



Loodusteaduskond
Geoloogia instituut

FOSFORIIDI OPTIMAALSE VÄLJAMISMEETODI VALIK KABALA MAARDLA TINGIMUSTES

Bakalaureusetöö
Töö ID: 1932B

Üliõpilane: Oliver Vilu
Matrikli nr. 164351YAEB
Juhendaja: Tõnu Tomberg, MSc, lektor
Õppekava: Geotehnoloogia

Tallinn 2019

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: Oliver Vilu

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Tõnu Tomberg

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Tallinna Tehnikaülikool
Geoloogia instituut
Lõputöö ülesanne

Töö ID	1932B	Õppekava	YAEB14/15
Üliõpilane	Oliver Vilu	Matrikli nr.	164351YAEB
Töö liik	Bakalaureusetöö	Õppeaine kood	LG40LT
Juhendaja	Tõnu Tomberg	Ülesanne kehtib kuni	Esitamise kuupäev


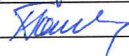
Töö ülesanne	Fosforiidi optimaalse väljamismeetodi valik Kabala maardla tingimustes
Topic of the Thesis	Selection of optimal breaking method for phosphate ore in conditions of Kabala deposit

Töö sisu põhipunktid	<ol style="list-style-type: none">1. Ülesande püstitus. Üldteave2. Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused3. Väljamismeetodi valiku aluseks olevad füüsikalise-mehaanilised omadused<ol style="list-style-type: none">3.1. Fosforiidi ja põlevkivi abrasiivsuse määramine4. Fosforiidi võimalikud väljamismeetodid5. Fosforiidi väljamismeetodite võrdlev analüüs<ol style="list-style-type: none">5.1. Mehaaniline väljamine5.2. Puur-lõhketöödega väljamine5.3. Optimaalse väljamismeetodi valik6. Järeldused ja kokkuvõte
----------------------	--

Seotud teadusteema ja/või sihtasutus	Eesti Geoloogiateenistus,
--------------------------------------	---------------------------

Tähtajad

Eelkaitsmine	31. mai 2019	Kaitsmine	7. juuni 2019
--------------	--------------	-----------	---------------

Üliõpilane	Oliver Vilu		23. mai 2019
Juhendaja	Tõnu Tomberg		23. mai 2019
Konsultant			
	nimi	allkiri	kuupäev

Ülesanne kinnitatud	_____
Ülesanne täpsustatud	_____
Ülesanne pikendatud	_____

Annotatsioon

Eestis asub üks Euroopa suurimatest fosforiidimaardlatest – Rakvere fosforiidimaardla. Rakvere fosforiidimaardlas olevate keeruliste geoloogiliste ja mäenduslike tingimuste tõttu pole fosforiidile leitud väljamistehnoloogiat.

Optimaalse väljamismeetodi valikuks peab teadma kivimi füüsikalisi-mehaanilisi omadusi. Üks olulisemaid kivimi omadusi on selle abrasiivsus. Abrasiivsuse teada saamiseks võeti välitöödel fosforiidi proove ja põlevkivi referentsproove. Proovidega katsetati abrasiivsust LCPC meetodil ja punktkoormustesti. Katsetest saadud andmete analüüsi põhjal valiti parim väljamismeetod potentsiaalsele allmaakaevandusele, mis asuks Rakvere maardla Kabala uuringualas.

Abstract

Estonia has one of the biggest phosphorite deposits in Europe – Rakvere phosphorite deposit. Due to complicated geological and mining conditions, no-one has created a breaking method for phosphate ore.

Phosphate ore physical and mechanical properties determine the method for rock breaking. One of the most important properties is its abrasivity. To determine the abrasivity of phosphate rock, fieldworks were carried out where phosphate rock and oil shale were collected. The rock samples were tested for abrasivity using LCPC method and for strength point load test. Using data gathered from the tests an optimal rock breaking method was chosen for an underground mine in Rakvere phosphorite deposit Kabala exploration field.

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Annotatsioon	3
Abstract.....	4
Sisukord.....	5
Tabelid.....	6
Joonised	7
Sissejuhatus.....	9
Fosforiidi tähtsus Eestis ja Euroopa liidus.....	10
Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused	13
Proovide võtmine.....	16
Väljamismeetodi valiku aluseks olevad füüsikalised-mehaanilised omadused	18
Fosforiidi ja põlevkivi abrasiivsuse määramine	18
Abrasiivsuse leidmise meetoodika.....	19
Fosforiidi ja põlevkivi abrasiivsuse tulemused.....	21
Mida näitab LCPC abrasiivsuse test	22
Punktkoormustesti meetoodika	23
Fosforiidi ja põlevkivi punktkoormustesti tulemused.....	24
Katsetuse järelused.....	25
Fosforiidi võimalikud väljamismeetodid	27
Mehaaniline väljamine.....	27
Puur- ja lõhketööd	28
Termiline väljamine.....	29

