



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Loodusteaduskond  
Geoloogia instituut

# **Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes**

Bakalaureusetöö

**1935B**

Üliõpilane: Jaagup Lööper

164063YAEB

Juhendaja: Tõnu Tomberg, TTÜ, MSc

Õppekava: YAEB 14/15

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## **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: [Ees- ja perenimi]  
[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.  
Juhendaja: [nimi]  
[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.  
Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]  
[allkiri ja kuupäev]



## Sisukord

Autorideklaratsioon .....	2
Annotatsioon.....	5
Abstract .....	6
1. Ülesande püstitus. Üldteave .....	7
2. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused .....	8
2.1 Kabala maardla mäenduslikud tingimused.....	9
2.2 Kabala maardla üldised geoloogilised tingimused.....	9
2.3 Üldised mäetehnilised ja hüdrogeoloogilised tingimused piirkonnas .....	11
2.4 Geoloogiliste ja mäenduslike tingimuste kokkuvõte .....	12
3. Avamis- ja ettevalmistustööd.....	13
4.1 Mäerõhu juhtimine, kambrite ja tervikute mõõtmete määramine.....	14
4.1.1 Kambrite ja tervikute mõõtmed .....	14
4.1.2 Kokkuvõte.....	20
4.2 Väljamine.....	22
4.2.1 Kombainkaevandamise välistamine .....	22
4.2.2 Puur- ja lõhketöödega väljamine .....	22
4.2.3 Väljamise tehnoloogia valik .....	29
4.3 Toestamine .....	30
4.4 Täitmistööd .....	31
4.5 Eetransport .....	33
5. Keskkonnakaitse.....	34
6. Ressursikulu ja omahinna prognoos kambriploki tasemel.....	36
7. Järeldused ja kokkuvõte .....	39
Kasutatud kirjandus.....	40
Lisad.....	41
Lisa 1. Tabel lõhkeaine arvutuslikust erikulust .....	41
Lisa 2. Tabel kivimi struktuuritegurist.....	42
Lisa 3. Tabel lõhkeaine erikulu parandustegurist .....	43
Lisa 4. Tabel lõhkeaugu soovitatavast sügavusest sõltuvalt kõvadustegurist .....	44

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

## **Annotatsioon**

Lõputöö ülesandeks on fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Kabala maardlas asub ca 600 miljonit tonni fosforiiti sisaldavad maaki. Maaki sisaldava kihi minimaalne paksus on 6,4 m, maksimaalne 12,10 m ja keskmine 7,6 m. Maardla asub Rakvere linnast ligikaudu 15 kilomeetri kaugusel.

Fosforiidikaevandus avatakse vertikaalšahtiga. Maagi väljamiseks on valitud tagasitaitmisega kamberkaevandamine. Raimamine viiakse läbi puur- ja lõhketöödega. Kaeveõõnte toetamiseks kasutatakse ankruid ja võlvikujulisi metallist raamtoestikke. Tagasitaitmiseks kasutatakse põlevkivituhast ja rikastusjäätmetest loodud täitesegu. Eetranspordiks kasutatakse laadurveokeid ja lintkonveierit.

Ligikaudne fosforiidi maagi tootmise omahind on 9,40 eurot / tonn. Praeguse maailmaturu hinna juures ei ole fosforiit kaevandamisväärne. Autori hinnangul on fosforiit otstarbekas kaevandada, kui maailmaturu hind on vähemalt 250 eurot / tonni kohta.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## **Abstract**

Topic of the thesis is to select and elaborate on the technology for underground mining of phosphate ore in conditions of Kabala deposit.

Kabala deposit contains ca 600 million tonnes of phosphate ore. The minimal thickness of the bed containing phosphate ore is 6,4 m, maximum 12,10 m and average 7,6 m. The deposit is located near the city of Rakvere - around 15 km .

Underground mine will be opened with a vertical shaft. Room- and pillar mining with backfilling will be used for the extraction of the ore. Extraction itself is carried out with method of drilling and blasting. Shafts and rooms will be supported by anchors and arched metal frames. Mixture, made of oil shale ash and enrichment residue, is used for the backfilling. Transport is carried out by using undergrounds loaders and belt conveyer.

Current estimated mining cost of phosphate ore is 9,40 euros per ton. Present world market price (90 euros / ton) makes phosphate ore unprofitable to mine. The author's assessment is that the mining may become profitable after market price reaches at least 250 euros per ton.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

## 1. Ülesande püstitus. Üldteave

Tänapäeval on fosforiit Eesti Vabariigis määratletud kui tulevikumaavara. Eelmisel sajandil kaevandati fosforiiti, kuid ajaloolistel (suur depressioon, II maailmasõda) ja poliitilistel (plaanimajanduse eelistamine turumajandusele) ning tehnoloogilistel (liivakivi suur abrasiivsus) põhjustel ei ole edukat fosforiidi kaevandamist Eestis veel toimunud. Sellel perioodil kaevandati fosforiiti Ülgasel (1920-ntel), ja Maardus (1940 - 1980-ndateni). Arvestades hetkel olevat maailmaturu hinda ja kaevandamistehnoloogiat, ei ole kuni tänase päevani olnud fosforiidi kaevandamine majanduslikult otstarbekas, kuid eeldused on olemas, et see võib tulevikus toimuda. [8]

Eesti riigi jaoks on maavarade kasutamine muutumas tähtsamaks prioriteediks – seoses sellega loodi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi käskkirjaga Eesti Geoloogiateenistus, mille ülesanneteks on määratud maavarade kaardistamine, uurimine ja rakendamise potentsiaali avastamine. Üheks neist uuritavatest maavaradest on ka kõik fosforiidiga seonduv. [4]

Maardla asukoht on Kabalas, mis asub Lääne-Virumaal, Rakvere linnast ligikaudu 15 kilomeetri kaugusel. Andmed maardlast ning selle keskkonnast pärinevad 1986. aastal kirjutatud aruandest, milles kavandati luua fosforiidikaevandus. Detailuuringuala suuruseks valiti 45 ruutkilomeetrit (12 kilomeetrit Rakvere linnast), sellel alal viidi läbi geoloogiline uuring aastatel 1982 - 1986. Tolleaegsed puuraukude südamikud ei ole praeguseks säilinud, kuid mitteametlikel andmetel on lähiajal planeeritud Kabala maardlasse uute puuraukude rajamine. [17]

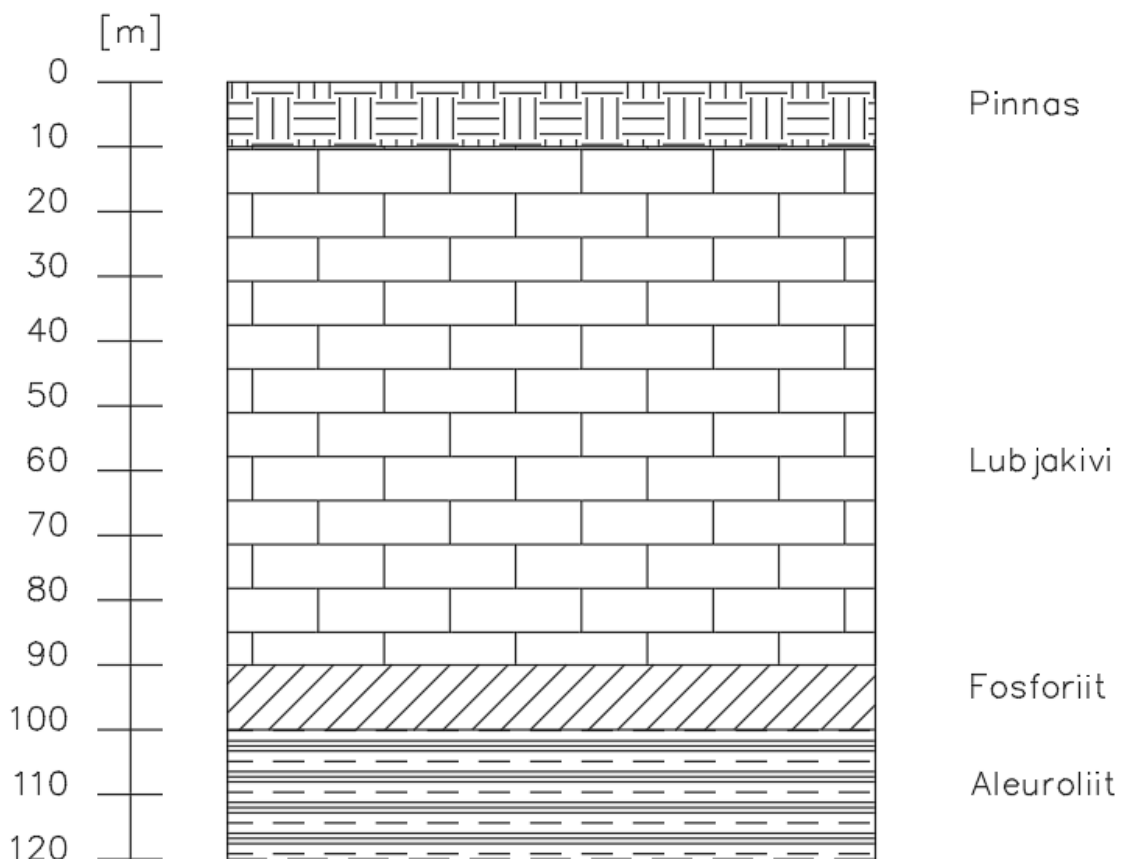
Lõputöö ülesandeks on välja töötada tehnoloogiline skeem, millega oleks võimalik fosforiiti lähitulevikus (eelkõige maailmaturu hinna tõustes) otstarbekalt kaevandada.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## 2. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused

Kabala maardlas asub 600 miljoni tonni jagu fosforiiti sisaldavat maaki. Maardla asetseb piirkonnas, mis on määratletud Pandivere kõrgustiku ja Põhja-Eesti lavamaaga (*joonis 1*). Piirkond on hästi arenenud ja tihedasti asustatud, mis toovad endaga kaasa arendamise, keskkonnakaitse, maapinna deformeerumise ja veerežiimi käitlemisega tekkivate probleemide keerukuse. [8][17]

Piirkonna maapõu esindavad Ordoviitsiumi ja Siluri ladestute karbonaatsed kivimid, mis lasuvad horisontaalselt ja on kaetud Kvaternaari setetega. Kogu ala settekivimite kompleksi paksus on andmete põhjal üle 200 meetri. Veekogudest paiknevad sellel maa-alal Kunda, Pada jt. jõed, mis suubuvad Soome lahte ning Uljaste, Neeruti jm. järved. [17]

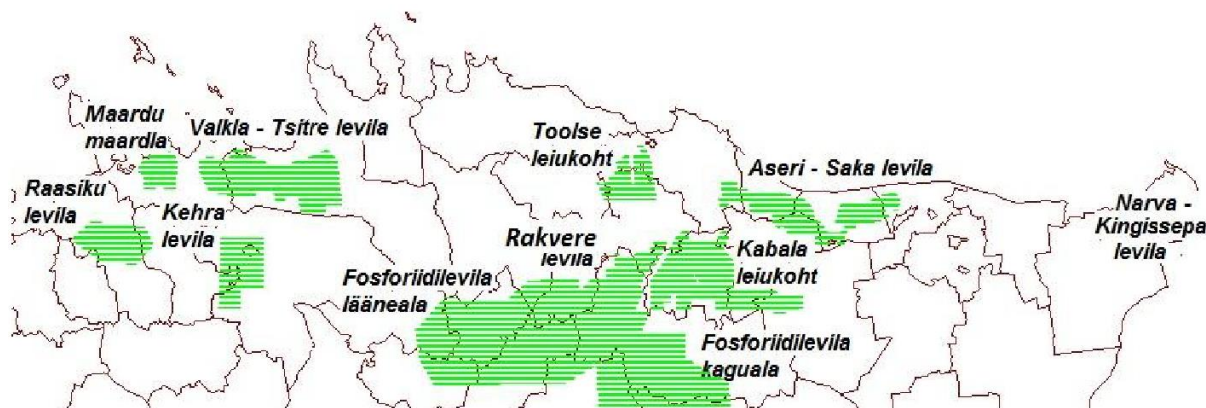


Joonis 1. Kabala maardla geoloogiline läbilõige. [17]

Eelmisel sajandil valiti Rakvere piirkonnas osa Kabala maardlast välja detailuuringuteks, mille eesmärkideks olid kindlate kaevandamistehnoloogiate väljatöötamine ja tasuvusuuringu teostamine. Detailuuringuala suurus oli 45 ruutkilomeetrit ja selle kaugus Rakvere linnast oli 12 kilomeetrit. Geoloogiline uuring sooritati aastatel 1982 - 1986, kaevandusvälja kontuurides, mis määrati riikliku kaevandamise projekti alusel. Maardla varuks kinnitati ca 600 miljonit tonni maaki ja kavandati 12 miljoni tonnise aastase tootmisvõimsusega kaevandust. Kaevanduse põhjapiiriks olid puuraugud P-1552 ja P-1702, idapiiriks Kunda jõe org ja lõunapiiriks fosforiidi varu reservid ja läänepiiriks Aseri tektoonilised rikked. [17]



Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper



Joonis 2. Fosforiidi leiukohad Põhja-Eestis. [8]

## 2.1 Kabala maardla mäenduslikud tingimused

Maardla maastik on lainjas, mis peamiselt koosneb moreenist. Ala absoluutkõrgused on 64 - 103 meetri piires. Kaevandusalale jäävad kõrge kvaliteediga põllumajandusmaad, metsad, teedevõrk (Rakvere - Mustvee) ning Kabala raudteejaam. [17]

Läbi kaevanduse territooriumi voolab Kunda jõgi. Kohalik kliima on niiske – aastane sademete kogus on 650 millimeetrit. Püsiv lumekate saabub detsembri keskel ja sulab alles Aprilli keskpaigas ära. Neid fakte tuleb arvesse võtta maksimaalse vee sissevoolu arvutamisel kaevandusse. [17]

Fosforiidi maardla moodustub Kallavere kihistu Pakerordi lademest (vanim Ordoviitsiumi lade), mis on alumises osas segunenud Kambriumi aleuoliidi ja liivakividega. Fosforiiti katab 60 - 120 meetri (lõunapool paksemad kihid) paksune Kvaternaari ja karbonaatkivimite kompleks. Ala on kaevandamisväärsuselt mitmekesine - ligikaudu 30-35 meetrit fosforiidist üleval asub põlevkivi 2 - 3 meetrise kihina, mille varu alal on hinnanguliselt 110 miljonit tonni. [17]

Kabala fosforiidi kaevanduse projekteerimine ja kaevandamine on keeruline järgmistel põhjustel:

- 1) keerulised hüdrogeoloogilised tingimused (karstid, tektoonilised rikked, kivimite lõhelisus Kunda jõe orus, erinevad filtratsiooniomadustega kivimid ja ebaühtlane vee sissevool kaevandusalasse);
- 2) maailmas puudub hea analoog Rakvere maardla kohta;
- 3) mitteterviklikud proovid (puursüdamike saagis alla 20%). [17]

## 2.2 Kabala maardla üldised geoloogilised tingimused

Kaevandamistööd toimuvad Latorpi, Pakerordi ja Tiskre kihistus. Puursüdamike baasil on määratud kivimikihtide füüsikalised-tehnilised parameetrid, nende keskmised ja ekstreemumid; tabelis (tabel 1) on näitajad Kvaternaarist kuni Alam-Kambriumi. [17]

Kiht	h Paksus [m]	$\rho_i$ Looduslik mahumass	$\sigma_s$ Survetugevus [MPa]	$\sigma_t$ Tõmbetugevus [MPa]	$E_{st}$ Staatiline elastusmoodul	$E_d$ Dünaamiline elastsusmoodul

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

		[t / m <sup>3</sup> ]			[MPa]	[MPa]
Kvaternaar	10,0	-	-	-	-	-
Rakvere	2,3	2,65	-	5,6	-	-
Oandu	3,1	2,6	66,8	2,3	15,1	34,5
Keila	21,5	2,6	61,7	4,0	21,3	43,1
Jõhvi		2,51	55,1	3,7	13,6	37,3
Idavere	4,25	2,55	44,6	3,6	10,1	30,0
Kukuruse	11,5	2,42	34,0	2,4	6,8	22,7
Uhaku	10,6	2,42	32,0	2,9	6,4	20,6
Lasnamäe	11,1	2,62	69,9	5,2	26,7	40,6
Aseri	2,7	2,62	67,1	5	23,9	29
Kunda	7,7	2,63	48,7	5,7	17,8	25
Volhovi	2,3	2,69	60,7	4,7	32,9	46,2
Latorpi	1,0	2,36	13	1,2	4,7	11,7
Pakerordi	7,6	2,61	23,7	1,8	2,9	-
Alam-Kambrium	5,1	2,13	38	1,1	10,9	7,1

Tabel 1. Kihtide paksused ja tugevusomadused puuraukude proovide analüüsi põhjal. [17]

Kallavere kihistu kvartsliaakivi asub vaheldumisi aleuroliidi kihtidega. Fosforiidi kihi paksus kaevandusväljal on 6,4 - 12,1 m (keskmiselt 7,6 m), kiht on kõige paksem maardla keskosas. Kallavere kihistu levib kogu maardla alal ja on jagatud Maardu ja Suurejõe kihistikeks. Maardu kihistik õheneb põhja suunas maardla keskkohast ja selle maksimaalne paksus oli puuraugu P-2141 andmeil 6,70 m. Suurejõe kihistik levib samuti kogu maardla alal ja selle paksus on vahemikus 2,70 - 9,80 m, keskmine paksus on 5,8 meetrit. [17]

Puursüdame terviklikkus ei ületanud 20%, sellepärast ei ole võimalik puursüdame abil Maardu ja Suurejõe kihistike piiri leida. Üldiselt on fosforiiti sisaldavad kihid esindatud detriitse liivakivi, ränipurru, kvartsliaakivi ja oobulusliivakividega. Kivimid on erineva tsementeerituse astmega. [17]

Olenevalt kihistike asukohast on fosforiiti sisaldavatest kihtidest kaevandamisväärsamad ülemised ja keskmised kihid. Alumised kihid on madala fosforiidi sisalduse ( $P_2O_5 < 3\%$ ) tõttu ainult lõikude kaupa kaevandamisväärsed (kohtades, kus puudub Maardu kihistik). [17]

Ülemine osa Kallavere kihistust on ebaühtlane, koosneb purrust või detriitset kvartsliaakivist. Tootsa kihi peal on graptoliitargiliit (ainult kõige põhjapoolsemas osas marginaalses suurus) või nõrgalt tsementeerunud glaukoniitliivakivi paksusega 0,40 - 1,60 m. Üksikutes kohtades alumistes kihtides leidub hulgaliselt detriitset ja brahheopode sisaldavat materjali koos. Kallavere kihistu peal asuvad tsementeeritud Mäeküla kihistu glaukoniitliivakivid paksusega 0,3 - 0,4 m ja dolomitiseerunud lubjakivi paksusega kuni 0,4 m. [17]

Volhovi lade koosneb erinevatest glaukoniiti sisaldavatest lubjakividest. Lademe paksus on 1,4 - 2,8 m, mis on jagatud kolmeks ladestikuks ja moodustab kambrite vahetu lae. Põhilaeks saab

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

olema Kunda lademe lubjakivi. Kunda lade sisaldab savikat lubjakivi, mis on jagatud neljaks ladestikuks. Lade esineb kogu maardla alal ja selle paksus on 6,8 - 8,1 m. [17]

Ordoviitsiumi keskosa esindavad Aseri, Lasnamäe, Uhaku, Kukruse, Idavere, Jõhvi, Keila ja Rakvere lademed. [17]

### 2.3 Üldised mäetehnilised ja hüdrogeoloogilised tingimused piirkonnas

Maardla keskosas asuvad karstialad, mis on ühendatud kagu-loodesuunaliste lõhedega ja need läbivad sügavust suures mahus. Seega vajavad sügavad karstunud alad erilist tähelepanu. Kuna kvartsi sisaldus kivimis on keskmiselt 47% tuleb kaevandamisel võtta kasutusel lisavahendeid tolmusisalduse piiramiseks, et see ei ületaks  $2 \text{ mg} / \text{m}^3$ . [17]

Hüdrogeoloogiliste tingimuste järgi määratletult asub kaevandus Balti Arteesiabasseinis. [17]

Alal asuvad järgmised põhjaveekihtid (ülevalt alla osade kaupa):

- Kvaternaari põhjaveekiht;
- Ordoviitsiumi põhjaveekiht karstide ja lõhedega, mis omakorda sisaldab järgnevaid veekihte:
  - Kabala-Rakvere;
  - Keila-Jõhvi;
  - Kukruse;
  - Lasnamäe - Kunda. [17]

Ordoviitsiumi-Kambriumi surveiline põhjaveekihi paksus on 20-25 m. [17]

Prognoositud veekihtide vooluhulk põlevkivi kaevandustes sooritatud mõõtmiste järgi:

- Kabala - Rakvere  $200 \text{ m}^3 / \text{h}$ ;
- Keila - Jõhvi  $315 \text{ m}^3 / \text{h}$ ;
- Kukruse  $146 \text{ m}^3 / \text{h}$ . [17]

Viimased kaks veekihti on omavahel ühendatud. „Estonia“ põlevkivikaevanduses läbi viidud katsetööd näitasid, et sissevool Kabala - Rakvere kihist (kihi paksus 15 m) oli  $400 \text{ m}^3 / \text{h}$  ja Keila-Jõhvi ning Kukruse kihist  $40 - 50 \text{ m}^3 / \text{h}$ . Seetõttu on vajalik kihtide avamisel luua kuivenduskaevud või kasutada mõnda muud meetodit vee sissevoolu ärajuhtimiseks kaevandusest. Fosforiidikaevanduse arendamisel tuleb arvestada, et Kambriumi-Ordoviitsiumi põhjaveekihtide sissevool kaevandusse on kuni  $400 \text{ m}^3 / \text{h}$ . Väljapumbatud vett saab pärast puhastamist kasutada rikastusvabrikus või täitekompleksis. [17]

Vertikaal- ja kaldpuurimisel tuleb tagada ülemiste veekihtide isoleeritust. Erimeetmeid tuleb kasutada vee voolamise ulatuse piiramiseks ja kaeveõõnte stabiilsuse tagamiseks sügava karstiala ja tektooniliste lõhede piirkonnas. Fosforiidikaevanduse tõttu on prognoositud muudatused veerežiimis - mõjud lähiala Rakvere piirkonna tarbijatele 30 km raadiuses oodatava

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

depressioonilehtri tagajärjel. Ulatuslikke investeeringuid on vaja veerežiimi muutuste kompenseerimiseks ja piisava veevoolu tagamiseks piirkonna tarbijatele. [17]

Veerežiimi haldusest tulenevate probleemide, mis tekivad kaevandamise tõttu, lahendamiseks pakutakse järgmisi variante:

- puhastatud kaevandusvesi juhtida Selja jõkke;
- maksimaalne vee taaskasutus kaevandamisel;
- tehistervikute loomine;
- jäätmekäitlusrajatiste rajamine tööstuspiirkonda;
- mõjutatud veekogude puhastamine. [17]

## **2.4 Geoloogiliste ja mäenduslike tingimuste kokkuvõte**

Kabala maardlas on ca 600 miljonit tonni fosforiiti sisaldavat maaki, mille keskmine paksus on 7,6 meetrit. Tulevase fosforiidikaevanduse projekteerimine ja ehitamine on keeruline hüdrogeoloogiliste tingimuste, vähese uurituse ja kadunud puursüdamike tõttu. [17]

Fosforiidi kaevandustööde planeerimisel on vaja luua meetmed piisava õhuvarustuse tagamiseks, sest kvartsi keskmine sisaldus maagis on 47,6%, ka põhjavee sissevoolu vähendamiseks ja kaeveõõnte püsivuse tagamiseks kaevandustööde ajal maardlas paiknevate sügavate karstide ja tektooniliste lõhede tõttu. [17]

Kaevanduse ohutuks rajamiseks ja opereerimiseks on vaja teostada ulatuslikku põhjavee väljapumpamist, mille tõttu tekib depressioonilehter. Depressioonilehtri mõju avaldub tarbijateni 30 kilomeetri raadiuses, sest Kambrium-Ordoviitsiumi põhjaveekihtide sissevoolu maht kaevandusse oleks mitusada m<sup>3</sup>/h. [17]

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

### 3. Avamis- ja ettevalmistustööd

Avamis- ja ettevalmistustööd hõlmavad maa peal avamiskaeveõõne, tööstusplatsi, veekäitlemise süsteemi loomist ning maa all kaevandusõu, strekkide, kogumispunkri ja ventilatsioonišahtide rajamist.

