandatav ala on suurusega ligikaudu 60x60 m siis on ala keskelt servadesse lükates alati tagatud buldooseri optimaalne veokaugus mitte rohkem kui 45 m (20). Kuna paljandatav ala ei ole eriti suur ei ole praktiline kasutada katendi teisaldamiseks ekskavaatorit ja kallureid. Arvestades buldooseri veokauguseks keskmiselt 30 m on jõudlus

universaalteraga 230 m<sup>3</sup>/h. Rakendades operaatori oskusteguriks 0,90 ja efektiivseks tööajaks 50 min/h (ajategur 0,83) on buldooseri eeldatav jõudlus 170 m<sup>3</sup>/h. Sellise jõudlusega kulub paljandamisele 3 tööpäeva vahetuse kestusega 8 tundi, arvestades ka katendipuustangute viimistlemisega lisandub 1 tööpäev.

#### 4.1.3 Kaevandi avamine lubjakivides

Lubjakivide raimamine toimub Eestis kahel erineval meetodil – hüdraulilise vasaraga või puur – ja lõhketöödega. Vajalik eemaldatav lubjakivide maht on 9300m<sup>3</sup> (Tabel 3). Lõhketööde eeliseks on suurem efektiivsus, miinuseks kaasnev ühekordne vibratsioon ja müra (17). Hüdrovasar tekitab vibratsioon ja müra on keskmiselt madalam ning seetõttu ka karjääri naaberelanikele vastuvõetavam. Kallurite vajadus sõltub veotee pikkusest, töös eeldame, et katendi ladustamiseks saab kasutada Aru-Lõuna lubjakivikarjääri teenindusmaad, mis asub 25 min autosõidu kaugusel.

Valides hüdrovasaraks võimsaima hüdrovasara, mida keskmise suurusklassi ekskavaatoritele pakutakse on tootlikkus järgmine. Caterpillari andmetel (20) on hüdraulilise vasara H160E tootlikkus 500 m<sup>3</sup>/8h. Arvestades, et maailmas tähistab termin lubjakivi (*ingl Limestone*) ka kivimeid tihedusega 1760 kg/m<sup>3</sup> ja survetugevusega 12 MPa (21) võib arvata, et tootja käsiraamat hindab jõudlust oluliselt üle. Lähtudes tiheduse ja tugevustunnuste seosest võib eeldada, et reaalne jõudlus on pigem 300 m<sup>3</sup> ühes 8 tunnises vahetuses. Sellise jõudlusega kulub kogu lubjakivikatendi eemaldamiseks 31 vahetust, mis kahe vahetusega töötades teeb 16 päeva, arvestades juurde ka nädalavahetused kulub ainuüksi raimamisele 3 nädalat. Raimamisele lisandub laadimine. Ekskavaatori 324E jõudlus 1,5m<sup>3</sup> üldotstarbelise kopaga on 280 puistekuupmeetrit ning arvestades operaatori oskusteguriks 0,90 ja efektiivseks tööajaks 50 min/h (ajategur 0,83) on ekskavaatori laadimisjõudlus 210 m<sup>3</sup>/h. Arvestades lubjakivi kobestusteguriks 1,6 on laadimisjõudlus 130 massiivikuupmeetrit tunnis ehk kogu lubjakivi laadimiseks kulub 72 tundi ehk 9 vahetust ehk üks tööpäev. Kokku on ajakulu raimamisele ja laadimisele 4 tööpäeva. Kasutades katendi veoks poolhaagiskallureid kasti mahuga 25 m<sup>3</sup> ja arvestades kalluri tsükliajaks 1 tund on vajalik ekskavaatori jõudeaja minimeerimiseks kasutada 5 kallurit.

Lõhketööd on vajalik teha kahes tasandis – esimene 4,5 m ning teine 4,5 m. Tasanditeks jagamine on vajalik kuna 9 m lõhatud lasu koristamiseks oleks vajalik erikonfiguratsiooniga ekskavaator. Kuna uuringuruumi näol on tegemist varasemalt kaevandamata maaga on



vajalik uut tasandit alustades tekitada vaba pind. Vaba pinna tekitamiseks lõhatakse tulevase kaevandi keskel plokk mõõtmetega 5x15 m (3x7 laenguauku) mahuga 340 m<sup>3</sup>. Puurimismaht algmurde plokis on 95 m. Pealmaa eepuurmasinate tootlikkus tugevas kivimis on 30 m/h (17) ehk puurimiseks kulub 3,5 h. Kuna tegemist on algmurde rajamisega kasutatakse pumbatava emulsioonlõhkeaine erikuluks 1 kg/m<sup>3</sup> (22). Lööklaenguna kasutatakse igas puuraugus üks padrun padrundatud ANFOt. Initsieerimiseks kasutatakse mitteelektrilisi detonaatoreid ja initsieerimistorusid (*NONEL*, *Shocktube* või analoogne). Laenguaukude laadimiseks ja lõhkevõrgu ühendamiseks kulub 2 h. Pärast algmurde lõhkamist koristatakse ekskavaatoriga lõhatud lasu, milleks kulub 2,5 h. Kokku kulub algmurde lõhkamiseks ja koristamiseks üks töövahetus.

Kogu kaevandi ulatuses lõhatava lubjakivi pindala on 1120 m<sup>2</sup>, millest 75 m<sup>2</sup> lõhatakse algmurdena, seega jääb lõhkamiseks veel 1045 m<sup>2</sup>. Arvestades laenguaukude tiheduseks üks auk 6,25 m<sup>2</sup> kohta on vajalik lõhkaukude arv 167 ning lõhatava lubjakivi maht 4500 m<sup>3</sup>. Selle osa lõhkamiseks võiks teha 3 eraldi lõhkamist igäüks 1500 m<sup>3</sup>. Lõhkeaine erikulu kobetuslaengute puhul on 0,7 kg/m<sup>3</sup>. Ühe lõhkamise jaoks on vajalik sel juhul puurida 55 laenguauku, mille jaoks kulub üks kaheksatunnine vahetus. Lõhkeaukude puurimine toimub samal ajal eelmise lõhkamise koristamisega, mille tulemusel saab puurimise päevade arvelt kogu projekti kestust lühendada. Laenguaukude laadimisele ja lõhkevõrgu ühendamisele kulub 6 tundi. Jättes ekskavaatorile laadimiseks suurema ajavaru kulub kogu ploki kõikide operatsioonide peale 4 töövahetust. Kasutades koristamiseks kahe vahetusega tööpäeva on ajakulu 3 tööpäeva. Kokku kulub ühe astangu lõhkamiseks ja koristamiseks seega 8 tööpäeva ning kahe astangu peale 15 (alumise astangu algmurre puuritakse ülemise astangu koristamise ajal) ehk 3 tööädalat. Kallurite kasutamine on analoogne eelmisele alapeatükile.

### 4.1.4 Kaevise tõste

Kuna lubjakivide eemaldamisega on kaevandi sügavus jõudnud tasemele, kus autotransport enam kaeviku põhjast maapinnale võimalik ei ole on vajalik rakendada kaevise tõstet. Rajatava kaevandi sügavus lubjakivide lasumist fosforiidi lamamini on keskmiselt 22 m. Tavapärased pikendatud nooleulatusega (*long reach*) hüdraulilised pöördkoppekskavaatorid ulatuvad 10...13 m sügavusele, mis võimaldaks teoreetiliselt kasutada kahte ekskavaatorit koos ühe vaheastanguga. Kuna ekskavaatori baasmasina suutlikus jääb samaks ka pärast noole ja poomi pikendamist kahaneb märgatavalt ka ekskavaatori tõstevõime. Maapinnale tõstmise aspektist lähtudes oleks sobivaim teha vaheastang graptoliitargilliidi kihile, mis

jätaks tõstekõrguseks 12,7 m. Sellisel juhul on alumisel ekskavaatoril vajalik raimata 7 m sügavuselt – seistes Mäeküla kihistu lasumil või raimata 4,1 m sügavuselt ning tõsta 4,4 m kõrgusele. Kumbki variant ei ole hea, kuna nõuab keskmise suurusklassi ekskavaatori pidevat töötamist tööulatuse ekstreemumites. Teine põhjus graptoliitargilliidi peale vaheastangu tegemise vastu on tema tõenäoline keskkonnaoht, mistõttu tuleks tema paljandatuna püsimise aega hoida võimalikult lühidana. Teise astangu liivakivikihi peale viimine suurendab aga tõstekõrguse 14,1 meetrini, mis ei ole jõukohane ülemisel astangul töötavale ekskavaatorile.