Keemiline väljamine.....	29
Varasemad katsetööd kombainiga	30
Fosforiidi väljamismeetodite võrdlev analüüs	32
Mehaaniline väljamine.....	32
Puur-lõhketöödega väljamine.....	36
Optimaalse väljamismeetodi valik	38
Puur-lõhketööde analüüs.....	38
Pikk-ee kombaini analüüs	38
Järeldus	38
Kokkuvõte	39
Lisad	40
Kasutatud kirjandus	46
Metaandmed	49
Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks	50

Tabelid

Tabel 1. Suurimad fosforiidi tootjad. [10].....	11
Tabel 2. Fosforiidi, fosforhappe, DAP ja MAP toodangu- ja ekspordimahud. [10].....	12
Tabel 3. Katsekehade jagunemine abrasiivsuse klassidesse. [16]	20
Tabel 4. Katsekehade jagunemine peenestatavuse klassidesse. [14]	20
Tabel 5. Fosforiidi ja põlevkivi LCPC meetodil abrasiivsuse katsetamise tulemuse kokkuvõte.....	21
Tabel 6. Ülgase fosforiidi, Toolse fosforiidi ja Põhja-Kiviõli II põlevkivi punktkoormustesti tulemuste kokkuvõte.....	24

Tabel 7. Toolse fosforiidiproovide abrasiivsus.....	40
Tabel 8. Ülgase fosforiidiproovide abrasiivsus.....	41
Tabel 9. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääri põlevkiviproovide abrasiivsus.	42
Tabel 10. Ülgase fosforiidiproovide punktkoormustesti tulemused.	43
Tabel 11. Toolse fosforiidiproovide punktkoormustesti tulemused.....	44
Tabel 12. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääri põlevkiviproovide punktkoormustesti tulemused.....	45

Joonised

Joonis 1. Fosforiidi hind 6 kuu lõikes eurot tonni kohta [8] [9]	10
Joonis 2. Fosforiidi ja fosfori majandusliku tähtsuse ja tarneriski 2017. aasta hindamise tulemus. [7]	11
Joonis 3. Rakvere fosforiidimaardla koos Toolse ja Aseriga. (1) Fosforiidi leviku põhjapiir; (2) rikkevööndid; (3) passiivne tarbevaru; (4) passiivne reservvaru; (5) prognoosvaru. [12]	13
Joonis 4. Lihtsustatud Kabala uuringuvälja tüüpläbilõige. [13]	15
Joonis 5. Fosforiidiproovide kogumine Toolses.	16
Joonis 6. Ülgase fosforiidikaevanduses paljanduv fosforiidikiht	16
Joonis 7. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääris töötav mäekombain Wirtgen 2500 SM. Põlevkivi referentsproove koguti samast kohast.....	17
Joonis 8. Wille Geotechnik abrasiivsuse määramise seade AT 1	18
Joonis 9. Abrasiivsuse määramise seade AT 1 ja selle osad [15]	19
Joonis 10. (vasakul) Impelleri pöörlemise tööpõhimõte; (paremal) Impeller enne pöörlemist ja peale pöörlemist. [15]	20
Joonis 11. CAI ja LCPC vaheline lineaarne korrelatsioon, kasutades Büchi (1995) andmeid. [17]	22
Joonis 12. PKT masin koos purustatud fosforiidiga.	24
Joonis 13. Ülgase fosforiidi <1,6 mm fraktsioon.	25

Joonis 14. Toolse fosforiidi 1,6 - 4 mm fraktsioon.....	26
Joonis 15. Ülgase fosforiidi 1,6 - 4 mm fraktsioon.....	26
Joonis 16. Kombaini tööskeemid, ühepoolne tööskeem (a), süstiktööskeem (b). Varistatud lagi (1); tööesi (2); kaevandatav materjal (3); töösuund (4); tühikäigul liikumine (5) [19].....	28
Joonis 17. Kombaini lõikehambad peale 50 cm edasi liikumist. (vasakul) Eestvaade, (paremal) külgvaade. [2].....	31
Joonis 18. Tangetsiaal-pöötlev lõikehammas, lõikehamba hoidikus. [24].....	33
Joonis 19. Erinevad viisid lõikehamba kaitsmiseks karbiidiga, a) standardne lõikehammas, b) keevitatud lõikehambad, c) lõikehammas paagutatud karbiidist rõngaga, d) lõikehammas rõngaga, e) alandatud kehaga paagutatud karbiidist CAP-tüüpi lõikehammas [25]	34
Joonis 20. Algmurrete tüübid allmaa- lõhketöödel. a) laealgmurre, b) põhjaalgmurre, c) külgalgmurre, d) püstkill-algmurre, e) rõhtkiil- algmurre, f) püramiidalgmurre, g) koonusalgmurre, h) prisma- algmurre, i) pilu-algmurre, k) spiraalalgmurre [26]	36
Joonis 21. Kivimi purunemine laengu plahvatusel vaba pinna läheduses. 1) laeng, 2) suruala, 3) kobestusala, 4) lõhede tekkimise ala	37