Lääne-Kabala fosforiidi maardla avatakse vertikaalšahtiga. Vertikaalšahti kasuks langeb valik sellepärast, et lasumissügavuse (ligikaudu 90 meetrit) tõttu oleks kaldšahti pikkus liialt suur ja kaevisse transport osutuks ebaefektiivseks. Šaht rajatakse ringikujulise läbilõikega ning läbindatakse puur- ja lõhketöödega; sügavus on 90 meetrit. Ventilatsiooni skeemi valik on kombineeritud variant - sissemineva värske õhu puhul kasutatakse ventilaatoreid lisamahu ja -kiiruse suurendamiseks ning väljatuleva kasutatud õhu korral ventilaatoreid õhujoale lisamahu ja -kiiruse tõmbamiseks. Tuulutusseksioonide arv šahtis on kokku neli, neist kaks värske õhu ja kaks kasutatud õhu jaoks. [3] [17]

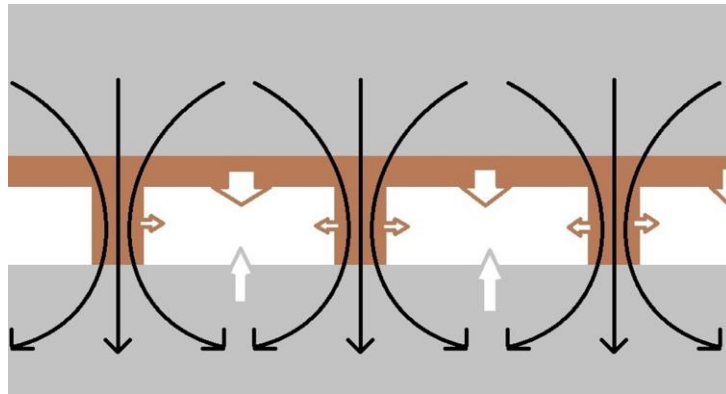
Maa-alune ettevalmistus hõlmab kaevandusõu rajamist, kuhu langetatakse nii kaevanduse transport kui ka personal. Toetuse ja ohutuse seisukohast lähtuvalt on tõhusam luua pearuum mitte liivakivi kihtide sisse, vaid lubjakivi kihtide sisse, kust kaldstrekk viiks alla fosforiidi kaevandamise sügavusele. Strekkide läbindamisel tuleb kasutada puur- ja lõhketöid – mehaaniline raimamine on ebapraktiline olenemata kaevanduse opereerimise faasist. Arvestades kaeveõõnte gabariitide vahet on tõenäoline, et ettevalmistamisel kasutatakse teisi ehk väiksemaid masinaid kui koristuskambrites. Kogunemispunker on koht, kuhu kaevis jõuab mööda lintkonveierit. Selle asukoht on kaevandamissügavusest madalamal asuv kaeveõõs, kuhu lintkonveier kaevisse transpordib ja kust toimub kaevisse vertikaalne tõste. Maapinnale tõstetud kaevis suundub rikastusvabrikusse.

Fosforiidi kaevanduse avamiskaeveõõneks on valitud vertikaalšaht, mille loomine toimub puur- ja lõhketööde abil. Maapealsed operatsioonid toimuvad tööstusplatsil. Ventilatsiooni süsteem töötab kombineeritud meetodil. Enne kambrite koristamist on vaja luua maa alla kogumispunker, strekid ja kaevandusõu. Strekkide valmistamiseks tuleb kasutada väiksemaid masinaid, mis mahuks manööverdama ettevalmistustööde (puur- ja lõhketööde, toetamise ja koristamise) ajal. Tuleb arvestada, et avamis- ja ettevalmistustööd on väga ajamahukad tööd, sest mehaanilist raimamist ei ole võimalik kasutada ja strekkide kogupikkus ulatub kilomeetritesse.

## 4. Koristustööde tehnoloogiline skeem

### 4.1 Mäerõhu juhtimine, kambrite ja tervikute mõõtmete määramine

Kaeveõõne rajamisel tekivad selle ümber pingetsoonid, mis mõjuvad peamiselt laele ja külgedele, kuid tegelikult moonutab mäerõhk kaeveõõnt kõigist külgedest. Peamine idee kaeveõõne konstrueerimisel on mäerõhk kambritest selle külgede kaudu mööda juhtida - selle tagajärjel kaeveõõne lagi vajub, põrand tõuseb ja küljed surutakse kokku (kvaliteetse toetuse korral on kaeveõõs stabiilne). Kamberkaevandamisel hoitakse lage üleval tervikutel (selles töös linttervikud) ja ankrud vahetu lae ja põhilae liitmiseks liittalaks. Oluline roll on kaeveõõne ristlõike valikul, kas valida risküliku- või võlvikujuline läbilõige - sellest sõltuvad tegurid kaeveõõnte püsivuse arvutamisel. Mäerõhu eelduslik suurus saadakse mahumassi ja lasumissügavuse korrutisena (kabala maardlas on prognoositav mäerõhk on ca 2,25 MPa). Mäerõhu mõju kivimitele aja jooksul nimetatakse roomamiseks, mis kujutab endast kivimite deformatsiooni kasvamist aja jooksul (joonis 2). Roomamise lõppresultaadiks on varing. Järelikult on esmatähtis mäerõhu juhtimisel arvestada, et roomamise protsess peab pideva kontrolli all olema. [6] [17]



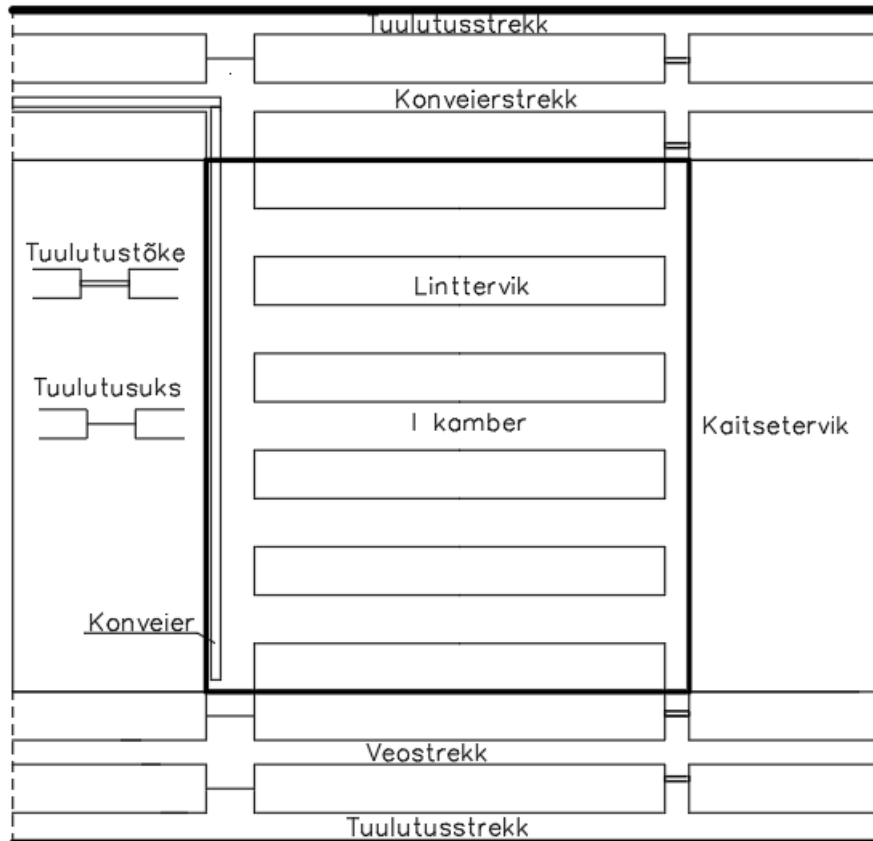
Joonis 3. Mäerõhu mõju kaeveõõnele. [8]

#### 4.1.1 Kambrite ja tervikute mõõtmed

Kambriploki suuruseks on valitud 110 x 100 x 10 meetrit. Kõrgus on võetud arvutuslikust seisukohast lähtudes. Ühelt poolt on teada, et fosforiidi kihi keskmine paksus on 7,6 meetrit (minimaalne 6,4 m ja maksimum 12,1 m) ja teiselt poolt, et maavaralasuundi alumised kihid on madalama  $P_2O_5$  sisaldusega ja seetõttu ei pruugi maavaraks kvalifitseeruda. Kambrite ülevalhoidmiseks kasutatakse linttervikud, mõõtmetega 10 x 85 x 10 meetrit. Kaitsetervikute laius on võetud 40 meetrit. Lisaks kambritele asuvad kaevanduses ka veel konveierstrekk, külgstrekk, veostrekk ja tuulutustrekk. Tuulutustrekk, veostrekk ning konveierstrekk on 6 m lai ja 6 m kõrge. Külgstrekk asub kambriplokis sees, seega kõrguseks jääb 10 m, laius on 5 m. Külgstrekkis asuvad veeärastuskraavid. Tuulutustreki põhi on tõstetud kõrgusele, kus vahetuks laeks jääb Volhovi lademe lubjakivi ja põhilaeks Kunda lademe lubjakivi. Veostreki põrand algab kambri põhjaga samalt kõrguselt. Tuulutustreki, veostreki ja konveierstreki ristlõikeks on võlv ning kambri ja külgstreki ristlõikeks on riskülik. Konveier asub kambri põhjast madalamal ehk

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

aleuroliidis. Kivimikihtide tugevusomaduste arvutamisel on järgitud Peterburi teadusinstituudi VNIMI markšeideri osakonna juhiseid. [17]



Joonis 4. Kambriploki plaan peale primaarkambrite väljamist. [8]

Kaeveõõne kivimite keskmine survetugevus arvutatakse valemiga:

$$R_{st} = \sigma_s * k \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 1})$$

kus:

- $\sigma_s$  - kivimi keskmine survetugevus [MPa];
- k - pindade lisakoormuse tegur. [17]

Kaeveõõne kivimite keskmine tõmbetugevus arvutatakse valemiga:

$$R_{tt} = \sigma_t * k \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 2})$$

kus:

- $\sigma_t$  - kivimi keskmine tõmbetugevus [MPa];
- k - pindade lisakoormuse tegur. [17]

Kivimi keskmine surve/tõmbetugevus võetakse tabelist 1 ja pindade lisakoormuse tegur on 0,4.

Kivim	Kiht	Survetugevus [MPa]	Tõmbetugevus [MPa]
Lubjakivi	Kunda	19,5	2,3

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

	Volhovi	24,3	1,9
Glaukoniitliivakivi	Latorpi	5,2	0,5
Detriitne liivakivi	Pakerordi	9,5	0,7
Aleuoliit	Alam- Kambrium	15,2	0,4

Tabel 2. Kaeveõõnte kivimite keskmised tugevusomadused. [17]

Kaeveõõne survetugevus arvutatakse valemiga:

$$R_S^k = \frac{R_{stl} * h_{lagi} + R_{stp} * l_{põrand}}{h_{lagi} + l_{põrand}} \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 3})$$

kus:

- $R_{stl}$  - laekivimi survetugevus [MPa];
- $h_{lagi}$  - laekivimi paksus [m];
- $R_{stp}$  - põrandakivimi survetugevus [MPa];
- $l_{põrand}$  - põrandakivimi laius [m]. [17]

Kaeveõõne tõmbetugevus arvutatakse valemiga:

$$R_t^k = \frac{R_{ttl} * h_{lagi} + R_{ttp} * l_{põrand}}{h_{lagi} + l_{põrand}} \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 4})$$

kus:

- $R_{ttl}$  - laekivimi tõmbetugevus [MPa];
- $h_{lagi}$  - laekivimi paksus [m];
- $R_{ttp}$  - põrandakivimi tõmbetugevus [MPa];
- $l_{põrand}$  - põrandakivimi paksus [m]. [17]

Andmed tugevuste ja kivimite paksuste kohta saadakse tabelitest 1 ja 2.

Kaeveõõs	Survetugevus [MPa]	Tõmbetugevus [MPa]
Kogumiskraav	15,2	0,40
Külgstrekk	13,2	0,77
Tuulutusstrekk	11,6	0,77
Konveierstrekk	14,3	0,88
Veoštrekk		

Tabel 3. Kaeveõõnte tugevusomadused. [17]

Külgsurve arvutatakse valemiga:

$$\sigma_{\max} = (k * \rho * H) / (t * 10^6) \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 5})$$



Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

kus:

- $k$  – pingete kontsentratsioonitegur;
- $\rho$  - kivimite mahumass [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ];
- $H$  - lasumissügavus [m];
- $t$  - ühikute ühtlustamise tegur. [17]

Pingete kontsentratsioonitegur on 2,0; kivimite mahumass on  $2600 \text{ kg} / \text{m}^3$  ja lasumissügavus 90 meetrit. Ühikute ühtlustamise tegur on 0,10197, mille lisamine on vajalik vältimaks konflikti ühikute (njuutoni ja kilogrammi) vahel.

Külgsurve:

$$\sigma_{\max} = (2 * 2600 * 90) / (0,10197 * 10^6) = 4,59 \text{ MPa}.$$

Surve laele arvutatakse valemiga:

$$\sigma_{\min} = (k * \lambda * \rho * H) / (t * 10^6) \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 6})$$

kus:

- $k$  - pingete kontsentratsioonitegur;
- $\lambda$  - külgsurvevegur;
- $\rho$  - kivimite mahumass [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ];
- $H$  - lasumissügavus [m];
- $t$  - ühikute ühtlustamise tegur. [17]

Pingete kontsentratsioonitegur on 1,0; kui tegemist on riskülikukujulise ristlâbilõikega ja 0,3; kui tegemist on võlvikujulise kaeveõõne ristlõikega ning külgsurvevegur on 0,3. Kivimite mahumass on  $2600 \text{ kg} / \text{m}^3$  ja lasumissügavuseks 90 meetrit. Ühikute ühtlustamise tegur on 0,10197 ja see on vajalik vältimaks konflikti ühikute vahel.