Tõsteseadme valikul tuleb arvestada, et oluline on kaevandi servalt ära katta kogu kaevandi pindala ehk nooleulatus peaks olema suurem kui 20 m. Tõstevahendi jõudlus peaks olema võimalikult sarnane raimava ekskavaatori jõudlusega ehk 100 m<sup>3</sup>/h. Kuna tavapärased tõstekraanad ei ole projekteeritud pidevaks tsükliliseks (tõste-pidurdus-langetamine) tööks ning võivad laadimistöodel üle kuumeneda (23) on vajalik valida spetsiaalselt laadimisoperatsioonideks mõeldud kraana (*Duty cycle crane*). *Duty cycle crane* on reeglina roomikveermikul masin millel on hüdraulilise ekskavaatoriga sarnane 360 kraadi pöörlev pealisehitus. Pealisehitusele on paigaldatud vintsid tõmbejõuga 100...500 kN (24). Noolena kasutatakse draglainidelt tuttavat sõrestikkonstruksiooni, mille nurga muutmise saad muuta ka tõsteulatust. Vastavalt seadistusele on võimalik kraanat kasutada draglaine ekskavaatorina või kraanana. Käesolevas töös on vajalik kraana konfiguratsioon koos greiferkopaga. Eestis on rendiettevõtelt ScanBalt Crane OÜ (25) on võimalik rentida roomikkraana Sennebogen 2200 (26), millel on võimalik kasutada greiferkopa lahendust. Noole ulatus 26,1 m noole ja 30<sup>0</sup> noolenurga puhul on 24,1 m masina pöörlemisteljest, mis sobib käesoleva projekti vajadustega. Tõste võime nimetatud seadistuses on 5,8 t, mille sisse jääb ka kopa mass. 1,5 m<sup>3</sup> greiferkopa mass on 2,4 t, mis jätab tõstetava kaevise massiks 3,4 t (27). Arvestades tsükliajaks 45 sek on jõudlus 120 m<sup>3</sup>/h.



Pilt 5 Sennebogen 2200 kraanakonfiguratsioonis (25)

#### 4.1.5 Kaevandamine

Glaukoniitliivakivid ja savid raimatakse ekskavaatoriga ning laetakse greiferkopaga kalluritele, arvestades kivimite madalat survetugevust ei ole vajalik hüdrovasara või lõhketööde kasutamine. Kuna sama operatsioonina toimub nii raimamine kui ka laadimine on ekskavaatori tsüklaeg pikem ning jõudluseks on arvestuslikult 100 m<sup>3</sup>/h, mis on veidi väikesem kui greiferkopa jõudlus. 2600 m<sup>3</sup> kaevise eemaldamiseks kulub aega 26 h, mis on 3,25 vahetust. Võttes glaukoniitliivakivide ja savide eemaldamise projektkestuseks 4 vahetust jääb 6h varuaega. Glaukoniitliivakivist saab vajadusel võtta tehnoloogilise proovi mahuga 650 m<sup>3</sup>. Uurimimisalast huvi mitteomav savikas kaevis ladustatakse graptoliitargilliidi matmise (6 Graptoliitargilliidi käitlemine) tarbeks.

Graptoliitargilliidi raimamiseks on vajalik kasutada ekskavaatoril hüdraulilist vasarat (Pilt 6). Hoides erinevate masinate vajadust objektil võimalikult väiksena kasutatakse selleks puhuks sama hüdrovasarat, mida lubjakivide puhul – H160E. H160E jõudlus kiltade puhul on 420 m<sup>3</sup> vahetuses. 660 m<sup>3</sup> raimamiseks kulub seega 1,6 vahetust. Laadimiseks kulub 100 m<sup>3</sup>/h jõudluse korral 7 töötundi. Kokku kulub 2,5 vahetust. Graptoliitargilliidist võetakse vajaduse korral tehniline proov väärismetallide eraldamise katsetamiseks. Uuringutest üle jääv graptoliitargilliit tuleb matta (6 Graptoliitargilliidi käitlemine).

Fosforiidi ja teda katva liivakivikihi kaevandamine toimub sama ekskavaatori ja hüdrovasaraga. Liivakivides hüdrovasarat ei kasuta, kuid ekskavaatoriga raimamise jõudluseks ei arvesta üle 100 m<sup>3</sup>/h, mistõttu on ajakulu 8h. Hüdrovasara jõudlus fosforiidis on 340 m<sup>3</sup> vahetuses mistõttu kulub raimamiseks kaks vahetust. Ümberlaadimisele kulub 5 tundi.



Pilt 6 Graptoliitargilliidi raimamine Kunstimuseumi süvendis (28)

Kaevandi rajamise alternatiivide ajakulud on kokkuvõtvalt toodud välja tabelites (Tabel 4ja Tabel 5). Lõhketöid kasutav variant kestab katendi eemaldamisest fosforiidi proovi võtmiseni kokku 6 nädalat, lubjakivi raimamine vaid hüdrovasaraga lisab ühe nädala. Kuigi lubjakivi lõhketöödega eemaldamise variant annab kogu projekti kestuses nädalase võidu tähendab see ka veidi suuremat inimtöö aega lõhkajate näol.



Tabel 5 Kaevandi rajamine hüdrovasaraga

Nädal	Tehtavad tööd	Tööde maht	Ühik	Kasutatavad masinad	Kogus	Masina töötunnid	Vahetuste arv
1	Pehme katendi eemaldamine	4000	m3	Buldooser	1	32	4
2-5	Lubjakivi eemaldamine	9300	m3	Hüdrovasar	1	248	31
				Ekskavaator	1	72	9
6	Glaukonitiivakivi ja savi eemaldamine	2600	m3	Kallur	5	360	45
				Ekskavaator	1	26	4
				Greifer	1	26	4
				Kallur	5	115	15
				Hüdrovasar	1	13	2
6	Graptoliitargilliidi eemaldamine	660	m3	Ekskavaator	1	7	1
				Greifer	1	6	1
				Kallur	5	30	1
7	Liivakivi eemaldamine	745	m3	Ekskavaator	1	8	1
				Hüdrovasar	1	16	2
				Ekskavaator	1	5	1
				Greifer	1	5	1
7	Fosforiidi raimamine	635	m3	Kallur	5	25	1
							994

## 5 VÄIKE KATSEKARJÄÄR

Väikekarjääri idee eesmärk on fosforiidi toodang 5000 t ning et kaevise laadimine transpordivahendile toimub kaeviku põhjas. Kasutada väljamiseks hüdraulilist ekskavaatorit >35t (kasutatakse nt. Väo lubjakivikarjääris sama tugevusega lubjakivi raimamiseks) või lõhketöid. Transpordivariantidena on valikus liigendkallurid ning neljateljelised jääga raamiga kallurid. Jääga raamiga kallurite suurim eelis on nende lai levik ning võimalus kasutada neid ka avalikel teedel. Liigendkallurid on vähem levinud, kuid erinevates rendi- ja ehitusettevõtetes on neid leida. Liigendkalluri eeliseks on madalam erisurve maapinnale ( $1,4...3,1 \text{ kg/cm}^2$ ) ja seega parem läbivus. Kui kaevise transpordiks kasutada liigendkallureid oleks rambi vajalik kalle 10% ehk nõlvus 1:10. Liigendkallurid võimaldaksid ka kallet kuni 15%, kuid 10% kalde juures on vajadusel võimalik kasutada ka jääga raamiga mitmeteljelisi karjäärkallureid (17) (20). Kuna proovi võtmiseks ei ole vajalik tihedat liiklust võib rambi projekteerida ühe sõidureaga, sõidurea laius lähtuvalt liigendkallurite laiusest on 5,6 m. Kui proovimaterjali katsetulemused on positiivsed ja kaevandamine tundub perspektiivne on võimalik rajatud rampi laiendada mäetööde jätkamiseks. Manööverdamiseks on vajalik kaeviku laius vähemalt 17 m. 10 % kaldega rajatava rambi pikkus 20 m sügavusele on 200 m. Nõlvade kalded 2:1 lubjakivides ning 1:1,2 järgnevates kivimites. Pehme katendi maht 23 tuh  $\text{m}^3$ , lubjakivide maht 49,1 tuh  $\text{m}^3$ , savide 13,4 tuh  $\text{m}^3$ , graptoliitargilliidi 3,9 tuh  $\text{m}^3$ , katendina eemaldatava liivakivi maht 5,1 tuh  $\text{m}^3$  ja fosforiidi maht 2,4 tuh  $\text{m}^3$ . Katsekarjääri põhiparameetrid on toodud joonisel (Graafiline lisa 4 – Väikekarjääri plaan).

Katsekarjääri seinte laugema nõlvuse tõttu on katenditegur võrreldes katsekaevandiga oluliselt suurem. Katsekaevandi puhul oli ühe kuupmeetri fosforiidi kaevandamiseks vajalik eemaldada 7  $\text{m}^3$  lubjakivi, katsekarjääri puhul 47  $\text{m}^3$ .