Sissejuhatus

Eestis asub üks Euroopa suurimaid fosforiidimaardlaid. Rakvere fosforiidimaardlas on 839 728 tuh. tonni passiivset tarbevaru, 1 098 605 tuh. tonni passiivset reservvaru ja 8 395 845 tuh. tonni prognoosvaru. Kogu maardla pindala on 14 048,6 ha. [1]

Eesti fosforiidi, mis lasub nii sügaval, et seda ei saa kaevandada pealmaakaevanduses, jaoks ei ole loodud veel väljamistehnoloogiat. Keeruliseks teeb oobulusliivakivi lasundi ebakorrapärane paiknemine ja selle sügavus. Oobulusliivakivi peal asuvad kaaskivimid glaukoniitliivakivi, graptoliitargiliit ja põlevkivi, mida tuleb tulevikus tõenäoliselt komplekselt kaevandada.

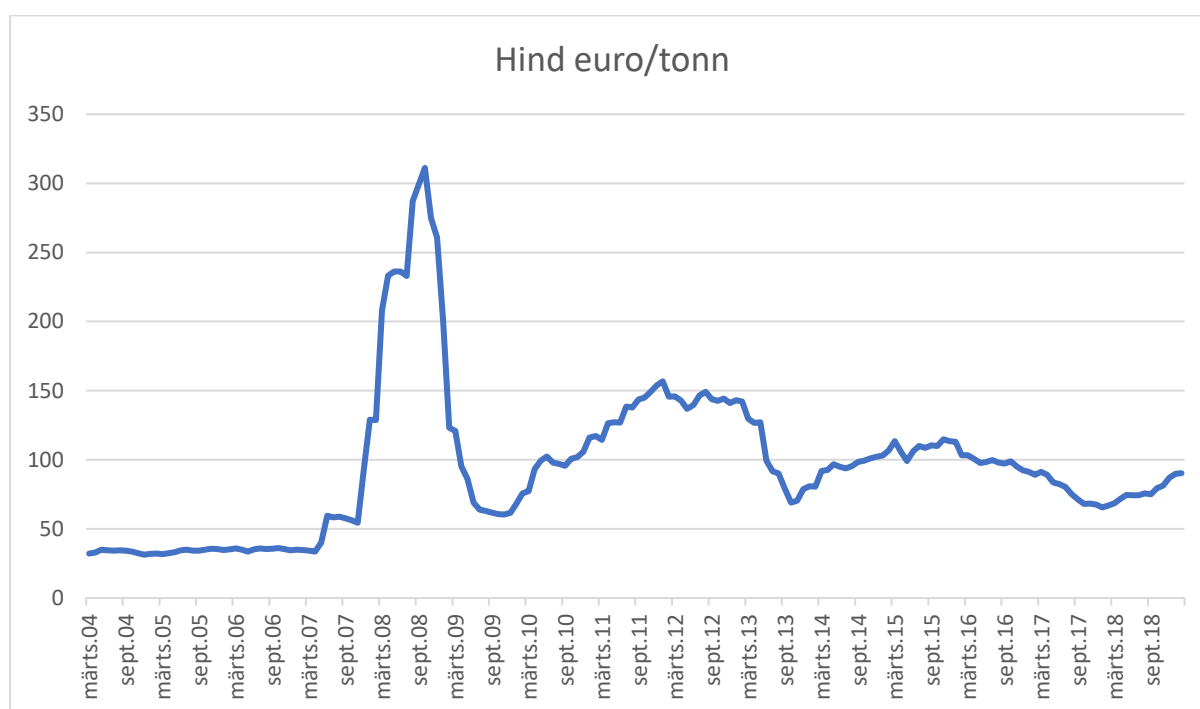
Kaevandamistehnoloogiat välja töötades on olulised kivimite mehaanilised ja füüsikalised omadused nagu näiteks survetugevus, tõmbetugevus, elastsusmoodul, punktkoormusindeks jne. Üks suuremaid põhjuseid, miks kuluvad masinate liikuvad osad ja lõikehambad on aga kivimi abrasiivsus. Varasemalt ei ole fosforiidi puhul uuritud selle abrasiivsust ning kuidas see mõjutab väljamistehnoloogiat. Ainukeseks informatsiooniks on värvikas näide, kui tehti 1964. aastal uurimistöö – „Uute kaevandamisviisi variantide katsetamine Maardu fosforiidikaevanduses“. Katsed Maardu fosforiidikaevanduses kasutada söekombaini K-52M kukkusid läbi fosforiidi kõrge abrasiivsuse tõttu. [2] Kivimite abrasiivsust ei ole seni arvestatud, sest puudub ühtne arusaam selle mõõtmises. [3] Erinevaid mooduseid kasutatakse määramiseks (CERCHAR, LCPC, NTNU, Core abrasion test). [4] Käesolevas töös kasutati abrasiivsuse mõõtmiseks LCPC meetodit.