$\sigma_{\min}$	0,688	riskülikukujuline lâbilõige
	0,207	võlvikujuline lâbilõige

Tabel 4. Survejõud kaeveõõne laele. [17]

Varutegur külgedele arvutatakse valemiga:

$$V_k = R_S^k / \sigma_{\max}, \quad (\text{Valem 7})$$

kus:

- $R_S^k$  – kaeveõõne kivimite keskmine survetugevus [MPa];
- $\sigma_{\max}$  - surve külgedele [MPa]. [17]

Kaeveõõne kivimite keskmise survetugevus saadakse tabelist 3 ja survejõud külgedele on 4,59 MPa.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Varutegur laele arvutatakse valemiga:

$$V_l = R_t^k / \sigma_{\min} \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 8})$$

kus:

- $R_t^k$  - kaeveõõne keskmine tõmbetugevus [MPa];
- $\sigma_{\min}$  - surve laele [MPa]. [17]

Kaeveõõne keskmine tõmbetugevus võetakse tabelist 3 ja surve laele on 0,688 MPa ristkülikukujulise ristlabilõike puhul ja 0,207 MPa võlvikujulise ristlabilõike korral.

Kaeveõõs	Varutegur külgedele	Varutegur laele
Külgstrekk	3,0	1,1
Tuulustusstrekk	3,1	3,8
Konveierstrekk	2,5	4,3
Veostrekk		

Tabel 5. Kaeveõõnte varutegurid külgedele ja laele. [17]

Lintterviku minimaalne vajalik laius arvutatakse valemiga:

$$b = \frac{A + \frac{A \cdot B}{L}}{\frac{\sigma_s}{n \cdot \gamma_k} - \frac{\gamma_{terv} \cdot h_{terv}}{\gamma_k \cdot H} - \frac{B}{L} - 1} \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 9})$$

kus:

- A - kambri laius [m];
- B - tervikute vaheline kaugus [m];
- L - terviku pikkus [m];
- $\sigma_s$  - nõrgima kivimi kihi survetugevus [kg / m<sup>2</sup>];
- n - varutegur;
- $\gamma_{terv}$  - terviku kivimite keskmine mahumass [kg / m<sup>3</sup>];
- $\gamma_k$  - lae kivimite keskmine mahumass [kg / m<sup>3</sup>];
- H - lasumissügavus [m];
- h - terviku kõrgus [m]. [18]

Tähis	Väärtus
A - kambri laius	10 m
B - tervikute vaheline kaugus	10 m
L - terviku pikkus	85 m
$\sigma_s$ - nõrgima kihi survetugevus	530252 kg / m <sup>2</sup>
n - varutegur	4
$\gamma_{terv}$ - terviku keskmine mahukaal	2500 kg / m <sup>3</sup>
$\gamma_k$ - laekivimite keskmine mahukaal	2600 kg / m <sup>3</sup>
H - lasumissügavus	90 m
h - terviku kõrgus	10 m

Tabel 6. Terviku vajaliku laiuse arvutuse parameetrid.

Lintterviku minimaalne vajalik laius:

$$b = \frac{10 + \frac{10 \cdot 10}{85}}{\frac{530252}{4 \cdot 2600} - \frac{2500 \cdot 10}{2600 \cdot 90} - \frac{10}{85} - 1} \geq 8,22 \text{ m.}$$

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

Kambrite arv plokis arvutatakse valemiga:

$$m = \frac{L_1 - b}{a + b}, \quad (\text{Valem 10})$$

kus:

- $L_1$  - kambriploki piirava [m];
- $a$  - kambri laius [m];
- $b$  - terviku laius [m]. [18]

Kambrite arv plokis:

$$m = \frac{110 - 10}{10 + 10} = 5.$$

Kaevandatava ploki lae maksimaalne piirava arvutatakse valemiga:

$$L = (2 * n + 1) * b \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 11})$$

kus:

- $n$  - teises järjekorras väljatavate (sekundaarsete) kambrite arv plokis;
- $b$  - sekundaarsete kambrite laius [m]. [18]

Kaevandatava ploki lae maksimaalne piirava:

$$L = (2 * 6 + 1) * 10 = \mathbf{130 \text{ m}}.$$

Keskmine surve tervikutele arvutatakse valemiga:

$$R_k = \left(\frac{1}{2} * \gamma * L * \tan \delta\right) / (t * 10^6) \text{ [MPa]}, \quad (\text{Valem 12})$$

kus:

- $\gamma$  - terviku keskmine mahukaal [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ];
- $L$  - kaevandatava ploki lae maksimaalne piirava [m];
- $\tan \delta$  - sildumisnurk;
- $t$  - ühikute ühtlustamise tegur. [18]

Terviku keskmine mahukaal on  $2500 \text{ kg} / \text{m}^3$ , kaevandata ploki maksimaalne piirava on arvutatud 130 m, sildumisnurk on 60 kraadi ning ühikute ühtlustamise tegur on 0,10197.

Keskmine surve tervikutele:

$$R_k = \left(\frac{1}{2} * 2500 * 130 * \sqrt{3}\right) / (0,10197 * 10^6) = \mathbf{2,76 \text{ MPa}}.$$

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Võimaliku varisemistsooni kõrgus arvutatakse valemiga:

$$h = \frac{(2 * n + 1) * b}{2 * \cot \delta} [\text{m}], \quad (\text{Valem 13})$$

kus:

- n - sekundaarsete kambrite arv plokis;
- b - sekundaarsete kambrite laius [m];
- $\cot \delta$  - rebenemisnurk. [18]

Sekundaarsete kambrite arv plokis on 6, sekundaarsete kambrite laius on samuti 10 m ja rebenemisnurk on 60 kraadi.

Võimaliku varisemistsooni kõrgus:

$$h = \frac{(2 * 6 + 1) * 10}{2 * \cot 60} = \mathbf{113 \text{ m.}}$$

Paneelterviku vajalik tugevus arvutatakse valemiga:

$$R_B = \frac{1}{B} * \left( (L + B) * \gamma * H - \frac{R_k}{2} * L \right) [\text{MPa}], \quad (\text{Valem 14})$$

kus:

- B - Kaitseterviku laius [m];
- L - kaevandatava ploki lae maksimaalne piirava [m];
- $\gamma$  - terviku keskmine mahukaal [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ];
- H - lasumissügavus [m];
- $R_k$  - keskmine surve tervikutele [MPa]. [18]

Kaitseterviku laius on 40 m, kaevandatava ploki lae maksimaalne piirava on 130 m, terviku keskmine mahukaal on  $2500 / \text{m}^3$ , lasumissügavus on 90 m ja keskmine surve tervikutele on arvutatud 2,76 MPa.

Paneelterviku vajalik tugevus:

$$R_B = \frac{1}{40} * \left( (130 + 40) * 2500 * 90 - \frac{2,76}{2} * 130 \right) = \mathbf{5,39 \text{ MPa.}}$$

#### 4.1.2 Kokkuvõte

Mäerõhu juhtimiseks on vajalik tarvilike tingimuste ehk toetuse loomine, et kaeveõõnte püsivus tagada. Tegemist on ülimalt olulise aspektiga kaevanduse projekteerimisel. Selles töös kasutatakse toetuse kindlustamiseks linttervikuid ja ankurtoestikku. Kaeveõõnte kujundamisel kasutatakse nii ristküliku kui ka võlvikujulise ristlõikega kaeveõõsi.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Kambriploki suuruseks on 100 x 110 meetrit ja kambri mõõtmeteks on 10 x 85 x 10 m. Kambri ristlõikeks on ristkülik, ka külgstreki ristlõikeks on ristkülik. Konveierstrek, tuulutusstrek ning veostrek on 6 m lai ja 6 m kõrge (kõik võlvikujulise ristlõikega). Lintterviku mõõtmed on samad kambriga ja kaitseterviku laius on 40 m. Peterburi instituudi VNIMI markšneideri osakonna juhiste järgi sooritatud kontrollarvutused näitavad kaeveõõnte piisavat tugevust püsimiseks (*tabel 5*). Lisaks toestatakse kaeveõõsi veel ka ankrute ja metallist raamtoestikuga.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

## 4.2 Väljamine

Fosforiidi allmaakaevandamisel on võimalik valida kahe väljamise tehnoloogia vahel, milleks on kombainkaevandamine ning puur- ja lõhketööd. Esiteks antakse ülevaade, miks kombainkaevandamine ei ole praktiline fosforiidi jaoks ja seejärel vaadatakse, kuidas sooritada puur- ja lõhketöid. Lankkaevandamise tehnoloogia jääb valikust välja põhjusel, et see muudab tulevikus fosforiidi kohal asuva põlevkivi kaevandamise võimatuks, sest kasutatakse laevaristamist ja see tähendab, et lae kohal asuvad kivimid ja maapind muutuvad liiga ebastabiilseteks. [8]

### 4.2.1 Kombainkaevandamise välistamine

Fosforiidi kiht asub tsementeerunud kvartsiivakivis, mis tähendab, et tegemist on äärmiselt abrasiivse kivimiga. Kaasüliõpilase Oliver Vilu lõputöö fosforiidi abrasiivsusest näitab, et tegemist on ülimalt abrasiivse kivimiga (1250 - 2000 g/t), keskmiseks abrasiivsuseks Toolse proovide põhjal on ligikaudu 1350 g/t, näiteks Kiviõlis asuval põlevkivil on sama näitaja ligikaudu 25 g/t (mitteabrasiivne), vahe kahe näitaja vahel on enam kui 50-ne kordne. Eelmisel sajandil läbiviidud katsetööde tulemused näitasid, et kombaini lõikehambad muutusid juba minutise töö jooksul punaseks ja nende kulumiskiirus oli tohutu suur ning seda isegi juhul, kui lõikehambad oli armeeritud ja oli teostatud eelkobestamine puur- ja lõhketöödega. Terve lõikehammaste komplekt tuli välja vahetada minuti või paari minuti tagant. Kombaintehnoloogia on küll edasi arenenud viimaste aastakümnete jooksul, kuid fosforiiti sisaldav liivakivi on endiselt ülimalt abrasiivne kivim. [2] [16]

### 4.2.2 Puur- ja lõhketöödega väljamine

Puur- ja lõhketöödega sooritatud väljamine jääb kombainkaevandamise väljalangemise tagajärjel ainsaks alternatiiviks. Selle jaoks on välja arvatud projekt, mille alusel lõhkamine toimub - tegemist on ühe eega ehk lõhatakse kogu ee ulatuses. Lõhkamist saaks teoorias teostada ka kahe (astmelise) eega, kuid siin töös seda varianti ei käsitleta selle keerukuse ja ebapraktilisuse tõttu. Ebapraktilisuse tõttu seepärast, et see tähendaks tsüklite arvu kahekordistamist sama koguse kättesaamiseks; tuulutuspauside kahekordistamist samamoodi. Järgnevad arvutused ja skeemid määravad puur- ja lõhketööde parameetrid.

Lõhkeaine erikulu arvutatakse järgmise valemiga:

$$q = q_1 * k_1 * k_s * K_p \text{ [kg / m}^3\text{]}, \quad (\text{Valem 15})$$

kus:

- $q_1$  - lõhkeaine normaalne erikulu [kg / m<sup>3</sup>];
- $k_1$  - kivimi struktuurist sõltuv parandustegur;
- $k_s$  - lõhatava kivimi suletustegur;
- $K_p$  - lõhkeaine erikulu parandustegur. [13]

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Keskmiselt tsementeerunud liivakivi lõhkeaine arvutuslik erikulu on 0,5 kg/m<sup>3</sup> (*lisa 1*). Kihilise ja lõhelise kivimi parandustegur on 1,4 (*lisa 2*). Kivimi suletustegur arvutatakse valemi 16 järgi ja lõhkeaine Senatel Powerfragi erikulu parandustegur on 1,05 (*lisa 3*). [5] [12]

Kivimi suletustegur arvutatakse järgmise valemiga:

$$k_s = \frac{3 * l_d}{\sqrt{A}}, \quad (\text{Valem 16})$$

kus:

- $l_d$  - lõhkeaugu keskmine sügavus [m];
- $A$  - ee ristlõike pindala [m<sup>2</sup>]. [13]

Kivimi suletustegur:

$$k_s = \frac{3 * l_d}{\sqrt{A}} = \frac{3 * 3}{100} = \mathbf{0,9}.$$

Lõhkeaine erikulu:

$$q = 0,5 * 1,4 * 0,9 * 1,05 = \mathbf{0,66 \text{ kg / m}^3}.$$

Ee edasinihke samm arvutatakse järgmise valemiga:

$$l_b = l_d * \eta \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 17})$$

kus:

- $l_d$  - lõhkeaugu keskmine sügavus [m];
- $\eta$  - lõhkeaugu kasutegur. [13]

Lõhkeaugu keskmine sügavus on võetud 3 meetrit (*lisa 4*) ja lõhkeaugu kasutegur jääb 0,7 - 0,95 vahele - autor valis 0,85.