### 5.1 Pehme katendi eemaldamine

Katsekarjääri rajamiseks eemaldatakse pehme katend alalt 70x250 meetrit, mis jätab järgnevate mäetööde tegemiseks puhvri minimaalselt 10 meetrit. Pinnasetööde maht pehme katendi eemaldamisel on 23 tuh  $\text{m}^3$ . Katend eemaldatakse buldooseriga Caterpillar D6N (29) või analoogsega. Lähtuvalt Caterpillari juhistest (20) on D6N jõudlus ideaaltingimustel 45 m



veotee (katendi eemaldamine toimub risti rajatava rambi suunda) ja universaaltera korral 200 massiivikuupmeetrit tunnis. Arvestades operaatori oskusteguriks 0,85 ja efektiivseks tööajaks 50 min/h (ajategur 0,83) on buldooseri eeldatav jõudlus 130 m<sup>3</sup>/h. Katendi eemaldamiseks kulub sellise jõudluse korral 177 töötundi, mis 40-tunnise tööädala korral võtab aega 5 nädalat.

Alternatiivne variant on kasutada buldooseri asemel hüdraulilist ekskavaatorit ja liigendkallureid. Ekskavaatori 324E jõudlus 1,5m<sup>3</sup> üldotstarbelise kopaga on 280 m<sup>3</sup>/h ning jättes operaatori oskuseid ja tööviljakust arvestavad tegurid samaks nagu buldooseri (0,85 ja 0,83) on ajakulu katendi laadimisel ekskavaatoriga 115 töötundi ehk 3 nädalat. Arvestades keskmiseks veokauguseks 400m ning kalluri keskmiseks kiiruseks 18 km/h (5m/s) on kalluri tsükliäeg 9 minutit. Sellest tulenevalt on vajalik ekskavaatori jõudeaja minimeerimiseks vajalik 3 kallurit. Puistangute planeerimiseks on vajalik ka buldooseri kasutamine katendi veoga samal ajal. Ekskavaatoriga paljandamine annab kahe nädalase ajavõidu, kuid kasutatavate masinate summaarne tööaeg on üle kolme korra suurem.

## 5.2 Kaljuse katendi eemaldamine

Sarnaselt proovikaevandi rajamisele on valikus kaks meetodit – hüdrovasar ja puur-lõhketööd. Varasemalt selgus, et lõhketöödega raimamine on praktiliselt sama arvu töötundidega 25% kiirem. Katsekarjääri rajamisel on eemaldatava lubjakivi maht 5 korda suurem katsekaevandi rajamisel eemaldatud lubjakivi mahust. Kõrvutades katendi mahtu 2015. a. Eesti Maavaravarude koondbilansiga selgub, et vajalik tootmismahut 49,1 tuhat m<sup>3</sup> on ligikaudu samas suurusjärgus Harku V (60 tuhat m<sup>3</sup>/a) ja Maardu (40 tuhat m<sup>3</sup>/a) lubjakivikarjääride aastase tootmismahuga. Mõlemas näitena toodud karjääris kasutatakse raimamiseks puur- ja lõhketöid. Eelnimetatud asjaolusid arvesse võttes kasutatakse ka käesolevas projektis lubjakivi raimamiseks lõhkamist. Sarnaselt katsekaevandiga tuleb ka siin teostada lõhkamine kahe astanguna, et tagada ekskavaatorile efektiivseim laadimine sobiva kõrgusega astangu pealt. Sobivaim astangu kõrgus on ligikaudu võrdne ekskavaatori noole pikkusega. Kuna kaevandatav maht on küllalt suur ja proovi saamine võiks toimuda võimalikult kiiresti peab kasutama suurema jõudlusega ekskavaatorit kui kaevandi rajamisel. Ekskavaatori asemel suurema laadimisjõudlusega frontaallaaduri kasutamine ei ole käesoleva projekti puhul võimalik, kuna rambi kitsad mõõtmed ei võimalda laaduril efektiivselt

manööverdada. Kasutades laadimiseks ekskavaatorit Cat 352F 2,7 m<sup>3</sup> kopaga ning arvestades tsükliajaks 30 sek on ekskavaatori jõudlus 325 m<sup>3</sup>/h. Arvestades juurde, et reaalne tööaeg on 55 min/h ja lubjakivi kobestustegurit 1,6 on projektjõudlus 185 m<sup>3</sup>/h. Kogu lõhatud lubjakivi laadimiseks kulub 266 töötundi. Kasutades transpordiks 25m<sup>3</sup> kastiga liigendkallureid on vajalik teha ekskavaatori töötunni jooksul 8 kalluritsükli. Kasutades selleks kahte kallurit teeb kumbki tunni aja jooksul 4 tsükli kestusega 15 min, millest 5 minutit kulub kasti laadimisele.

Puurtööde erimaht on sama mis kaevandi rajamisel ehk 0,18 m/m<sup>3</sup>. Puurtööde maht kogu lubjakivi lõhkamiseks on 8840 m. Eepuurmasina jõudluse 30 m/h korral kulub kõikide puuraukude puurimiseks 295 töötundi. Lõhkeaine keskmise erikulu korral 0,75 kg/m<sup>3</sup> on lõhkeaine kulu 36 800 kg. Arvestades lõhkeaukude laadimiskiiruse sarnaselt kaevandi rajamisega kulub 1964 laenguaugu laadimiseks kolmeliikmelisel meeskonnal kokku 214 töötundi. Kuna enim aega kulutav masin on puurmasin ja lõhkeaukude laadimise ja ühendamise ajal muid töid ei tehta on kogu lubjakivi eemaldamisele kuluv aeg 64 vahetust. Kasutades 40 h töönaalat kulub tööks 8 naalat.

### 5.3 Savide eemaldamine

Hunnenbergi ja Billingeni lademe glaukoniitliivakivid ja Varangu savid raimatakse ekskavaatoriga ning laetakse maanteekallureisse, mis transpordivad kaevise graptoliitargilliidi tulevasse matmispaika Aru-Lõuna karjääris. Savi maht on 13,4 tuh m<sup>3</sup>. Arvestades, et liivakivi ja savi kobestuvad vähe võib kobestusteguriks valida 1,1. Ekskavaatori 352F jõudlus on sellisel juhul 270 m<sup>3</sup>/h. Varasemalt kaevandi juures leitud tsükli aeg kallurite sõitmisel Aru-Lõuna karjääri on 1 h ning karjäärikallurite tavapärase kasti maht on 20 m<sup>3</sup>, mistõttu on vajalik ekskavaatori jõudluse tagamiseks kasutada 14 kallurit. Ajakulu tööde teostamiseks on 50 tundi.

## 5.4 Liivakivide ja kiltade eemaldamine

Graptoliitargilliit mahuga 3,9 tuh m<sup>3</sup> raimatakse hüdraulilise vasraga H180E, mis on võimsaim ekskavaatorile 352F sobiv. Hüdrovasara jõudlus kildas on 82 m<sup>3</sup>/h. Raimatud kaevis laetakse maanteekalluritele ning transporditakse matmispaika, kus paigutatakse leostumist minimeerivasse puistangusse (6 Graptoliitargilliidi käitlemine). Tööaeg raimamiseks ja laadimiseks on 70 h. Vajadusel on võimalik võtta tehnoloogiline proov graptoliitargilliidi metallitoormena sobivuse katsetamiseks. Lisaks on vajalik ekskavaatoriga eemaldada 5,1 tuh m<sup>3</sup> vähese P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sisaldusega liivakivi, milleks kulub ekskavaatoril jõudlusega 200 m<sup>3</sup>/h aega 26 h. Liivakivi ladustatakse hilisema korrastamise tarbeks uuringuruumi teenindusmaal. Transport toimub kahe 25 m<sup>3</sup> kastimahuga liigendkalluriga, mille tsükliäeg on 15 min.

## 5.5 Tootsa kihindi raimamine

Kaevandatava fosforiidi maht on 2,4 tuh m<sup>3</sup>. Fosforiidikiht raimatakse samuti hüdrovasaraga H180E, mille jõudlus on 70 m<sup>3</sup>/h, seega kulub raimamisele 35 töötundi. Transport toimub sarnaselt eelnevale kahe 25 m<sup>3</sup> kastimahuga liigendkalluriga uuringuruumi teenindusmaale. Teenindusmaal toimub kaevise esmane töötlemine ja pakendamine vastavalt analüüse teostava ettevõtte juhistele.

## 5.6 Ajakava nädalate kaupa

Kasutades eeltoodud tehnoloogiaid on võimalik väikekarjäär rajada 15 nädalaga kui kasutada pehme katendi eemaldamiseks ekskavaatorit ning lubjakivi raimamiseks puurlõhketöid, kokku kulub selleks 2907 masinatundi, mis on pea 400 h rohkem kui variandil, kus kasutatakse pehme katendi eemaldamiseks vaid buldooseri. Tööde kalenderplaan koos tehtavate tööde mahtude ning masinate ajakuluga on töödud tabelites (Tabel 6 ja Tabel 7).