Fosforiidi abrasiivsuse leidmiseks võeti kivimiproove Ülgase fosforiidikaevanduses ja Toolse jõe kaldal olevalt paljandilt. Põlevkivi referentsproovid võeti Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjäärast. Seejärel tehti, autori poolt, kõikide proovidega abrasiivsuse katsed LCPC meetodil ja punktkoormustest.

Käesoleva bakalaureusetöö teema pakuti mulle Geoloogiateenistuse poolt 2018. aasta suvel, kui ma seal praktikal viibisin. Bakalaureusetöö eesmärk on valida parim läbindamistehnoloogia fosforiidi allmaakaevandamiseks Rakvere fosforiidimaardla Lääne-Kabala tingimustes. Antud töös lähtutakse väljamismeetodi valikul maavara abrasiivsusest.

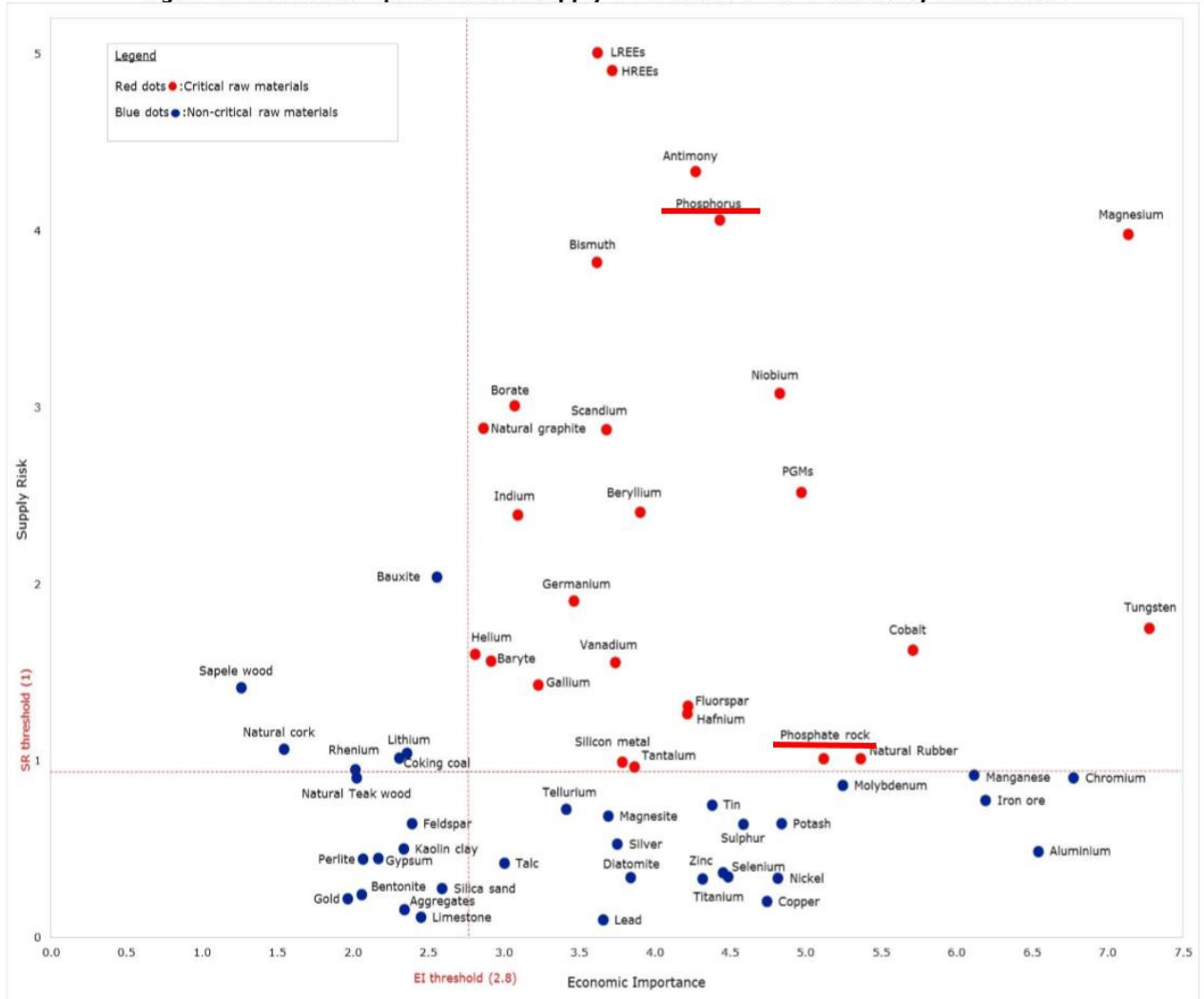
Fosforiidi tähtsus Eestis ja Euroopa liidus