Ee edasinihke samm:

$$l_b = 3 * 0,85 = \mathbf{2,55 \text{ m}}.$$

Korraga lõhatava kivimi ruumala arvutatakse järgmise valemiga:

$$V = A * l_b \text{ [m}^3\text{]}. \quad (\text{Valem 18})$$

kus:

- $A$  - ee ristlõike pindala [m<sup>2</sup>];
- $l_b$  - ee edasinihke samm [m]. [13]

Ee ristlõike pindala on 100 m<sup>2</sup> (10 x 10 m) ja ee edasinihke samm on arvatud 2,55 m.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Korraga lõhatava kivimi ruumala:

$$V = 100 * 2,55 = \mathbf{255 \text{ m}^3}.$$

Ee lõhkamiseks vajalik lõhkeaine kogus arvutatakse järgmise valemiga:

$$Q = q * V \text{ [kg]}, \quad (\text{Valem 19})$$

kus:

- $q$  - lõhkeaine erikulu [kg / m<sup>3</sup>];
- $V$  - korraga lõhatava kivimi ruumala [m<sup>3</sup>]. [13]

Lõhkeaine erikuluks sai arvatud 0,66 kg / m ja korraga lõhatava kivimi ruumala on 255 m<sup>3</sup>.

Ee lõhkamiseks vajalik lõhkeaine kogus:

$$Q = 0,66 * 255 = \mathbf{168,3 \text{ kg}}.$$

Lõhkeaukude arvuks on 31, arvestades ee lõhkamiseks vajalikku lõhkeaine kogust ja selle jagamist algmurde-, raima- ja kontuurlaengute vahel. Algmurde tüübiks on valitud prismaalgmurre; algmurde lõhkeauke on 7. Algmurde lõhkeaugud võetakse 10 - 20% pikemaks keskmisest lõhkeaugu pikkusest. [13]

Algmurde lõhkeaugu pikkus arvutatakse järgmise valemiga:

$$l_{\text{alg}} = l_d * t \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 20})$$

kus:

- $l_d$  - lõhkeaugu keskmine sügavus [m];
- $t$  - algmurde lõhkeaugu pikkuse tegur. [13]

Lõhkeaugu keskmine sügavus on valitud 3 m ja algmurde pikkuse teguriks 15%.

Algmurde lõhkeaugu pikkus:

$$l_{\text{alg}} = 3 * 0,15 = 3,45 \text{ m}.$$

Algmurdelaengute massiks on võetud 9,6 kg (neli padrunit massiga 2,4 kg 72 mm läbimõõduga), raimalaengute massiks 7,2 kg (kolm padrunit massiga 2,4 kg 72 mm läbimõõduga) ja kontuurlaengute massiks 3 kg (neli padrunit massiga 0,75 kg 45 mm läbimõõduga). Kõik padrunid on Senatel Powerfragid. [5] [12]

Topise pikkus algmurdelaengus arvutatakse välja järgmise valemiga:

$$L * t = l_{\text{alg}} - l_{\text{ch}} \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 21})$$



Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

kus:

- $l_{alg}$  - algmurde lõhkeaugu pikkus [m];
- $l_{ch}$  - algmurde lõhkeaugus oleva laengu pikkus [m]. [13]

Algmurde lõhkeaugu pikkuseks on arvatud 3,45 m ja lõhkeaugus oleva laengu pikkus on 2,08 m (4 x 0,52 m).

Topise pikkus algmurdlaengus:

$$L * t = 3,45 - 2,08 = \mathbf{1,37 \text{ m.}}$$

Topise pikkus raimalaengus arvutatakse välja järgmise valemiga:

$$l_{rl} = l_d - l_{ch} \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 22})$$

kus:

- $l_d$  - lõhkeaugu keskmine sügavus [m];
- $l_{ch}$  - raimalaengu lõhkeaugus oleva laengu pikkus [m]. [13]

Lõhkeaugu keskmine sügavus on valitud 3 m ja raimalaengu lõhkeaugus oleva laengu pikkus on 1,56 m (3 x 0,52 m).

$$l_{rl} = 3 - 1,56 = \mathbf{1,44 \text{ m.}}$$

Topise pikkus kontuurlaengus arvutatakse välja järgmise valemiga:

$$l_t = l_d - l_{ch} \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 23})$$

kus:

- $l_d$  - lõhkeaugu keskmine sügavus [m];
- $l_{ch}$  - kontuurlaengu pikkus [m]. [13]

Lõhkeaugu keskmine sügavus on valitud 3 m ja kontuurlaengu lõhkeaugus oleva laengu pikkus on 1,6 m (4 x 0,4 m).

Topise pikkus kontuurlaengus:

$$l_t = 3 - 1,6 = \mathbf{1,4 \text{ m.}}$$

Topise kulu arvutatakse järgmise valemiga:

$$t_p = \pi * d^2 / 4 * l_{top} * n \text{ [m}^2\text{]}, \quad (\text{Valem 24})$$

kus:

- $d$  - lõhkeaugu läbimõõt [m];
- $l_{top}$  - topise pikkuse [m];
- $n$  - lõhkeaukude arv. [13]

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Lõhkeaugu läbimõõt algmurde- ja raimalaengutel on 76 mm, kontuurlaengutel 51 mm. Topise pikkus algmurdlaengutel on 1,37 m, raimalaengutel 1,44 m ning kontuurlaengutel 1,4 m. Algmurdelaenguid on 7, raimalaenguid 8 ja kontuurlaenguid 16.

Topise kulu (76 mm läbimõõduga augu puhul):

$$t_p = \pi * 0,076^2 / 4 * 1,37 * 7 = \mathbf{0,044 \text{ m}^3}.$$

$$t_p = \pi * 0,076^2 / 4 * 1,44 * 8 = \mathbf{0,052 \text{ m}^3}.$$

Topise kulu (51 mm läbimõõduga augu puhul):

$$t_p = \pi * 0,051^2 / 4 * 1,4 * 16 = \mathbf{0,046 \text{ m}^3}.$$

Kokku kulub topist **0,142 m<sup>3</sup>** (0,044 m<sup>3</sup> + 0,052 m<sup>3</sup> + 0,046 m<sup>3</sup>).

Lõhkeaine tegelik kulu arvutatakse välja järgmise valemiga:

$$Q_{\text{tegelik}} = Q_{\text{alg}} + Q_r + Q_{\text{kt}} \text{ [kg]}, \quad (\text{Valem 25})$$

kus:

- $Q_{\text{alg}}$  - algmurdelaengute mass [kg];
- $Q_r$  - raimalaengute mass [kg];
- $Q_{\text{kt}}$  - kontuurlaengute mass [kg]. [13]

Algmurdelaengute mass on 67,2 kg (7 \* 9,6 kg), raimalaengute mass on 57,6 kg (8 \* 7,2 kg) ja kontuurlaengute mass on 48 kg (16 \* 3 kg).

Lõhkeaine tegelik kulu:

$$Q_{\text{tegelik}} = 67,2 + 57,6 + 48 = \mathbf{172,8 \text{ kg}}.$$

Lõhkeaine tegelik erikulu:

$$q_{\text{tegelik}} = \frac{Q_{\text{tegelik}}}{V} \text{ [kg / m}^3\text{]}, \quad (\text{Valem 26})$$

kus:

$Q_{\text{tegelik}}$  - lõhkeaine tegelik kulu [kg];  
 $V$  - korruga lõhatava kivimi ruumala [m<sup>3</sup>]. [13]

Lõhkeaine tegelik kulu on arvatud 172,8 kg ja korruga lõhatava kivimi ruumala on arvatud 255 m<sup>3</sup>.

Lõhkeaine tegelik erikulu:

$$q_{\text{tegelik}} = \frac{172,8}{255} = \mathbf{0,68 \text{ kg / m}^3}.$$

Puurtööde maht arvutatakse järgmise valemiga:

$$PT = PT_{\text{alg}} + PT_r + PT_{\text{kt}} \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 27})$$

Valemis esinevad tähised:

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

- $PT_{alg}$  - algmurde lõhkeaukude puurtööde maht [m];
- $PT_r$  - raimalaengute lõhkeaukude puurtööde maht [m];
- $PT_{kt}$  - kontuurlaengute lõhkeaukude puurtööde maht [m]. [13]

Algmurde lõhkeaukude puurtööde maht on 24,15 m (7 \* 3,45 m), raimalaengute lõhkeaukude puurtööde maht on 24 m (8 \* 3 m) ja kontuurlaengute puurtööde maht on 48 m (16 \* 3 m).

Puurtööde maht:

$$PT = 24,15 + 24 + 48 = \mathbf{96,15 \text{ m}}.$$

Puurtööde erimaht arvutatakse järgmise valemiga:

$$pt = \frac{PT}{V} [\text{m} / \text{m}^3], \quad (\text{Valem 28})$$

kus:

- $PT$  - puurtööde maht [m];
- $V$  - korraga lõhatava kivimi ruumala [ $\text{m}^3$ ]. [13]

Puurtööde maht on arvatud 96,15 m ja korraga lõhatava kivimi ruumala on arvatud 255  $\text{m}^3$ .

Puurtööde erimaht:

$$pt = \frac{96,15}{255} = \mathbf{0,38 \text{ m} / \text{m}^3}.$$

Puur- ja lõhketööde tulemused on kokku võetud järgmises tabelis:

Parameeter	Väärtus
Lõhkeaine erikulu	0,66 kg / $\text{m}^3$
Ee edasinihke samm	2,55 m
Korraga lõhatava kivimi ruumala	255 $\text{m}^3$
Ee lõhkamiseks vajalik lõhkeaine kogus	168,3 kg
Topise pikkus algmurdelaengus	1,37 m
Topise pikkus raimalaengus	1,44 m
Topise pikkus kontuurlaengus	1,4 m
Topise kulu tsükliks	0,142 $\text{m}^3$
Lõhkeaine tegelik kulu	172,8 kg
Lõhkeaine tegelik erikulu	0,68 kg / $\text{m}^3$
Puurtööde maht	96,15 m
Puurtööde erimaht	0,38 m / $\text{m}^3$

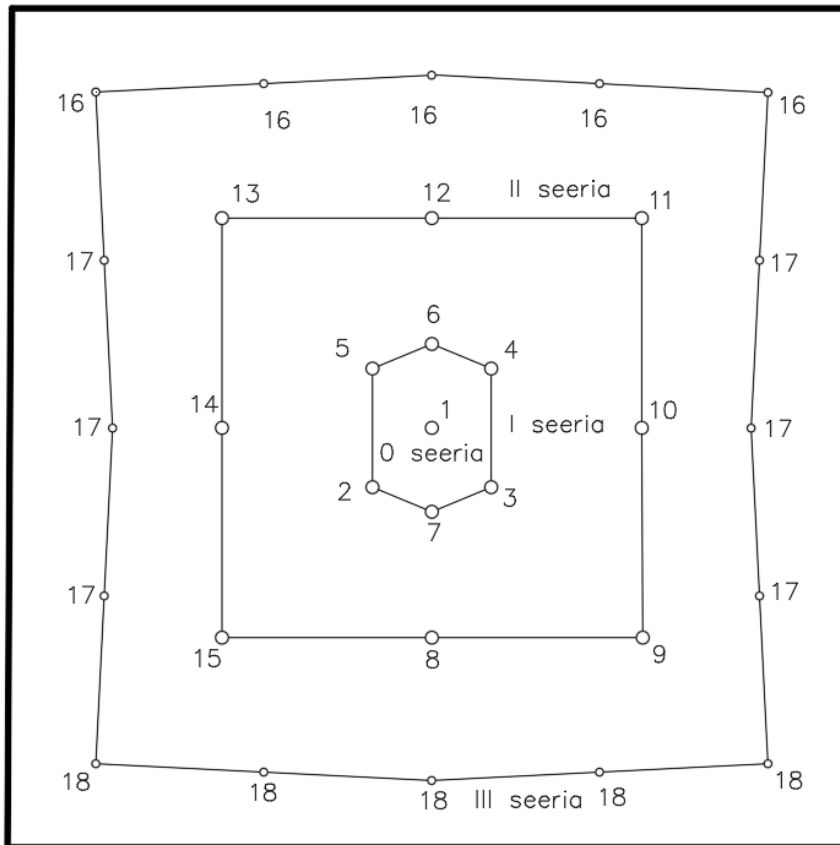
Tabel 7. Puur- ja lõhketööde arvutuslikud parameetrid.