## Väikekarjääri projekteerimine fosforiidi tehniliseks proovimiseks

Tabel 6 Väikekarjääri rajamine variant 1

Nädal	Tehtavad tööd	Tööde maht	Ühik	Kasutatavad vahendid	Kogus	Töötunnid	Vahetuste arv
1-5	Pehme katendi eemaldamine	23 000	m3	Buldooser	1	177	23
6-13	Lubjakivi eemaldamine	49 100	m3	Puurmasin	1	295	37
				Lõhkeaine (kg)	36960		
				Detonaatorid	1964		
				Lõhkaja	3	214	27
				Ekskavaator	1	266	34
				Kallur	2	532	34
13-14	Glaukoniitliivakivi ja savi eemaldamine	13 400	m3	Ekskavaator	1	50	7
				Kallur	14	700	7
14-15	Graptoliitargilliidi eemaldamine	3 900	m3	Hüdrovasar	1	48	6
				Ekskavaator	1	22	3
				Kallur	14	22	3
16	Liivakivi eemaldamine	5 100	m3	Ekskavaator	1	26	4
				Liigendkallur	2	52	8
17	Fosforiidi raimamine	2 400	m3	Ekskavaator	1	35	5
				Liigendkallur	2	70	5

2509

Tabel 7 Väikekarjääri rajamine variant 2

Nädal	Tehtavad tööd	Tööde maht	Ühik	Kasutatavad vahendid	Kogus	Töötunnid	Vahetuste arv
1-3	Pehme katendi eemaldamine	23000	m3	Buldooser	1	115	15
				Ekskavaator	1	115	15
				Kallur	3	345	45
4-11	Lubjakivi eemaldamine	49 100	m3	Puurmasin	1	295	37
				Lõhkeaine (kg)	36960		
				Detonaatorid	1964		
				Lõhkaja	3	214	27
				Ekskavaator	1	266	34
				Kallur	2	532	34
11-12	Glaukoniitliivakivi ja savi eemaldamine	13 400	m3	Ekskavaator	1	50	7
				Kallur	14	700	7
12-13	Graptoliitargilliidi eemaldamine	3 900	m3	Hüdrovasar	1	48	6
				Ekskavaator	1	22	3
				Kallur	14	22	3
14	Liivakivi eemaldamine	5 100	m3	Ekskavaator	1	26	4
				Liigendkallur	2	52	8
15	Fosforiidi raimamine	2 400	m3	Ekskavaator	1	35	5
				Liigendkallur	2	70	5

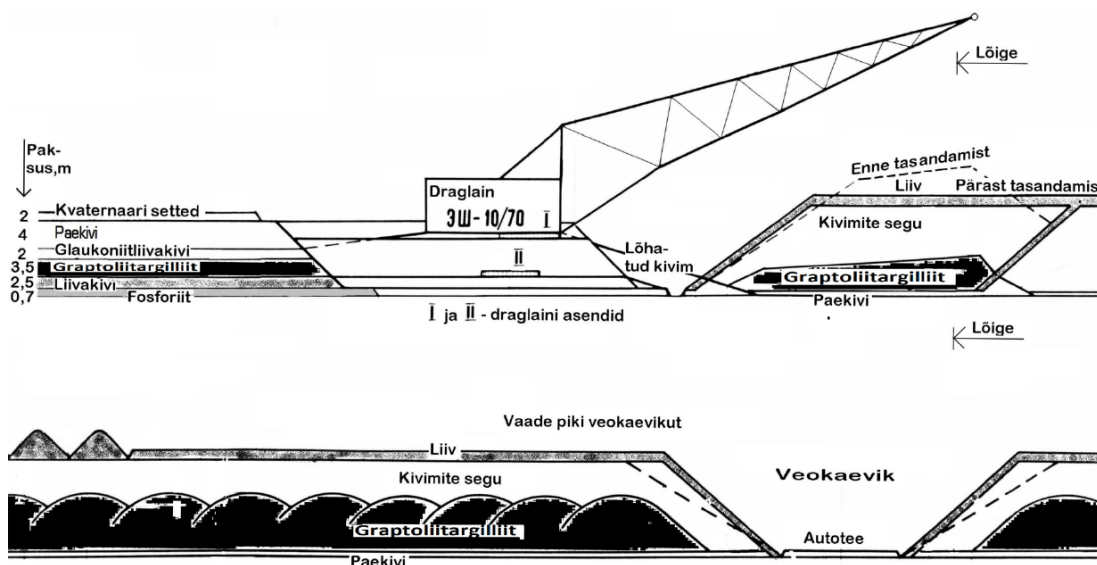
2907

## 6 GRAPTOLIITARGILLIIDI KÄITLEMINE

Graptoliitargilliit on käesoleva projekti raames katend ning kaasnev maavara, mida rambiga kaeviku variandi korral tekib 4000 m<sup>3</sup> ning kaeviku korral 660 m<sup>3</sup> olenemata valitud kaevandamismeetodist on graptoliitargilliidi käitlemise põhimõtted sarnased. Esimene ja eelistatuim variant on kogu graptoliitargilliidi kaubastamine teadus – ja rakendusuringuteks. Käesoleva projektiga saadud graptoliitargilliidi proov annaks võimaluse hinnata Joosep Makke Toolse fosforiidimaardlasse projekteeritava komplekskarjääri, Janno Lumiste Sillamäele projekteeritava graptoliitargilliidi karjääri või teiste analoogsete projektide perspektiivikust.

Kuna proovimiseks kasutatava graptoliitargilliidi kogus ei ole teada tuleb esialgu arvestada kogu kaevandatava mahu keskkonnohutu utiliseerimisega. Maardu fosforiidikarjääri opereerimise käigus sai selgeks, et puistangutesse ladustamisel puutub kobestatud kaevises olevale püriidile ligi õhuhapnik ning püriit süttib (30). Püriidi oksüdeerumisel eralduv kuumus initsieerib graptoliitargilliidi orgaanilise osa lagunemise, mille käigus eralduvad gaasid ja raskemetallid. Raskemetallide leostumine ja jõudmine põhjavette on põhiline keskkonnaoht, mis graptoliitargilliidi avamisega kaasneb. Alternatiivseks keskkonnaohuks peetakse püriidi oksüdeerumist pikema perioodi jooksul ilma süttimiseta, mille tulemusel tekib väävelhape (31).

Maardu karjääris töötati isesüttimise vältimiseks välja B. Naumovi poolt välja graptoliitargilliidi puistanguisse matmise tehnoloogia, mille puhul kasutati vaid koha peal tekkivaid kaasnevaid kaeviseid. Tehnoloogia nägi ette, et puistangu alumise kihi moodustavad lubjakivilahmakad, mille peal graptoliitargilliit ning puistang kaeti põhiosas liivaga (32) (33) (Joonis 1). Naumovi tehnoloogia võeti kasutusele alates 1980-ndate alguses ning graptoliitargilliidi termilise lagunemise intensiivsust suudeti vähendada, kuid mitte täielikult kõrvaldada. Ebaedu põhjustena on välja toodud meetodi ebamugavat teostatavust kasutusel olnud draglainidega EŠ-10/70 (33) ja asjaolu, et poorsed kattekivimid ja jämedafraktsiooniline lubjakivi ei takistanud põlemiseks vajaliku õhu liikumist puistangus (34). Hilisemalt on tulnud graptoliitargilliidi käitlemisega tegeleda Kunstimuuseumi (KUMU) süvendi rajamisel, mille käigus väljatud graptoliitargilliit maeti ohtliku jäätmena vanasse savikarjääri rajatud Kopli ehitusjäätmete prügilasse (33).