Fosforiit on olulise tähtsusega maavara nii Eestis kui ka Euroopa Liidus. Aastal 2011 loodi Euroopa Liidu poolt esimene teatis toorainete ja maavarade tähtsuse hindamise kohta nimega: „KOMISJONI TEATIS EUROOPA PARLAMENDILE, NÕUKOGULE, EUROOPA MAJANDUS- JA SOTSIAALKOMITEELE NING REGIOONIDE KOMITEELE KAUBATURGUDE JA TOORAINEGA SEOTUD PROBLEEMIDE LAHENDAMINE“. Teatises juhiti tähelepanu olukorrale, kus majanduskriisi ajal 2007-2008. aastal tekkis kaubaturgudel järsk hinnatõus, seejärel 2008. aasta teisel poolel hakkasid hinnad tugevalt langema ning 2009. aasta suvest hakkasid hinnad uuesti tõusma. Äärmiselt volatiilne turg põhjustas tarbijahindades hinnamuutusi ja põhjustas kohati sotsiaalseid rahutusi ja puudusi. [5] 2014. aastal täiendati Kriitiliste Toorainete nimekirja fosfaatmaagiga. [6] 2017. aastal lisandus nimekirja fosfor. [7] Euroopa Liidu poolt Kriitiliste Toorainete nimekirja lisatud maavarad ja toorained on kõige suurema potentsiaaliga maavarad, mida kaevandada lähitulevikus ja me peaksime ennast kursis hoidma nende kasutamise osas.



Joonis 1. Fosforiidi hind 6 kuu lõikes eurot tonni kohta. [8] [9]

Figure A: Economic importance and supply risk results of 2017 criticality assessment



Joonis 2. Fosforiidi ja fosfori majandusliku tähtsuse ja tarneriski 2017. aasta hindamise tulemus. [7]

Suurimad fosforiidi tootjad maailmas on 2015. aasta andmetel:

Riik	Toodang mln. tonni
Hiina	83
Ameerika Ühendriigid	27
Maroko	26,2
Venemaa	11,5
Jordaania	8,3
Brasiilia	5,4

Tabel 1. Suurimad fosforiidi tootjad. [10]

Väiksemad tootjad on Saudi Araabia, Egiptus, Peruu, Iisrael, Tuneesia, Vietnam, Austraalia, Kazahstan, Senegal, Mehhiko, Lõuna-Aafrika Vabariik, India, Alžeeria, Togo.

Hiina ja Ameerika Ühendriigid ei ekspordi üldse fosforiiti. Väiksemates kogustes ekspordivad Saudi Araabia, Venemaa ja Kazahstan. 2015. aasta oli maailma eksport umbes 30 mln. tonni, mis moodustab kogutoodangust vähem kui 15%. Viimasel 10. aastal ei ole ületanud eksport kunagi 20% kogutoodangust. Kuigi fosforiidi kaevandamismahud suurenevad, on olnud ekspordi maht stabiilselt 20 ja 30 mln. tonni vahel. Kogu toodang kasutatakse ära siseturgudel ja importijatele nagu Euroopa Liit, India, Indoneesia, Brasiilia, Mehhiko ja Türgi jaoks on see suur mure koht. [10]

	Fosforiit	Fosforhape	(Diammoonium-fosfaat)	(Monoammoonium-fosfaat)
Toodang (mln. tonni)	200	83	36	24
Eksport (mln. tonni)	30	8	17	9