Kõigepealt lõhatakse algmurdelaengud, seejärel raimalaengud ja lõpuks kontuurlaengud (joonis 6). Kontuurlaengud jäetakse viimaseks (sooritatakse järelkontuurimine), sest reeglina pärast raima- ja algmurdelaengute lõhkamist on lõhatud ee ristlõige ebaühtlane ning vajab ühtlustamist planeeritud tulemuste saavutamiseks. Järelkontuurimisel on oluline, et moodustuks vaba pind enne lõhkamist, seega raimalaengute ja kontuurlaengute vaheline viitesamm peab olema mitu sekundit. Laengute

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

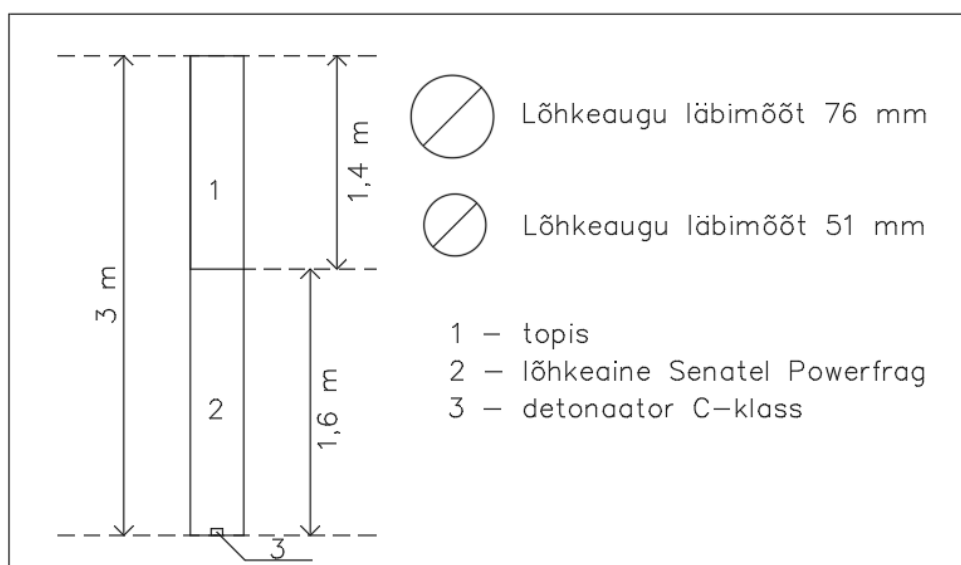
Jaagup Lööper

paigutamisel on nurkadest külgedeni liigutatud laenguid 0,1 meetri võrra külgedest eemale, et terviku külgede keskkohad, millel on toestamisel oluline roll, kahjustusi ei saaks, ja nurkadest laeni ning põrandani liigutatud laenguid 0,1 m võrra lähemale, et väljamist lihtsamini läbi viia ja toestust parandada. [13]



Joonis 6. Lõhkevõrgu skeem koos viidete paigutusega.

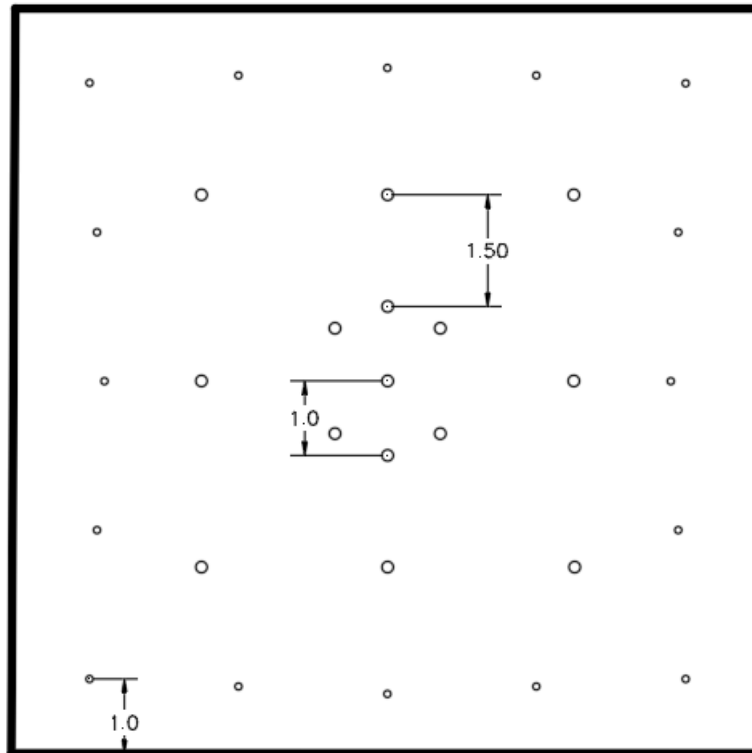
Lõhkeaugu lõige on näidatud järgmisel joonisel:



Joonis 7. Lõhkeaugu lõige.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

Lõhkeaukude paigutus ee ristlõikes on esitatud joonisel:



Joonis 8. Lõhkeaukude paigutus lõhkamisel.

### 4.2.3 Väljamise tehnoloogia valik

Väljamise tehnoloogia valikuks Kabala maardla fosforiidi kaevandamise puhul on puur- ja lõhketööd terve ee ulatuses. Lõhketööd sooritatakse lõhkeainega Senatel Powerfrag ja lõhatakse prisma-almurret kasutades ehk kõigepealt lõhatakse algmurde- siis raima- ja lõpuks kontuurlaengud. Mõnede parameetrite (tegurite) puhul selguvad täpsemad tulemused katselõhkamiste käigus. Kombainiga väljamise tehnoloogia on küll aastakümnete jooksul arenenud, kuid liivakivi on siiski ülimalt abrasiivne ning seetõttu ei ole tegemist efektiivse tehnoloogiaga. Puur- ja lõhketööde meetodit kasutades on võimalik ületada mehaanilise raimamise puudujäägid fosforiidi kaevandamisel.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

### 4.3 Toestamine

Toestamise ülesandeks on kaeveõõnte stabiilne püsimine ja lae üleval hoidmine. Toestamist vaadeldakse eraldi koristus- ja ettevalmistuskaeveõõnte puhul. Neist esimene on koristuskambrite ja toestamine ankurtoestikuga vahetu lae (Volhovi lademe lubjakivi) sidumiseks põhilae (Kunda lademe lubjakivi) külge ristkülikukujulise ristlâbilõikega kaeveõõnte korral ja teiseks võlvikujulise metallraamidest toestiku kasutamine võlvikujulise ristlâbilõikega ettevalmistuskaeveõõntes.

Vahetu lagi tuleb siduda põhilae külge, sest selle paksus on 2,3 meetrit, mis võib kaasa tuua kivimite lahtikihistumise; põhilae paksus on 7,7 meetrit. TTÜ (varasemalt TPI) poolt koostatud aruandes on märgitud, et minimaalne nõutav ankrusamm on 1,06; fosforiidikaevanduses soovitatakse kasutada ankrusammuks 1,2 m. Kambrisse, mille mõõtmed on 10 x 85, kulub ankurdamiseks 7 x 70 (veerud x read) ehk 490 ankrut; ankrute pikkus on 4 meetrit. Ankrute pikkus on valitud arvestades tegureid, et Volhovi lade on 2,3 m ja väike osa ankrust ulatub välja ning ankur peab piisavalt põhilae sees olema. Ankruid ei taaskasutata ehk need jäävad alaliselt lakke. Ristkülikukujulise lâbilõikega kaeveõõnte puhul on võimalus, et neile tuleb ka terastoestik ümber panna kuna kaevandatavad kivimid on nõrgemad kui laekivimid ning fosforiiti sisaldav liivakivi ja glaukoniitliivakivi muudavad mäerõhu käitlemise keeruliseks. [17]



Joonis 9. Toestamise skeem.

Võlvikujulise ristlõikega kaeveõõs nagu konveierstrek ja veostrek kasutatakse võlvikujulist metallist raamtoestikku, kuigi nende kaeveõõnte varutegurid on rohkem kui piisavad ka ilma terasvõlvideta. Toestikuraamide sammuks on 1,5 meetrit. 100 meetrise kaeveõõne kindlustamiseks kulub 67 terasvõlvi. Ka ristkülikukujulise lâbilõikega kaeveõõnte puhul on võimalus kasutada terastoestikke. Kuna külgedel asuvad pudedad kivimid, on võimalik, et kaeveõõntes peab võimalusel kasutama ka terasvõrku nii toestamise kui ka ohutuse seisukohast, kuid selles töös jääb terasvõrk ainult mainimise tasemele.

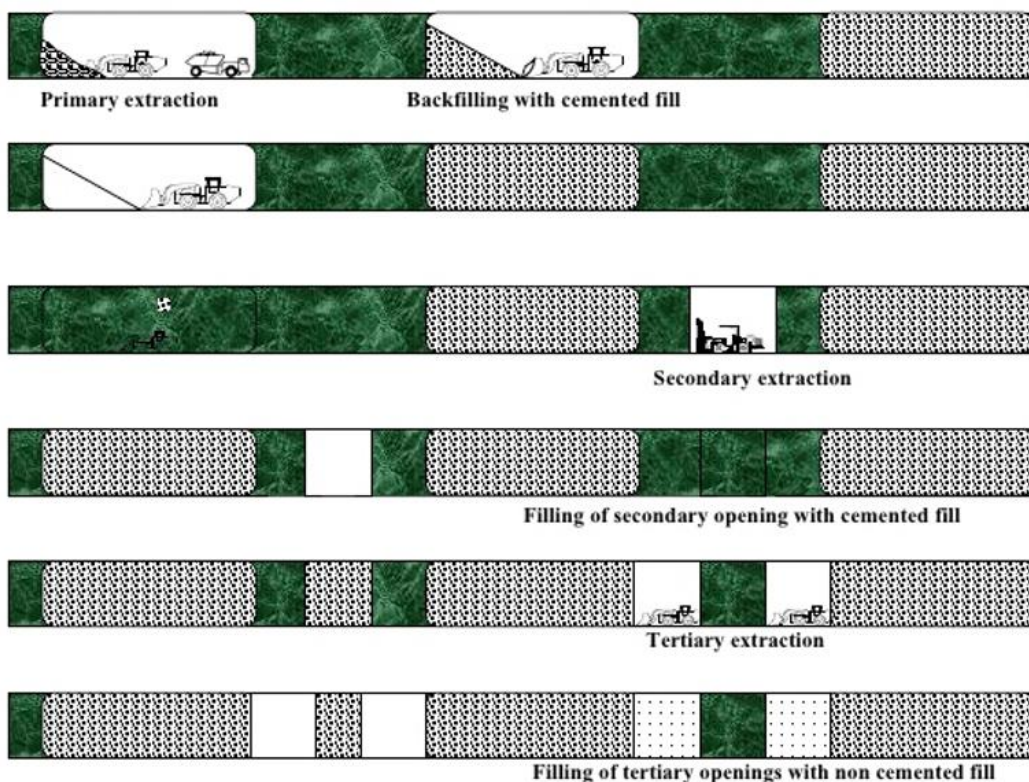
Piisavate toestuse saavutamiseks on vaja kasutada vastavate mõõtmete ja tugevusomadustega kaitse- ja tugitervikute, samuti on vaja kasutada ka ankruid vahetu lae sidumiseks põhilae külge liittalaks ning terasvõlve kaeveõõnte toetamisel; ankruid ei taaskasutata. Ühe kambri toestamiseks ankrutega, mille samm on 1,2 m, kulub 490 ankrut ning 100 meetri pikkuse võlvikujulise ristlõikega kaeveõõne toestamiseks läheb tarvis 67 terasvõlvi.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

#### 4.4 Täitmistööd

Täitmisel on kaks peamist eesmärki, millest esimene on kaevanduse peal asuva maa stabiilsuse hoidmine (vajumise ärahoidmine) ja hilisema põlevkivi (asub 30 meetri kõrgusel fosforiidikihi hindist) kaevandamise võimaluse säilitamine. [17]

Väljamine toimub fosforiidi kaevandamisel kahes etapis: esiteks väljatakse välja primaarkambriid (üle ühe), seejärel täidetakse primaarkambriid kivistuva täiteseguga, peale mida väljatakse sekundaarkambriid (samuti üle ühe), pärast väljamise lõpetamist korjatakse konveier kokku, ankrud jäetakse lakke ja alustatakse kambriid täieliku täitmist fosforiidi rikastusjääkidega (peamiselt liivaga) terve kambriidloki ulatuses. Täitesegu viiakse kaevandusse läbi torude, mis lähevad läbi tuulutussahtide, tuulutusstreki ja külgstreki kaudu mööda lage kambriidse. Kambriid täitumisel tõmmatakse torusid tagasi, et tagada ühtlane täituvus ning torude hõlpsam eemaldamine.



Joonis 10. Täieliku tagasitäitmise kaamberkaevandamise skeem. [14]

Tehistervikud moodustatakse põlevkivituhast ja fosforiidi rikastusjääkidest. 1980. aastatel läbiviidud katsetööd näitasid, et ühe kuuga on tehisterviku survetugevus 5,2 MPa, pooleteise kuuga 20 MPa ja poole aasta pärast 25 MPa. Järgmised arvutused kinnitavad põlevkivi kaevandamise võimalikust tulevikus tehistervikute kasutamise korral. [17]

Laekivimite lähenemistsoon arvutatakse valemiga:

$$H_{\rho} = k_{\rho} * t_e \leq N_m \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 29})$$

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

kus:

- $k_p$  - ohutegur;
- $t_e$  - efektiivne paksus [m];
- $N_m$  - vahekihi paksus [m]. [17]

Vahekihi paksus on 30 m ja ohutegur on 50.