Joonis 1 Graptoliitargilliidi isesüstitmist vältiv puistangu selektiivse moodustamise tehnoloogia skeem (33)

Käesoleva projekti geograafilist paiknemist võiks matmispaigana kasutada Aru-Lõuna lubjakivikarjääri väljatöötatud osa. Arvestades, et katsekaevandi näol on tegemist pilootprojektiga täiemõõdulise tootmise rajamiseks oleks parim katsetada võimalikke lahendusi tulevaseks tootmiseks. Lähtudes Naumovi meetodi teadaolevatest puudustest ja Kiviküla teadaolevatest võimalustest võiks matmine toimuda järgnevalt. Puistangu alus ehitatakse kaeviku avamisel eemaldatava Volhovi lademe glaukoniitlubjakivi purustamisel saadavast killustikust. Purustamist võib läbi viia Killustikalus rajatakse 2 m paksusena ja 40 cm kihtidena killustiku fraktsioonist 0-32 mm, kuid kiilumiseks kasutatakse katendis olevat Latorpi lademe glaukoniitliivakivi ning Kunda lademe lubjakivist killustiku tootmisel tekkinud sõelmeid (fraktsioon 0-4 mm, pækiviliiv). Tihendamiseks kasutatakse silevaltsvibrorulli ning tihendatakse tihendustegurini 0,98-1,0 mis toob kaasa pinnase filtreerivate omaduste kadumise (35). Killustikalusele paigutatakse graptoliitargilliit, mis lõhede vähendamiseks tihendatakse puistangu planeerimisel kasutatava buldooseriga. Puistangu sulgemiseks kasutatakse kaeviku rajamisel katendina üle jäävat Varangu lademe aleuriitsavi, mida tekib uuringualal mahuliselt 1,8 korda rohkem, kui graptoliitargilliiti. Savikiht tihendatakse samuti buldooseriga. Alternatiivse variandina saab kasutada Kunda linna ja mere vahele jääva Mereäärse savikarjääri (KMIN-065) (3) savi. Tegemist on Lontova lademe savidega, mida AS Kunda Nordic Tsement kaevandab tsemendi tootmiseks ning mis teadaolevalt sobivad graptoliitargilliidi matmiseks (33). Puistangu rajamisel on lubjakivikillustiku (sh. sõelmed) kulu  $60 \text{ m}^3/\text{m}$  ja savi kulu  $40 \text{ m}^3/\text{m}$  ning maetakse  $30 \text{ m}^3$

graptoliitargilliiti ühe puistangu jooksvameetri kohta. 4000 m<sup>3</sup> graptoliitargilliidi matmiseks kulub seega 8000 m<sup>3</sup> lubjakivikillustikku ning 5300 m<sup>3</sup> savi.

## 7 HÜDROGEOLOOGIA JA VEEKÕRVALDUS

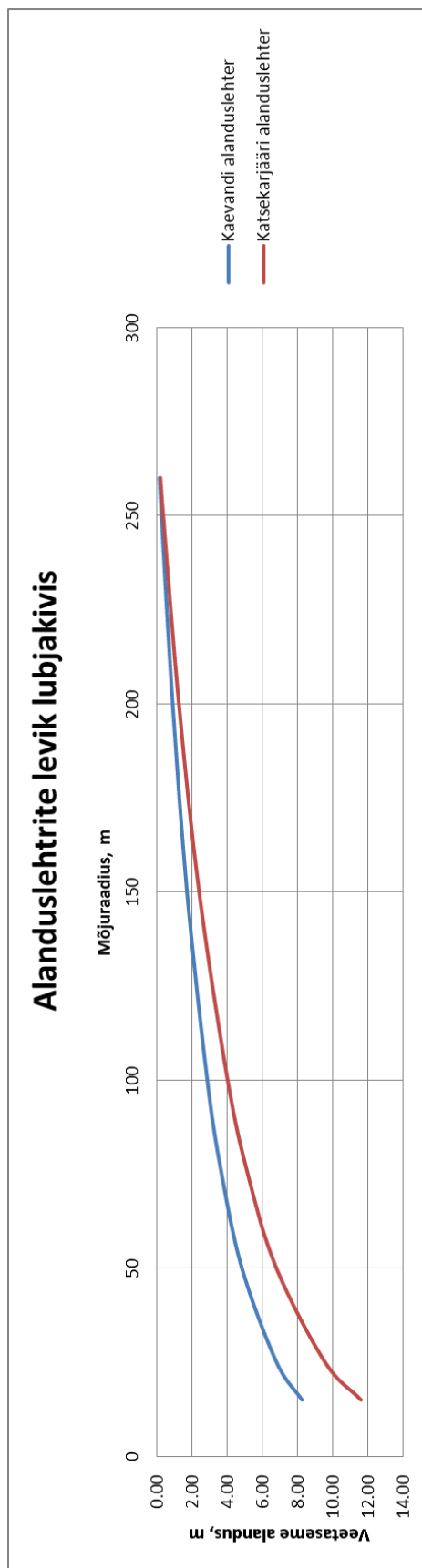
Hüdrogeoloogia on kaevandamisprojektide juures üks suuremat avalikku poleemikat põhjustav teema (näiteks (36)). Kaevandi ja karjääri rajamise osas on veekõrvaldus oluline kogu projekti teostatavuse hindamiseks. Kiviküla uuringukaevandi või karjääri rajamisel avatakse kaks veekihti. Esimene veekiht asub Ordoviitsiumi lubjakivides ning teine Ordoviitsiumi-Kambriumi veekiht, mis jääb Türisalu kihistu graptoliitargilliidi ja Lontova kihistu savide vahele. Veekihid on üksteisest eraldatud veepidemega. Pumpamise tagajärjel tekib kaevandi ümbruses veetaseme alanemine ning selle levimisena tekib ümbruskonna kivimitesse alanduslehter. Suure diameetriga puuraugu rajamisel vett välja ei pumbata ning alanduslehtrit ei teki. Käesolevas töös arvutatakse sisse voolavad veehulgad ja alanduslehtri parameetrid Botšarevi valemitega (37). Arvutustulemused näitavad suurimat võimalikku sissevoolu ja veetaseme alanemist, mis tekib projekti lõpuosas.

### 7.1 Sissevool ja alanduslehter

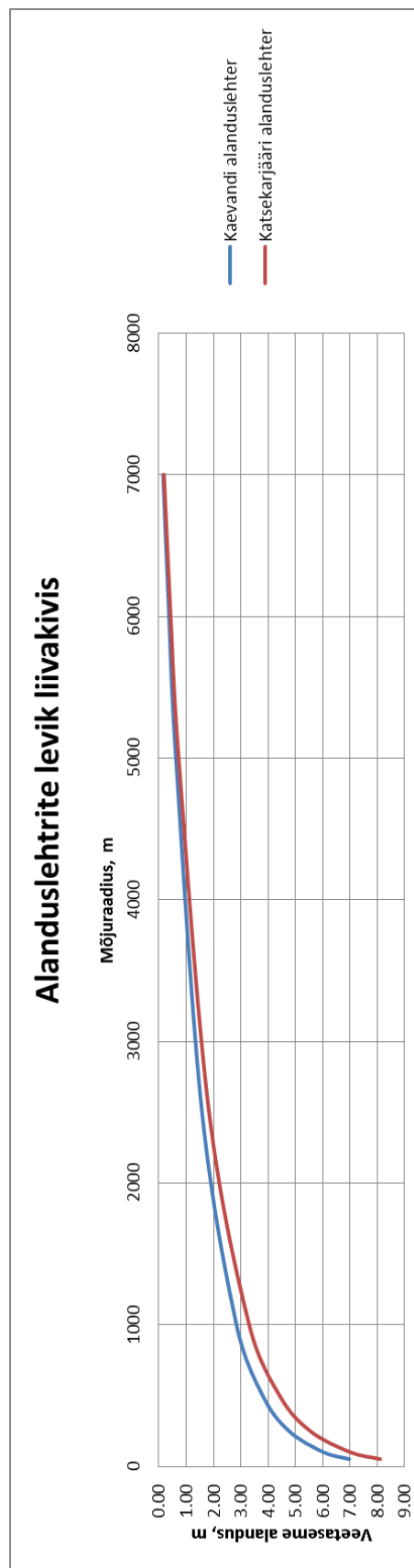
Kaevandisse või karjääri sissevoolavad veehulgad võib tinglikult jagada neljaks. Esimene veehulk on Kunda ja Volhovi lubjakividest läbi kaevandi seinaga sisse voolav vesi. Teine veehulk on sademevesi, mis sajab maha kaevandi kohal ja kaevandi tekitatud alanduslehtri alal. Kolmas veehulk, mis hakkab kaevandisse voolama on Pakerorti lademe liivakivides külgsseinast kaevandisse voolav veehulk. Arvutuseks valitud parameetrid on järgnevad. Ordoviitsiumi veekihi paksus 9 m, millest kuivendatakse kogu ulatuses. Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihi paksus 25 m, millest kuivendatakse 7 m. Lubjakivide filtratsioonimooduliks arvestatakse 1 m/ööp ning kambriumi veekompleksis 3 m/ööp (38).

Botšarevi valemitega arvutades on vee sissevool kaevandisse kõikidest kihtidest 667 m<sup>3</sup>/ööp ning katsekarjääri 818 m<sup>3</sup>/ööp. Lubjakivides ei ole alanduslehter 250 m kaugusel karjääri keskpunktist üle 20 cm. Liivakivides ei alane veetase üle 20 cm 7 km raadiuses, meetrine veetaseme alandus tekib 4 km raadiuses. Arvutuslikud alanduslehtrite kujud on toodud graafikutel (Joonis 3 ja Joonis 2).