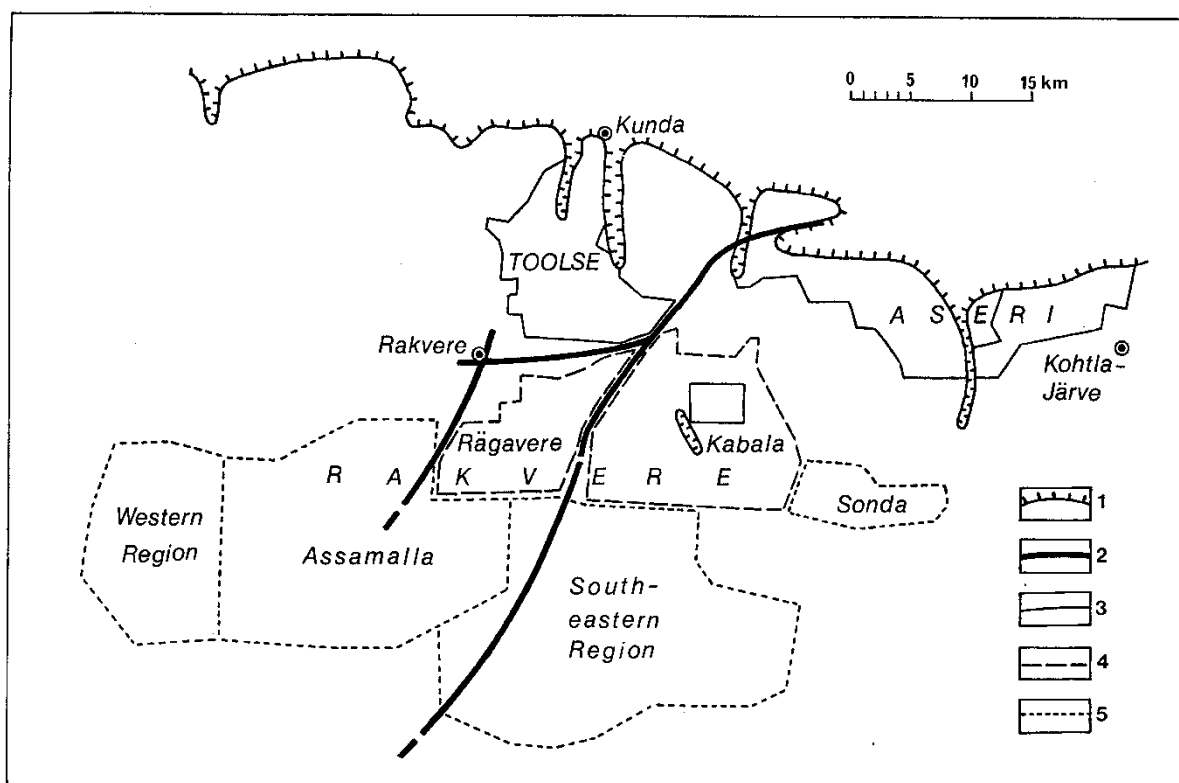
Tabel 2. Fosforiidi, fosforhappe, DAP ja MAP toodangu- ja ekspordimahud. [10]

Aastal 2016 oli maailma fosfaatvæetiste turu suurus 46,1 miljardit eurot. Aastaks 2025 on prognoositud selle kasv 51,25 % 69,73 miljardi euroni. [11]

Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused

Eesti fosforiit on kollakas või hallikas oobuluskarbikeste tükikestest rikas liivakivi erim. Põhilised kivimi moodustavad mineraalid on kvarts ja fluorkarbonaatapatiit. Fosforiidikihind asub Kambriumi ja Ordoviitsiumi ladestu piiril Pakerordi lademes Kallavere kihistus. Kivim koosneb tsementeerunud liivast ning brahhiopoodide kodadest. Brahhiopoodide sisaldus kivimis on 5 – 90 %. Keskmiselt on brahhiopoodi kojas 35 – 37 % P_2O_5 ja fosforiidi kihis on P_2O_5 sisaldus keskmiselt 6 – 20 %. Kallavere kihistu sisaldab ka vähesel määral lisandeid: dolomiiti, kaltsiiti, püriiti, glaukoniiti ja raudhüdrosiide.

Kunagine merelaine kuhjas brahhiopoodide kojad rannakaldale läätsja kujuga ning seetõttu on lasund ebakorrapärase ehitusega. Fosforiidi kihi peal asub 1–2 meetri paksune habras glaukoniitliivakivi. Enamus Rakvere maardlast asub Lääne-Virumaa piires ning on jaotatud erinevateks piirkondadeks: Ida-Kabala, Lääne-Kabala, Rägavere; Assamalla, Sonda, Lääne-Region, Kagu-Region. [12] Rakvere maardla asub Ülem-Ordoviitsiumi ladestiku avamusalal, mille paksus suureneb lõuna suunas. Aluspõhj kivimeid katavad Kvaternaari pinnakattesetted. Rakvere maardla kagu nurka lõikub sisse kirde-edela suunaline Aseri rike. [1]