Efektiivne paksus arvutatakse valemiga:

$$t_e = (h_k + h_H) * (1 - B_1) + B_1 * m \text{ [m]}, \quad (\text{Valem 30})$$

kus:

- $h_k$  - lae läbivajumine [m];
- $h_H$  - täitmise vajak [m];
- $B_1$  - vajumistegur;
- $m$  - kihi väljatav paksus [m]. [17]

Lae läbivajumise väärtuseks on 0,012 m, mis määrati Peterburi teadusinstituudi VNIMI markšeideri osakonna poolt kamberkaevandamise tehnoloogia kasutamisel lubjakivist lae puhul. Täitmise vajak on 0,2 m ja vajumistegur on - 0,026, mis on määratud kaevandustes teostatud eksperimentide järgi. Põlevkivituha kasutamine sideainena toob kaasa tehsterviku mahu suurenemise ja sellepärast on vajumistegur negatiivse väärtusega. Kihi väljatav paksus on 10 meetrit. [17]

Efektiivne paksus:

$$t_e = (0,012 + 0,2) * (1 + 0,026) + 0,026 * 10 = - \mathbf{0,042 \text{ m}}.$$

Laekivimite lähenemistsoon:

$$H_p = 50 * (-0,042) = - \mathbf{2,1 \text{ m}} \leq 30 \text{ m}.$$

Efektiivse paksuse negatiivne väärtus tähendab, et kogu väljatud kambri ruum on täidetud täiteseguga ja tardumisel maht suureneb ehk surub vastu lage. Sel juhul on pealmiste kihtide deformatsioonid praktiliselt olematud ja soovitatav tehnoloogia fosforiidi kaevandamiseks tagab põlevkivi kaevandamise ohutuse tulevikus. Maapinna häiritus sõltub edaspidi põlevkivi kaevandamise tehnoloogiast. [17]

Täitmistööd täidavad oma eesmärged ehk muudavad kaevevälja stabiilsemaks ja kindlustavad potentsiaali tulevikus põlevkivi kaevandada. Tehstervikute loomine fosforiidi rikastusjäädike ja põlevkivituha abil on praktiline variant - tehstervikute tugevusnäitaja on juba pooleteise kuu pärast 20 MPa ning poole aasta pärast 25 MPa. Tehstervikute mõju kohta näitavad arvutused, et lae vajumise asemel lagi hoopis tõuseb 4,2 cm. [17]



Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

## 4.5 Eetransport

Eetransport toimub fosforiidi kaevanduses laadurveokite ja lintkonveieriga. Lintkonveier on valitud põhjusel, et liivakivi abrasiivsus on liiga suur teiste alternatiivsete transpordivahendite (allmaakallurid, kraapkonveier, käppkonveier jm.) jaoks. Laadurveoki näiteks on võetud Sandvik LH514E. Tuleb ära märkida, et selles töös ei sooritata täpseid arvutusi transpordi läbiviimise jaoks, vaid protsessi hindamine toimub eelnevate osade ja masinate infolehtede põhjal.

Lintkonveier on paigaldatud kambriploki ühele küljele ning kambri läbimise käigus liigub konveier igasse eesse sisse. Kuna kambri pikkus on 85 meetrit siis mingist hetkest ei ole enam mõeldav, et laadurveok võtab kaevisse peale ning sõidab mitukümmend meetrit kambriploki seina juurde. Eesisese konveieri pikendamise puhul tuleb mõelda mõnele aspektile: esiteks tuleb lintkonveier hoida eerinna toimuvast lõhkamisest ohutus kauguses. Teiseks, kuidas mitte piirata masinate liikumist kuna konveieri ja masinate teed ristuvad. Lintkonveier on paigaldatud aleuroliidi sisse, et laadurveokil oleks lihtsam kaevisse konveierile laadida. Konveier tuleb paigaldada piisavalt sügavale aleuroliidi sisse ning ristuvatesse kohtadesse tuleb paigaldada üleminekud masinatele.

Edasi liiguks kaevis konveierstreki kaudu kogumispunkrisse, kuhu laskuvad kaevisse tõstmiseks peatõsteskipid. Alternatiivina saaks transpordi teostada ka allmaakallurite abil, kuid lintkonveier jääb siinsel juhul palju odavamaks kui masinate ost ja nende kasutamiseks vajaliku personali kulud. Igasse kambrisse on planeeritud üks laadurveok, kopamahuga 5,4 m<sup>3</sup>. Juhul, kui arvutuslik ee edasinihke maht on 255 m<sup>3</sup> / tsükli ja laaduri tsükli pikkus koos varuga on kaks minutit (ühe laadimistsükli kestvus on 12,1 sekundit), on võimalik koristustööd kambris läbi viia kahe tunni jooksul.

Lääne-Kabala fosforiidi maardlas viiakse eetransport läbi laadurveokeid ja lintkonveierit kasutades. Masinate valikul tuleb silmas pidada kopamahu ja ee edasinihke sammu suhet ning masina gabariite, et manööverdamisega ei tekiks raskuseid. Projekteerimisel tuleb tähelepanu pöörata kaeveõõnte ning konveierite ristumiskohtadele, kus oleks tagatud masinate manöövrid.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

## 5. Keskkonnakaitse

21. sajandil on keskkonnakaitse tähtsuse teadlikus ja soov seda säästa ühiskonnas oluliselt kasvanud. Igasugusel kaevandamisel on arvestatav mõju ümbritsevale keskkonnale. Kabala maardla asub lainjal maastikul, koosneb suures osas moreenist, mis tähendab, et tegemist on kvaliteetse põllumajandusmaaga; alale jäävad ka metsad ja teedevõrk. Erialased uuringud näitavad, et põllumajandusmaa ja metsade kvaliteet on kaevandatud aladel paranenud liigniiske maa kuivendamise tõttu. Keskkonnakaitse olulise tõttu on ka selles töös käsitletud keskkonnakaitse neid aspekte, mis hõlmavad maapinna, veerežiimi ja õhu kaitset. [8]

Korraliku ja turvalise vertikaalšahti loomiseks tuleb luua kaks asukohta, kus kooritakse kvaternaari pinnas (kuni 10 m) ära, sest lisaks peašahstile peab olema kaevanduses ka tagavara väljapääs tõsiste hädaolukordade jaoks; šaht rajatakse lubjakivisse. Sellele alale peavad mahtuma kaevanduse opereerimiseks vajalikud hooned, masinate liikumiseks ja personali teenindamiseks vajalik ruum ning kaevise tõstmiseks kui ka masinate ja personali tõstmiseks või laskumiseks tarvilik tsoon. Karstialade asumine maardla keskosas võib kaasa tuua vajumite tekke, seetõttu tuleb sooritada geotehniline ekspertiis kaevandamise mõjude ja nende esinemiste tõenäosuste analüüsiks. [8]

Peamised keskkonnamõjud fosforiidi kaevandamisel Kabalas on seotud veerežiimi muutustest. Märkimist väärib fakt, et kaevandusalal ei leidu graptoliitargiliiti, millel oli oluline keskkonnamõju nii Ülgasel kui ka Maardus. Fosforiidi kaevandamise mõju veetarbijatele avaldub maardlast kuni 30 km (depressioonilehtri raadiuse) kaugusele. Eksisteerib võimalus, et asulate puurkaeve tuleb sügavamaks teha. Mõjude maandamiseks on vaja kasutada erinevaid meetodeid ja teostada hinnalisi investeeringuid piisava veevoolu tagamiseks. Erinevate meetodite all mõeldakse järgmisi lahendusi (eelpool on neid mainitud geoloogiliste ja mäenduslike tingimuste peatükis):

- puhastatud kaevandusvesi tuleb juhtida Selja jõkke;
- maksimaalne vee taaskasutamine kaevandamisel;
- tehintervikute loomine tardsegust (põlevkivituhast ja rikastusjäädikdest);
- jäätmekäitlusrajatiste loomine tööstuspiirkonda;
- sanitaartsoonides olevate veekogude puhastamine. [17]

Kuna konkreetsed uuringud veerežiimi käitumisest ja geotehnilistest muutustest kaevanduse alal puuduvad, ei saa konkreetseid järeldusi teha. Eeldada võib, et maakasutamise kvaliteedi muutus on pigem positiivne kui negatiivne ning selle maht on minimaalne nagu ka õhukvaliteedi halvenemise mõju lõhketööde tõttu. Lõhketöödega väljamisel satub paratamatult õhku mürgiseid gaase, kuid nende kogus jääb marginaalseks. Kuna veerežiimi puudutavad uuringud tuleb kindlasti teostada, on autori meelest esmatähtis ka geotehnilise ekspertiisi teostamine karstide asumise tõttu maardla keskosas. [8]

Keskkonnamõjude tähtsus kaevandamisel on viimastel aastakümnetel kasvanud märkimisväärselt, ka tulevases fosforiidikaevanduses tuleb sellega hoolikalt tegeleda. Keskkonnakaitse fookuses on maapinna, veerežiimi ja õhu kaitse. Suure tõenäosusega maapind ei vaju fosforiidi

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

kamberkaevandamise tagajärjel, kuid seda peab kinnitama geotehnilise ekspertiisiga kuna maardla keskosas esinevad karstunud alad. Suuremahulise vee väljapumpamise käigus ulatub depressioonilehter kuni 30 km kaugusele. Õhku reostavateks teguriteks on liivas esinev kõrge kvartsi sisaldus ja lõhketöödega tekkivad mürgised gaasid. Nende tegurite kontrolli all hoidmine toob eduka keskkonnakaitse teostamise fosforiidi kaevandamisel. [8] [17]

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## 6. Ressursikulu ja omahinna prognoos kambriploki tasemel

Selles töös esitatakse tulude ja kulude prognoos (kambriploki tasemel) on üldistavat laadi üleüldise kujutluse andmiseks. Tuleb rõhutada, et kambriplokk on vaid üks osa kogu kaevandusest ja välja jäävad näiteks sellised osad nagu näiteks avamine- ja ettevalmistamine, juhtkonna palgad, kaevandamisel tekkivad riigilõivud, uued detailplaneeringud, veerežiimi haldamine ja kõik muu ühe efektiivse kaevandamise opereerimiseks vajalikud osad.

Kui kambri kõrguseks on 10 meetrit siis väljatakse sealt 110 000 m<sup>3</sup> kaevist, tuleb märkida, et glaukoniitliivakivi keskmine paksus on 1,0 m, järelikult fosforiidi osa kaevisest on 99 000 m<sup>3</sup>. Kambriplokis endas kaevise kadusid ei esine, sest mitmeosalise väljamise tagajärjel on võimalik terve kambri fosforiidist tühjaks teha (lõpuks jäävad kambriplokki täitma tehistervikud ja liiv). [16]

Kadusid arvestamata väljatakse kambriplokist 258 390 tonni fosforiitset kaevist. Oletame, et esineb kolm juhtu, kus esimesel on fosforiidi sisaldus kaevises 5%, teisel 10% ja kolmandal 15% ning lõpptoodangu hind 90 eurot / tonn (viimase viie aasta ligikaudne keskmine). Sellistel juhtudel saaksime lõpptoodangu massiks 39 150 tn, 78 300 tn ja 117 450 tn. Arvestades eeldatavat hinda oleks tuludeks 3,52 mln; 7,05 mln ja 10,57 mln eurot kambriploki kohta.

Ühe kambri pikkuse (85 m) läbimiseks tuleb sooritada 33 lõhketööde tsükli, väljatavaid kambreid on plokis 11, kokku tuleb kambrite läbimiseks teha 363 lõhkamist. Siia juurde tuleb lisada ka kambriplokis asuva kogumisstreki (10 meetrit lai) ja külgstreki (5 meetrit lai) läbindamist. Kambri peakäigu läbindamiseks kulub 43 lõhkamist (samaväärne lõhkamine nagu kambri läbindamisel) ja külgstreki läbindamiseks 31 lõhkamist (mahult ligikaudu poole väiksemad). Kokku kulub kambriploki peale 431 lõhkamist. Ühes suur-lõhketööde tsükli kulub 172,8 kg lõhkeainet; külgstreki puhul 86,4 kg. Kokku kulub kambriplokis lõhkeainet 70,2 tonni. Lõhkeaine hind on hinnanguliselt 92 s / kg kohta, seega lõhkeaine kuluks on 64 544 eurot. Topise kulu lõhkeaukude jaoks jääb 500 euro ringis, detonaatorite ja lõhkamisvahendite kulu samuti. Seega lõhketööde kulu on 66 044 eurot.

Ühe kambri (85 meetri pikkune) toestamiseks kulub 490 ankrut, ankruid on vaja paigaldada 11. kambresse, seega kokku kulub kambrite toestamiseks kasutada 5390 ankrut. Kambri kogumisstreki toestamiseks läheb vaja 637 (7 veergu ja 91 rida) ankrut ja külgstreki jaoks 364 (4 rida ja 91 veergu) ankrut. Kokku kulub kambriploki toestamiseks 6391 ankrut. Ühe ankrude hind on võetud 13 eurot, seega kogu kulu ankrute peale on 83 083 eurot.