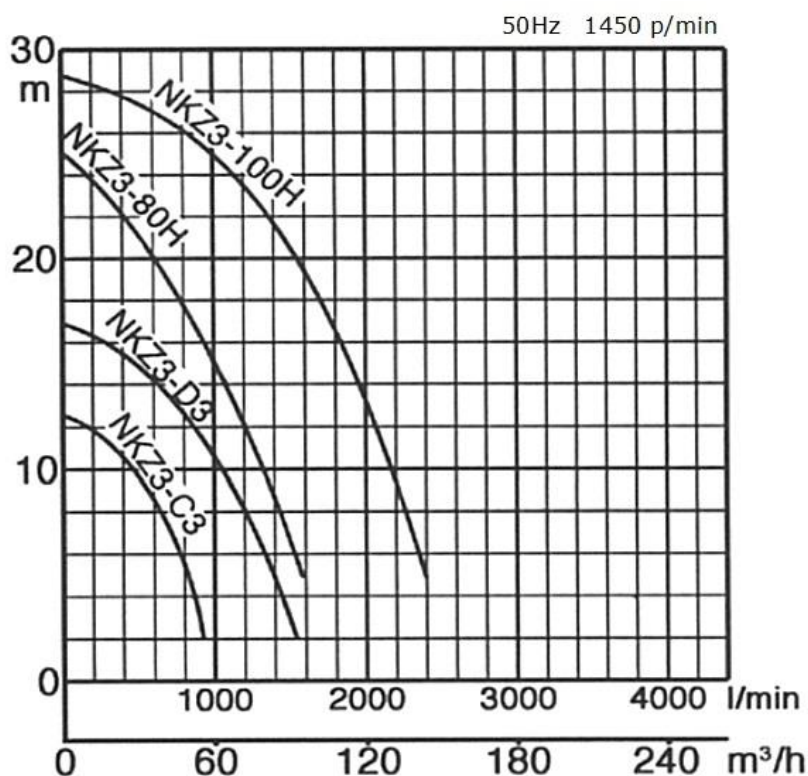
Joonis 3 Veetaseme alanduslehtrid lubjakivis



Joonis 2 Alanduslehtrite levik liivakivis

## 7.2 Veekõrvaldus

Veekõrvalduse dimensioneerimise aluseks on eelmises peatükis leitud veehulgad  $667 \text{ m}^3/\ddot{o}öp$  ja  $818 \text{ m}^3/\ddot{o}öp$  ehk 467 ja 567 l/min. Lisaks tuleb arvestada ka pumpade tõstekõrgusega, milleks on maksimaalselt 22 m. Veekõrvalduseks sobib näiteks Jaapani firma Tsurumi segistiga tühjendusump NKZ3-100H (39), mis 500 l/min tootlikuse juures tõstekõrguse 27 m. Veekõrvalduse rusikareegli kohaselt on vajalik tagada kolmekordne pumpamisvõimsus Teades, et arvutuse aluseks olevad veekogused on maksimaalsed võiks valida ka pumba NKZ3-80H (Q 200 l/min, H 24 m) ning hoida reservis 2 samasugust pumba veel, kuid kuna 24 m tõstekõrgus on selle pumba tööpiirkonna ekstreemum ei ole see optimaalne valik. Pump paigaldatakse Kaevandi puhul vastava tööetapi madalaimasse punkti. Katsekarjääri lahenduse korral paigaldatakse pump rambi alumise otsa juurde. Vesi juhitakse kaevandi põhjast settebasseini torustikuga ning sealt edasi kraavi mööda Toolse jõkke.

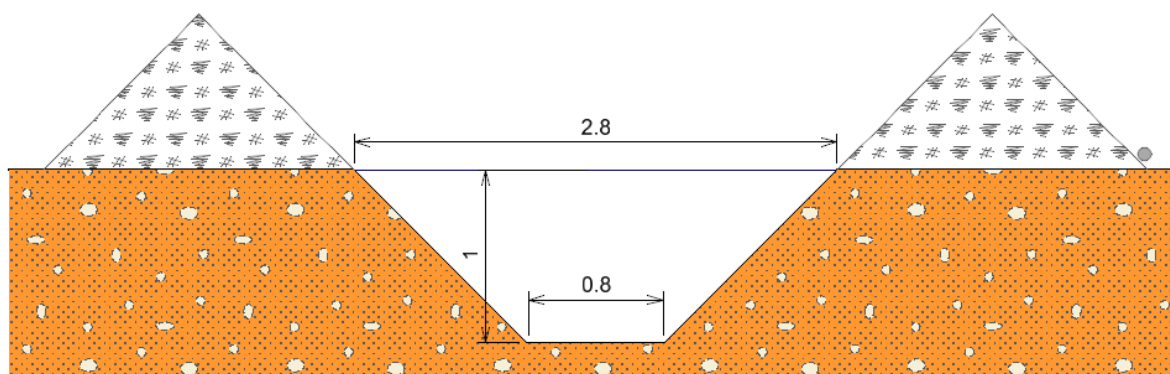


Joonis 4 NKZ3 seeria pumpade Q-H kõverad (39)

### 7.3 Settebassein

Rajatavatest kaeveõõntest väljapumbatavas vees on kõrgendatud kontsentratsioon heljumi, mida looduslikku veekogusse juhtida ei tohi. Heljumi setitamiseks on vajalik tagada väljavoolus voolukiirus mitte enam kui 1 cm/sek ehk 0,6 m/min ning, et läbivoolu aeg ei oleks väiksem kui 1h. Voolukiiruse alandamiseks ja heljumi setitamiseks on levinud variant settebasseinide kasutamine, kasutatakse ka kraavide laiendusi või kraavis vee voolukiiruse alandamist. Settebasseini rajamisel tuleb tagada ka settesüvise maht vähemalt 25 m<sup>3</sup> (40). Settebasseini rajamise vajadus puudub Aru-Lõuna karjääri rajatavatel variantidel, kuna seal on olemas töötava karjääri veekõrvaldussüsteem.

Katsekarjääri veekoguse (818 m<sup>3</sup>/ööp) puhul nõutud voolukiiruse tagamiseks on vajalik ristlõike pindala vähemalt 1 m<sup>2</sup>. Tunniajase läbivooluaja tagamiseks peab settebasseini maht olema vähemalt 34 m<sup>3</sup>, lisades nõutud settesüvise on vajalik maht 59 m<sup>3</sup>. Võttes settebasseini pikkuseks 34 m peab ristlõike pindala olema 1,8 m, lõike täpsemad mõõtmed on toodud joonisel (Pilt 7).



Pilt 7 Settebasseini ristlõige

Kaevandi veekoguse (667 m<sup>3</sup>/ööp) puhul nõutud voolukiiruse tagamiseks on vajalik ristlõike pindala vähemalt 0,8 m<sup>2</sup>. Tunniajase läbivooluaja tagamiseks peab settebasseini maht olema vähemalt 35 m<sup>3</sup>. Tulenevalt sarnastest parameetritest võib kaevandi veeärastuse korral kasutada katsekarjääri jaoks sobivat settebasseini.

## 8 KORRASTAMINE

Kuna käesoleva töö kirjutamise jooksul (veebuar-mai 2017) ei ole Keskkonnaminister uut puuraukude likvideerimist käsitlevat määrust kehtestanud lähtutakse kuni 01.01.2017 kehtinud määrusest "Üldgeoloogilise uurimistööga, geoloogilise uuringuga ja kaevandamisega rikutud maa korrastamise kord" (19).

Kaevandi ja proovikarjääri korrastamata jätmisel täituvad nad veega mistõttu oleks lihtsaim variant korrastada mõlemad uuringualad sarnaselt Tigapõllu kaevandiga (Pilt 1) veekoguks. Uuringuprojektide läbiviimise kvaliteet ning keskkonnanahoolde tase võib osutuda määravaks kohaliku elanikkonna toetuse osas edaspidise tegevuse osas. Kuna Lääne-Virumaal on sügavalt juurdunud arusaam, et fosforiit ja graptoliitargilliit on võimelised põhjustama kõiki tuntud ja seni tundmata tervisehädasid (41). Seetõttu on ainus variant kõik uuringu käigus rajatud kaeveõõned sulgeda ning taastada võimalikult hästi kaevandamise eelne olukord.

Parim lahendus korrastamiseks oleks sama materjali maapõue tagasi paigutamine, mis seal varasemalt oli. Kuna käesoleva projekti eesmärk on proovimaterjali võtmine, siis kogu kaevise kogust korrastamiseks pole. Kaevandi rajamisel on eemaldatava pinnase maht 14 tuh m<sup>3</sup>. Arvestame, et fosforiit kasutatakse proovimiseks täies ulatuses (635 m<sup>3</sup>) ja graptoliitargilliit pooles osas (330 m<sup>3</sup>) ning teine pool maetakse. Graptoliitargilliidi puistangu moodustamiseks kulub ära 660 m<sup>3</sup> lubjakivi ning 440 m<sup>3</sup> savi, seega jääb korrastamiseks 11,5 tuh m<sup>3</sup> erinevaid kaeviseid. Esmalt paigutatakse tagasi liivakivide raimamisel tekkinud liiv (745 m<sup>3</sup>), mis täidab fosforiidikihi vaid osaliselt. Fosforiidikihi ja liivakivikihi täitmiseks graptoliitargilliidini on vajalik veel 635 m<sup>3</sup> lubjakivikillustikku. Veepideme taastamiseks pannakse järgmisena tagasi savid mahus 2 tuh m<sup>3</sup> ning nende peale kogu allesjäänud lubjakivi. Lubjakivi tasandatakse ja planeeritakse buldooseriaga. Seejärel tasandatakse eemaldatud pehme katend. Kõige peal taastatakse mullakiht kaevandamiseelses paksuses ning tasandatakse. Bioloogiline korrastamine tehakse vastavalt maaomaniku soovile kas metsa – või põllumaaks. Tehnilise korrastamise käigus kasutatakse sama masinaparki, mida kaevandi rajamisel.