Joonis 3. Rakvere fosforiidimaardla koos Toolse ja Aseriga. (1) Fosforiidi leviku põhjapiir; (2) rikkevõondid; (3) passiivne tarbevaru; (4) passiivne reservvaru; (5) prognoosvaru. [12]

Katendi paksus on 40-130 m ja selle moodustavad pinnakattesetted ning aluspõhja kivimid. Kvaternaarisetted on erineva paksusega ja nende paksus kõigub 2-55 m piires. Kaljukatendi moodustavad: Ülem-Ordoviitsiumi Vormsi, Nabala, Rakvere, Oandu, Keila, Haljala ning Kukruse lademetel lubjakivid ja kukersiit; Kesk-Ordoviitsiumi Uhaku, Lasnamäe, Aseri, Kunda ja Volhovi

lademete lubjakivid; Alam-Ordoviitsiumi Billingeni, Hunnebergi ja Varangu lademete glaukoniitliivakivid, aleuriitsavid ning graptoliitargiliit. [1]

Rakvere maardlas on fosforiidikihi paksus 2,0 m – 12,0 m ja sügavus 42 m – 210 m. Keskmine paksus on 3,1 m – 7,6 m. Kabala uuringupiirkonnas on keskmine fosforiidikihi paksus 6,0 m kohati kuni 8,0 m. Kabala uuringuvälja fosforiit asub 42 m – 107 m sügavusel. Fosforiidi kihind on lõuna suunas kaldu. Maardla Idaossa jääb Kunda jõe mattunud org. Põhja-Eestis levinud karstinähtused fosforiidikihini ei ulatu. Rakvere maardla Kabala, Sonda ja Rägavere piirkondade puhul on tegemist kompleksmaardlaga, sest fosforiidist 30-35 m kõrgusel asub kaevandamisväärne põlevkivi. [1]

Hüdrokeoloogilised tingimused on keerulised maardla asukoha tõttu. Pandivere kõrgustik on peamine Põhja-Eesti põhjavee toiteala ja igasugune veepumpamine rikuks kõrgustiku veerežiimi. Piirkonnas on kolm põhjaveekihti. Fosforiidi kihind asub Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekihis. Fosforiidi peal 30-35 m kõrgusel asuv põlevkivi asub Siluri-Ordoviitsiumi põhjavee kompleksi sees. Fosforiidi kihndi all asub Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks. [12]

Geoloogiline indeks	Kivim	Intervall (m)	Kihi paksus (m)
Q	Kvaternaari setted	0-10	10
O _{2rk}	Lubjakivi	10-12,3	2,3
O _{2on}	Lubjakivi mergliga	12,3-15,4	3,1
O _{2kl}	Lubjakivi	15,4-22,5	7,1
O _{2jh}	Lubjakivi	22,5-36,9	14,4
O _{2id}	Lubjakivi mergliga	36,9-41,15	4,25
O _{2kk}	Lubjakivi põlevkivi vahekihtidega	41,15-50,57	9,42
O _{2wv}	Põlevkivi	50,57-52,66	2,09
O _{2uh}	Lubjakivi	52,66-67	14,34
O _{2ls}	Lubjakivi	67-74,3	7,3
O _{2as}	Lubjakivi	74,3-77	2,7
O _{1kn}	Lubjakivi	77-84,7	7,7
O _{1vl}	Lubjakivi	84,7-87	2,3
O _{1lt}	Glaukoniit-liivakivi	87-88	1
O _{1pk}	Fosforiidi tootuskiht	88-95,6	7,6
C _{1ts}	Aleuroliit	95,6-100,7	5,1

Joonis 4. Lihtsustatud Kabala uuringuvälja tüüpläbilõige. [13]

Proovide võtmine

Katseteks vajaliku fosforiidiproovid võeti Ülgase vanast fosforiidikaevanduse käikudest ja Toolse fosforiidimaardlast. Põlevkiviproovid võeti Kiviõli Keemiatööstuse Põhja-Kiviõli II karjäärist.



Joonis 5. Fosforiidiproovide kogumine Toolsel.



Joonis 6. Ülgase fosforiidikaevanduses paljanduv fosforiidikiht.



Joonis 7. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääris töötav mäekombain Wirtgen 2500 SM. Põlevkivi referentsproove koguti samast kohast.

Väljamismeetodi valiku aluseks olevad füüsikalised-mehaanilised omadused

Füüsikalised-mehaanilised omadused määravad ära fosforiidi raimamise tehnoloogia. Käesolevas töös kasutatakse väljamismeetodi tehnoloogia valikul abrasiivsuse ning punktkoormustesti mõju. Tehnoloogia valikul tuleb arvestada, et Eesti fosforiit koosneb tsementeerunud liivakivist ning brahhiopoodide kodadest.