Kambriplokis töötab esialgsel hinnangul korraga 18 töölise. Korraga käivad tööd kahes kambri (kaks laadurveoki juhti, kuus lõhketööde töötajat, kuus toestamise töötajat ning neli täitmise töötajat). Lõhketöödel, toestamisel ja täitmisel osaleb igal ühel üks abitöötaja. Brutopalga kulu ühe töölise kohta on 2409 euro ja abitöölisel 1606 eurot. Palgafondi suurus on töölisel 3223 eurot ja abitöölise puhul 2149 eurot. Kambriploki koosseisu arvestades teeb see palgafondi kogu suuruseks 25786 eurot kuus ehk 309 431 eurot / aastas. Siia lisanduvad nii preemiad kui ka tulemustasud, kuid selles töös neid sisse ei arvestatud.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Koristamiseks on valitud masinaks laadurveok Sandvik LH514E, mis kaalub 38 500 kg ja liigub elektri pealt. TTÜ poolt loodud mäemasinate kulu prognoosimiseks loodud metoodika väidab, et masina hind on üldjuhul 10 dollarit / kg ehk hetkeseisuga 9 eurot / kg, mis teeks masina hinnaks 346 500 eurot ja lisakulud (transport, maksud jms.) teevad kokku hinnaks 454 320 eurot ja kuna ühes kambris on kaks laadurveokit, on ploki peale soetamise kulu 908 640 eurot. Prognoositav masinakulu tuleb 211 376 eurot masina kohta ehk 422 752 eurot kambriploki peale aasta kohta. [7] [9]

Lõhkeaukude puurimise masinaks on Sandvik DD421, mille kaal on 24 500 kg täisvarustuses; elektritoitega. Ostuhinnaks tuleb 220 500 eurot masina kohta, soetamiskulu on 290 520 eurot masina kohta ehk kambriploki peale 581 040 eurot. Masinakulu aasta peale on 136 301 eurot / masin, kambriploki kohta 272 602 eurot aastas. [7] [10]

Ankrute paigaldamise jaoks on valitud Sandvik DS411, mis kaalub 23 000 kg täisvarustuses ning on elektritoitega. Masina ostuhinnaks on 207 000 eurot ja selle soetamiskuluks 272 970 eurot, mis teeb kambriploki peale 545 940 eurot. Masinakulu aasta kohta on 128 257 eurot masina kohta ehk 256 514 eurot kambriploki kohta. [7] [11]

Juhul, kui ühe kambriploki tööiga on kaks aastat, tuleb kuludeks 4 707 301 eurot. Kuludesse pole arvatud täitesegu maksumust - täitmisele läheb 11 kambrit ruumalaga 8500 m<sup>3</sup>, mis teeb 93 500 m<sup>3</sup> täitesegu. Teiselt poolt on tegemist esimese kambri maksumusega, kui masinate ostuhinnad eemaldada (üks kambriploki jaoks mõeldud masinapark suudab teenindada mitut kambriplokki) siis jääks opereerimise kuluks 2 671 681 eurot. Praktilisemast vaatenurgast vaadates on selge, et ka kõik töölised ega masinad ei opereeriks tervet kambriploki ea jooksul, sulgemise osas töötaks ainult täitmisega hõivatud töölised ja masinad.

Kulu- / tuluartikkel kambriploki kohta	Summa (eurodes)
Fosforiidi sisaldus kaevises 5%	+ 3 520 000
Fosforiidi sisaldus kaevises 10%	+ 7 050 000
Fosforiidi sisaldus kaevises 15%	+ 10 570 000
Lõhketööd	- 66 044
Ankrud	- 83 083
Palgafond / aastas	- 309 431
Laadurveoki Sandvik LH514E soetamine (2 tk)	- 908 640
Laadurveoki Sandvik LH514E hoolduskulud / aastas (2 tk)	- 422 752
Puurmasina Sandvik DD421 soetamine (2 tk)	- 581 040
Puurmasina Sandvik DD421 hoolduskulud / aastas (2 tk)	- 272 602
Ankrute paigaldamise masin Sandvik DS411 soetamine (2 tk)	- 581 040

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.

Jaagup Lööper

Ankrute paigaldamise masin Sandvik DS411 hoolduskulud / aastas (2 tk)	- 256 514
Esialgne maagi omahind	9,40 eurot / tonn

*Tabel 8. Esialgsete kulu- ja tuluallikad.*

Tulude ja kulude poolt võrreldes on selge, et oletades eeldatavat fosforiidi sisaldust kaevises ja võrreldes seda maailmaturu hinnaga, on autori hinnang, et kaevandus oleks majanduslikult kahjumlik ettevõtmine. 11 aastat tagasi oli fosforiidi maailmaturu hind peaaegu 400 eurot, sellisel juhul oleks ka potentsiaalne tulu teine. Autori arvates tasub kaevandamisväarsuse peale mõelda mitte enne kui maailmaturu hind on 250 eurot / tonn.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## 7. Järeldused ja kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla näitel.

Kabala maardlas Pakerordi lademes on ligikaudu 600 miljonit tonni fosforiie maaki. Kasuliku kihi keskmine paksus on 7,6 meetrit. Maardla paikneb Rakvere linnast ligikaudu 15 kilomeetri kaugusel, mis tähendab märkimisväärseid mõjusid kohalikule kogukonnale.

Fosforiidi kaevandus avatakse vertikaalšahtiga. Kaevandamine toimub kamberkaevandamisega koos täieliku tagasitaitmisega; kambreid toetavad linttervikud. Väljamise tehnoloogiaks Kabala maardlas on puur- ja lõhketööd. Fosforiiti sisaldav liivakivi on üliabasiivne, sellepärast ei ole võimalik kaevandamist teostada mehaanilise raimamisega. Puur- ja lõhketööde meetodiga ületatakse mehaanilise raimamise puudused fosforiidi kaevandamisel. Tagasitaitmine toimub tehistervikute loomisega, mis koosnevad rikastusjääkidest ning põlevkivituhast toodetud täiteseguga. Arvutused näitavad, et 90. päeva möödudes on tehisterviku survetugevus 20 MPa ning 180. päeva möödudes 25 MPa. Tehistervikute kasutamine võimaldab tulevikus ka põlevkivi kaevandada, mis asub fosforiidi lasundist 30 meetrit kõrgemal. Eetranspordiks kasutatakse laadurveokeid ja lintkonveierit.

Praeguse maailmaturu hinna juures oleks kaevandamine suure tõenäosusega majanduslikult kahjumlik projekt. 11 aastat tagasi oli fosforiidi maailmaturu hind peaaegu 400 euro. Autori hinnangul muutub fosforiit kaevandamisväärseks, kui maailmaturu hind on rohkem kui 250 eurot / tonn.

Edasisi uuringuid ei ole tarvilik teostada enne kui pole loodud fosforiidilasundist 3D-mudelit. Lisaks mudelile tuleb detailselt uurida nii kivimite kui ka massiivi omadusi. Isegi mudeli olemasolul kulub aastaid või isegi aastakümneid, kuni fosforiidi maailmaturu hinna tõuseb piisavalt, et muuta fosforiidi kaevandamine majanduslikult kasumlikuks. Igast töös käsitletud peatükist on võimalik koostada veel eraldi detailsem uurimistöö.

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## Kasutatud kirjandus

1. Hoek, E., & Wood, F. W. (1987). Support in Hard Rock Underground Mines. *Underground Support Systems*, 1-6.
2. Kalman, L. (1964). *Uute kaevandamisviiside variantide katsetamine Maardu fosforiidikaevanduses*. Tallinn: Tallinna Polütehniline Instituut.
3. Kanter, S. (2017). *Jõhvi rauamaagikaevanduse avamise eelprojekt*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
4. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. (13. Aprill 2017. a.). Eesti Geoloogiateenistuse moodustamine.
5. Orica. (21. Veebruar 2018. a.). Senatel Powerfrag.
6. Pastarus, R.-J. (2011). Kivimimehaanika. Tallinn.
7. Reinsalu, E. (2008). *Mäemajandus*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
8. Reinsalu, E. (2016). *Eesti mäendus I*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
9. Sandvik. (2017). Sandvik LH514E Electric Loader.
10. Sandvik. (2018). Sandvik DD421 Development Drill.
11. Sandvik. (2018). Sandvik DS411 Rock Support Bolter.
12. SSE. (1. Jaanuar 2018. a.). Senatel Powerfrag.
13. Tomberg, T. (2017). *Lõhketööd I*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
14. Tomberg, T. (2018). Allmaakaevandamine ja projekt. Tallinn.
15. Tomberg, T., & Väli, E. (2018). Mäetööd ja mäemasinad. Tallinn.
16. Vilu, O. (2019). *Fosforiidi optimaalse väljamismeetodi valik Kabala maardla tingimustes*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
17. Арукюла, Х. (1987). *Исследование комплексных технологических решений подземной разработки фосфоритно-сланцевых месторождений Эстонской ССР*. Таллинн: Таллинский политехнический институт.
18. Борисов, А. А. (1980). *Механика горных пород и массивов*. Москва: Недра.
19. Куусметс, Ю. (1986). *Рациональная топология сети и проектирование проведения капитальных и подготовительных выработок эстонского фосфоритного рудника*. Таллинн: Таллинский политехнический институт.



## Lisad

### Lisa 1. Tabel lõhkeaine arvutuslikust erikulust

Kivimi nimetus	Lõhkeaine arvutuslik erikulu (kg/m <sup>3</sup> )		
	Väljapaiske-laeng	Kobestus-laeng	Välislaeng
Liiv	1,5...1,7	-	-
Tihe või niiske liiv	1,2...1,3	-	-
Kasvupinnas	0,5...0,8	-	-
Saviliivmoreen	1...1,5	0,35...0,4	-
Tugev savi	1...1,3	0,35...0,45	-
Kriit	0,8...0,95	0,25...0,3	1,3
Kips, mergel, opooka	1...1,3	0,35...0,45	1,3...1,4
Külmunud kasvupinnas või liiv	1,2...1,7	0,4...0,6	1,35...1,5
Ülinõrk lubjakivi	1,5...1,75	0,5...0,6	1,4...1,5
Bretša või konglomeraat	1,15...1,4	0,4...0,5	1,4...1,5
Keskmiselt tsementeerunud liivakivi, savikilt, nõrk lubjakivi	1,15...1,4	0,4...0,5	1,5...1,6
Tugev liivakivi, keskmine lubjakivi, dolomiit	1,3...1,7	0,45...0,6	1,6...1,7
Tugev lubjakivi	1,3...2,1	0,45...0,7	1,7...1,8
Graniit	1,5...2,15	0,5...0,7	1,7...1,9
Külmunud moreen	1,6...2,1	0,6...0,7	
Basalt, andesiit	1,75...2,3	0,6...0,75	1,8...2
Kvartsiit	1,5...1,75	0,5...0,6	1,9
Külmunud savi või ehituspraht	2...2,7	0,7...0,9	2,4...3

Lisa 1. Lõhkeaine arvutuslik erikulu.<sup>[12]</sup>

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

## Lisa 2. Tabel kivimi struktuuritegurist

Kivimi iseloomustus	Kivimi struktuuritegur
Sitked, elastsed, poorsed kivimid	2
Kihilised ja lõhelised kivimid	1,4
Kildastunud, tugevalt lõhenenud kivimid	1,3

Lisa 2. Kivimi struktuuritegur. <sup>[12]</sup>

Fosforiidi allmaakaevandamise tehnoloogilise skeemi valik Kabala maardla tingimustes.  
Jaagup Lööper

### Lisa 3. Tabel lõhkeaine erikulu parandustegurist

Lõhkeaine	Parandustegur $K_p$	Lõhkeaine	Parandustegur $K_p$
Ammoniid 6 ŽV	1,0	ANFO	1,2
TNT	1,0	Senatel Powerfrag	1,05
Fortis Advantage 70	1,2	<u>Subtek</u> <u>Charge CS</u>	1,4
Dünamiidid	0,7 – 0,8	Nobelit 216 EP	1,24

Lisa 3. Lõhkeaine erikulu parandustegur. <sup>[12]</sup>

**Lisa 4. Tabel lõhkeaugu soovitatavast sügavusest sõltuvalt kõvadustegurist**

Kivimi kõvadustegur prof. M. Protodjakonovi järgi	Lõhkeaugu soovitatav sügavus (m)
horisontaal- ja kaldkaeveõõned	
kuni 3	2,0...3,5
3...6	1,5...2,5
üle 7	1,2...2,2
vertikaalkaeveõõned	
kuni 9	2...3
üle 9	1,5...2

Lisa 4. Lõhkeaugu soovitatav sügavus sõltuvalt kõvadustegurist. <sup>[12]</sup>