Väikekarjääri puhul arvestatakse hilisema kaevanduse rajamisega ning korrastamist ette ei nähta. Väikekerjääri rambi laiendamisel on see kasutatav täiemahulise tootmise

teenindamiseks. Vajadusel on karjääri korrastamise meetodika analoogne proovikaevandi korrastamisega.

## **9 MAJANDUSOSA**

Projekti maksumuse hindamisel kasutatakse kulupõhist meetodit, lõpptulemusena antakse eelhindang projekti võimaliku maksumuse kohta. Kuna geoloogilise ning tehnilise uuringu eesmärk on koguda võimalikult palju kvaliteetset informatsiooni ei ole selle magistritöö eesmärk hinnata välja pakutud lahenduste kasumlikkust.

### **9.1 Suure diameetriga puuraugu maksumus**

Suure diameetriga puuraugu puurimisele kuluv aeg on 24h (3.1 Puuraugu puurimine). Puurmasina rendi hind koos operaatoriga ning koos käibemaksuga on 135€/h (15). Puurmasina kütusekuluks võib rusikareeglit rakendades eeldada 105 kg/h. Frontaallaadurit on võimalik rentida ilma operaatorita 1-2 päevaseks perioodiks hinnaga 200€ (42). Operaatori brutotunnitasu lähtuvalt Lääne-Virumaa keskmisest palgast on 6 €/h. Mõlema masina jaoks on vajalik treileril transport Tallinnast. Frontaallaaduri veoks sobiliku treileri kilomeetri hind on 1,2 € millele lisandub käibemaks. Puurmasin transporditakse objektile osadena kahe treileriga kilomeetri hinnaga 1,6 € millele lisandub käibemaks. Objektile on vajalik ka geoloog, kelle tunnitasu on 9 €/h ning assistenti tunnitasuga 6 €/h. Esitatud parameetrite korral on suure diameetriga puuraugu maksumus 15 000€. Fosforiiditonna maksumus suure diameetriga puuraugu meetodil on 1667 €.

### **9.2 Proovikaevandi maksumus**

Proovikaevandi rajamisel on kiireim variant kasutada lubjakivi raimamiseks lõhketöid. Lõhkeaine kilohind on 1 € ning detonaatori maksumus 0,5 €/tk. Lõhkajate bruto tunnipalk on 7 €. Masinate tunnihind koos operaatori ja kütusega on buldooseril, puurmasinal ning ekskavaatoril 63 €, kallurite tunnihind on 34 € ning greiferlaaduril 100 € (15) (43) (44). Selliste hindadega arvestades on kaevandi rajamiseks tehtavad kulutused 44 000 €. Sellele lisandub veel 1100 € veekõrvalduse rajamise ja käitamise maksumus. Fosforiiditonna maksumus enne korrastamist on seega 45 €.

### 9.3 Väikekarjääri maksumus

Väikekarjääri rajamisel kasutatakse lubjakivi raimamiseks lõhketöid. Lõhkeaine kilohind on 1 € ning detonaatori maksumus 0,5 €/tk. Lõhkajate bruto tunnipalk on 7 €. Masinate tunnihind koos operaatoriga on buldooseril, puurmasinal ning ekskavaatoril 63 €, kallurite tunnihind on 34 € ning liigendkalluritel 45 €. Lisaks on objektile vaja töödejuhatajat-geoloogi, kelle tunnitasu on 9€. Selliseid hindu ning masinate summaarset tööaega arvestades on on karjääri rajamiseks tehtavad kulutused 156 000 €. Veekõrvaldus lisab 2100 €. Fosforiiditonna maksumuseks tuleb kokku 32 €/t.

## KOKKUVÕTE

Vaadeldes välja toodud variante on mäetehniliselt otstarbekaim asukoht proovikaevandile Kiviküla uuringuruum, kus maardla tootlus on suurem kui arenenuma teenindusmaaga Aru-Lõuna lubjakivikarjääri territoorium. Vaadeldes Kivikülasse kaevandi ja proovikarjääri tegemiseks tehtavate kulutuste jaotust on näha tugev transporditööde domineerimine, mis annab eelise Aru-Lõuna karjäärile. Reaalne uuringuruumi rajamisel selgub asukoht ilmselt sobiva maaüksuse leidmisel ning erinevate kooskõlastuste hankimisel.

Töös pakuti välja kolm erinevat lahendust tehniliste proovide võtmiseks. Suure diameetriga puuraugu puurimine, millega on võimalik saada 9 tonni fosforiidiproovi, katsekaevand proovikogusega 1000 t ning väikekarjäär mahuga 5000 t. Variantide teostamiseks kasutatavad meetodid on Eestis kohapeal olemas ning valitud masinaid on võimalik rentida. Tehniliste lahenduste osas on näha mäetööstuse rusikareegel, et mida suurem on tootmine, seda odavam on tonnihind. Odavaima tonnihinna (32 €) saavutab 5000 t toodanguga väikekarjäär, mille rajamiseks kulub 15 nädalat. Kalleim (1667 €/t) variant on suure diameetriga puuraugu puurimine, kuid sel juhul saadakse 9 t fosforiidiproov kätte kahe päevaga. 1000 t toodanguga katsekaevand oli kõikide näitajate poolest keskmine – ajaliselt kulub selleks 6-7 nädalat ning tonnihind on 45€.

Graptoliitargilliidi matmise probleem on käesolevas töös lahendatud kunagise Maardu karjääri matmistehnoloogiat modifitseerides ning peaks tagama graptoliitargilliidi keskkonnaohutu utiliseerimise. Matmisel pööratakse rõhku sellele, et kõik kasutatavad materjalid oleks projekti käigus samast kaeveõõnest hangitavad.

Hüdrogeoloogilised arvutused näitasid, et vee sissevool kaevandisse ei ole ületamatult suur et seda ei oleks võimalik laiatarbe pumpadega kõrvaldada.

Töö edasiarenduse korral peaks täpselt defineerima uuringu eesmärgi ning uuringuruumi asukoha. Täpsustatud tingimuste korral tuleks leida reaalsed töömahud konkreetses asukohas ning arvestada neid hinnakalkulatsioonide tegemisel ning hinnapakumiste küsimisel.



## KASUTATUD MATERJALID

1. **Euroopa Komisjon.** Kriitiliste toormete nimistu. *Critical Raw Materials*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 4. Aprill 2017. a.] [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_et](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_et).
2. Eestifosforiit. [Võrgumaterjal] <http://eestifosforiit.ee/>.
3. **Keskkonnaregister.** *Keskkonnaregistri maardlate nimistu*. [Maa-ameti X-GIS kaardirakendus]
4. **Keskkonnaminister.** Riigiteataja. *Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord*. [Võrgumaterjal] 10. Juuni 2005. a. <https://www.riigiteataja.ee/akt/905848>.
5. **JDC Phosphate.** Improved Hard process description. [Võrgumaterjal] <http://jdcphosphate.com/a-step-in-a-better-direction/improved-hard-process-description/>.
6. **Ernst & Young Baltic AS.** *Fosforiidi kaevandamine ja väetiste tootmine: majanduslike mõjude analüüs*. [Võrgumaterjal] <http://eestifosforiit.ee/cms-data/upload/uuringud/fosforiit-majanduslikud-mojud-2013-01-07.pdf>.
7. **Stoumov J, Manusevitsh L, Budelkov N, Popov O.** *Aruanne geoloogilistest uuringutöödest ja varude arvutamisest seisuga 1/1 1957.a. Aseri fosforiidimaardlas 1954.-1956.a.* Peterburi : Geoloogiafond, 1956. EGF732.
8. **Reinsalu, E.** Fosforiidijooks. *Eesti Geoloogiakeskuse XXIV Aprillikonverents Maapõuekasutus ja keskkonnahoid*. [Võrgumaterjal] 1. Aprill 2016. a. [http://www.egk.ee/wp-content/uploads/2016/03/Aprill2016\\_teesidA4\\_\\_veeb.pdf](http://www.egk.ee/wp-content/uploads/2016/03/Aprill2016_teesidA4__veeb.pdf).
9. **Raudsep R, Sinisalu R.** *Aruanne Toolse fosforiidimaardla detailuuringust 1969.-1971.a.* Keila : Geoloogiafond, 1972. EGF3200.
10. **R. Sinisalu, T. All, O. Gromov, L. Savitski, V. Savva.** *Kunda lubjakivimaardla Toolse-Lääne uuringuruumi geoloogilise uuringu aruanne (varu seisuga 01.06.2009.a).* s.l. : Eesti Geoloogiakeskus OÜ, 2009. EGF8115.

11. **Rainsalu, Enno, et al., et al.** *Nõrkade kihiliste kivimite tugevusomadused*. Tallinn : TTÜ Mäeinstituut, 2014.
12. **BAUER-Pileco Inc.** BAUER Pileco. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. Aprill 2017. a.] <http://www.bauerpileco.com/en/>.
13. **Enefit.** Jordaania projekt. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. Aprill 2017. a.] <https://www.enefit.com/et/jordan>.
14. **BAUER Maschinen GmbH.** Drilling tools and casings. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 20. Märts 2017. a.] [http://www.bauerpileco.com/en/products/bauer\\_bg/rotary\\_drilling\\_tools/](http://www.bauerpileco.com/en/products/bauer_bg/rotary_drilling_tools/).
15. **AS Temiir.** AS Temiir. *Teenused*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. Aprill 2017. a.] <http://temiir.ee/teenused/>.
16. **Lemminkäinen Eesti AS.** Lemminkäinen Eesti. *Taristuehitus*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 17. Aprill 2017. a.] <http://www.lemminkainen.ee/taristu/geotehnilised-tood/puurvaiad-teleskoopse-kelliga/>.
17. **Darling, Peter.** *SME Mining engineering handbook*. s.l. : Society for Mining, Metallurgy, and Exploring, Inc., 2011. ISBN 978-0-87335-264-2.
18. **Enefit.** Videos and Photos. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 2. Mai 2017. a.] [https://www.enefit.com/-/img/6983966/largeimg/enefit\\_jordan6\\_big.jpg](https://www.enefit.com/-/img/6983966/largeimg/enefit_jordan6_big.jpg).
19. **Keskkonnaminister.** Riigiteataja. *Üldgeoloogilise uurimistöoga, geoloogilise uuringuga ja kaevandamisega rikutud maa korrastamise kord*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 9. Mai 2017. a.] <https://www.riigiteataja.ee/akt/905828>.
20. **Caterpillar Inc.** *Caterpillar performance handbook*. Peoria, Illinois : s.n., 2016.
21. **Natural Stone Council.** Material fact sheet Limestone. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 11. Aprill 2017. a.] <http://www.genuinestone.com/content/file/Material%20Fact%20Sheets/LIMESTONEMATERIALFACTSHEET022509.pdf>.

22. **Tomberg, Tõnu.** *Lõhketööd*. Tallinn : TTÜ Mäeinstituut, 1998.
23. Duty cycle cranes for clamshell operations. [Võrgumaterjal] PLM Cranes USA. [Tsiteeritud: 27. Aprill 2017. a.] [http://www.plmcranesusa.com/downloads/Duty\\_Cycle\\_Cranes\\_vs.\\_Liftcrane\\_Modified\\_rev00.pdf](http://www.plmcranesusa.com/downloads/Duty_Cycle_Cranes_vs._Liftcrane_Modified_rev00.pdf).
24. **Liebherr Group AG.** Liebherr Group AG. *Duty cycle crawler cranes*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 26. Aprill 2017. a.] <https://www.liebherr.com/en/usa/products/construction-machines/earthmoving/duty-cycle-crawler-cranes/duty-cycle-crawler-cranes.html>.
25. ScanBalt Crane OÜ. *Roomikkraanad*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 1. Mai 2017. a.] <http://scanbaltcrane.com/tooted/roomikkraanad>.
26. **Sennebogen AG.** Sennebogen AG. *Sennebogen 2200E*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 1. Mai 2017. a.] [https://www.sennebogen.com/fileadmin/user\\_upload/Downloads\\_PDF\\_Broschueren/Broschueren\\_Crane\\_Line/2200\\_E.pdf](https://www.sennebogen.com/fileadmin/user_upload/Downloads_PDF_Broschueren/Broschueren_Crane_Line/2200_E.pdf).
27. **Avon Engineering.** [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 2. Mai 2017. a.] <http://www.avonengineering.com/pdf/clam-shell-buckets.pdf>.
28. **Ärileht.** Geoloog: EAS esitles töövõiduna "ämbrit", et mitte öelda halvemini. *ärileht.delfi.ee*. [Võrgumaterjal] <http://arileht.delfi.ee/news/uudised/geoloog-eas-esitles-toovoiduna-ambrit-et-mitte-oelda-halvemini?id=69790777>.
29. **Caterpillar .** D6N Track-type tractor. [Võrgumaterjal] Caterpillar. [Tsiteeritud: 4. Aprill 2017. a.] [http://www.cat.com/en\\_GB/products/new/equipment/dozers/medium-dozers/1000004501.html](http://www.cat.com/en_GB/products/new/equipment/dozers/medium-dozers/1000004501.html).
30. **TTÜ Mäeinstituut.** Maardu Fosforiidileiukoht. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 22. Aprill 2017. a.] <http://www.ene.ttu.ee/Maeinstituut/labor/teadusklubi/maardu/MAARDUFOSFORIIDILEIU KOHT.pdf>.

31. **Puura, Erik.** Salapärase diktuoneemakilt. *Postimees*. [Võrgumaterjal] 21. Mai 1997. a. [Tsiteeritud: 22. 04 2017. a.] <http://www.postimees.ee/2508597/salaparane-diktuoneemakilt>.
32. **Reinsalu, E ja Naumov, B.** *Tootmiskoondis "Eesti Fosforiit" põhjakarjääri sulgemise projekt*. Tallinn : TTÜ Mäenduslaboratoorium, 1991.
33. **Reinsalu, Enno.** *Eesti Mäendus: õpik kõrgkoolidele*. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2011. ISBN 9789949230754.
34. **Puura, Erik.** *Weathering of mining waste rock containing alum shale and limestone: A case study of the Maardu dumps, Estonia*. Stockholm : Stockholmi Kuninglik Tehnikaülikool, 1998.
35. **Ramboll Eesti AS.** *Pestud paekiviliiva katsetööd lõpparuanne*. 2009.
36. **Soovik, Enn.** Eesti Loodus. *Nõiakaev karjääri mõju alla?* [Võrgumaterjal] Oktoober 2009. a. [Tsiteeritud: 29. Aprill 2017. a.] [http://www.eestiloodus.ee/artikkel3465\\_3441.html](http://www.eestiloodus.ee/artikkel3465_3441.html).
37. *Hüdroteoloogia käsiraamat*. Leningrad : s.n., 1967.
38. **Kalle Suuroja, Kuldev Ploom, Tiit Mardim, Tarmo All, Merle Otsmaa, Anu Veski.** *Eesti geoloogiline baaskaart 6434 Rakvere SELETUSKIRI*. Tallinn : OÜ Eesti Geoloogiakeskus, 2006.
39. **OÜ Impel .** Segistiga tühjenduspump NKZ. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 5. Mai 2017. a.] <http://www.impel.ee/segistiga-tuhjenduspump-nkz>.
40. **Põllumajandusminister.** Riigiteataja. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 6. Mai 2017. a.] <https://www.riigiteataja.ee/akt/12880387?leiaKehtiv>.
41. **Pulver, Andres.** Virumaa Teataja. *Toolse jõe reostus läheb luubi alla*. [Võrgumaterjal] 16. November 2004. a. <http://virumaateataja.postimees.ee/2267139/toolse-joe-reostus-laheb-luubi-alla>.
42. *Frontaallaadur Liebherr L550*. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 2017. Mai 4. a.] [http://www.multivara.ee/dt\\_catalog/frontaallaadur-liebherr-l550/](http://www.multivara.ee/dt_catalog/frontaallaadur-liebherr-l550/).

43. **Riigi Ilmateenistus.** Riigi Ilmateenistus. *Kliimakaardid, sademed.* [Võrgumaterjal] 2016. a. [Tsiteeritud: ] <http://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/sademed/>.
44. **Eesti Maaülikooli põllumajandus - ja keskkonnainstituut.** *Mulla happesuse neutraliseerimise mõju keskkonnale ja mulla viljakusele, uurimustöö.* Tartu : s.n., 2006.

## **10 LISAD**

### **10.1 Graafiline lisa 1 – Võimalike uuringuruumide asukohad**

### **10.2 Graafiline lisa 2 – Uuringuruumi plaan**

### **10.3 Graafiline lisa 3 – Proovikaevandi plaan**

### **10.4 Graafiline lisa 4 – Väikekarjäari plaan**

### **10.5 Graafiline lisa 5 – Graptoliitargilliidi puistang**