Fosforiidi ja põlevkivi abrasiivsuse määramine

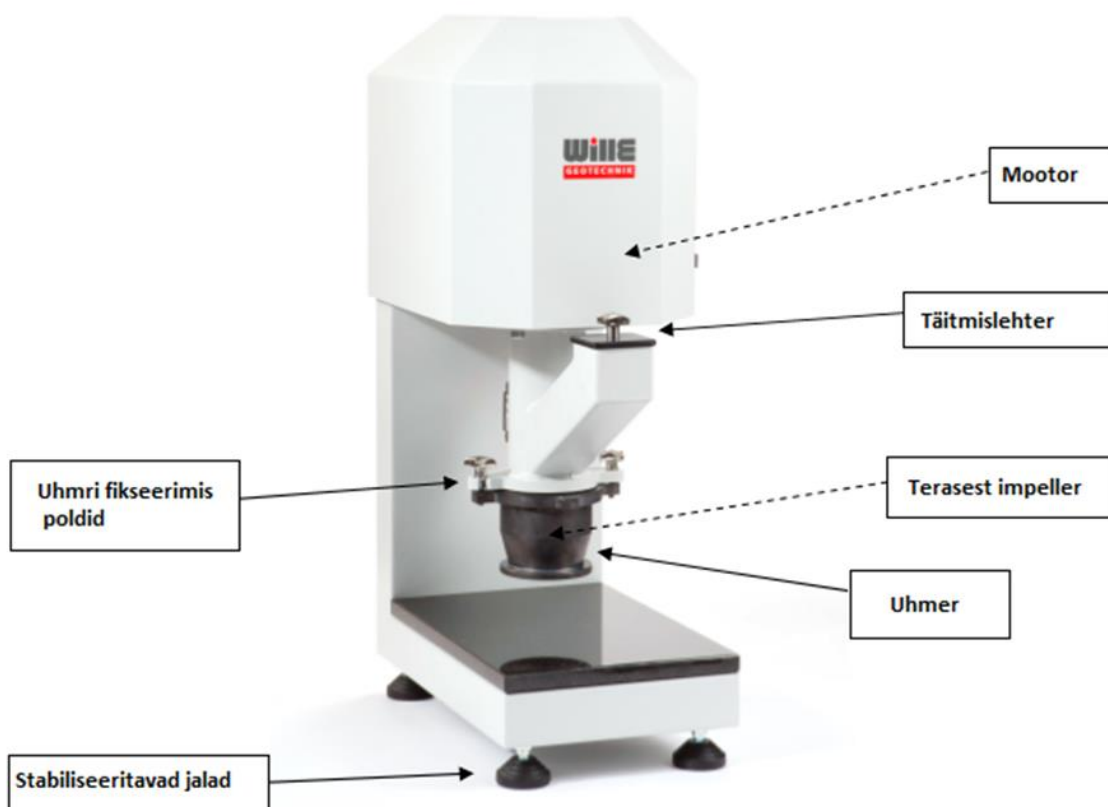
Ülgase fosforiidi abrasiivsuse valimi arv oli 10. Valimi arv võiks olla suurem, et usaldusväärsus oleks suurem. Ülgase fosforiit oli liiga habras ning vajaliku 4 – 6,3 mm fraktsiooni oli raske saada. Toole fosforiidi abrasiivsuse valimi arv oli 8. Samuti nagu Ülgasega oli valimi arv väike, sest materjali fraktsioonis 4 – 6,3 mm ei jätkunud. Välitöödel ei saanud proovivõtukohest rohkem materjali kaasa võtta, kuna proovide võtmine toimus käsitsi kirka ja vasaraga. Nende valimite suurustega ei saa statistiliselt usaldusväärset tulemust, kuid on piisav, et näha üldist kategooriat kuhu kivimite abrasiivsus jääb.



Joonis 8. Wille Geotechnik abrasiivsuse määramise seade AT 1.

Abrasiivsuse leidmise meetodika

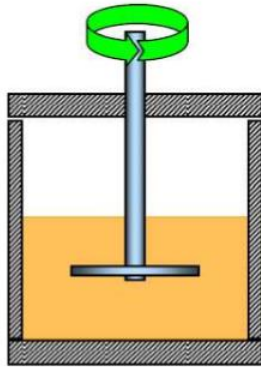
Abrasiivsuse mõõtmiseks kasutati LCPC meetodil töötavat Wille Geotechnik abrasiivsuse määramise seadet AT 1. Seade vastab Prantsusmaa standardile P18-579 ning on väljatöötatud *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*'i (LCPC) poolt kivimite ja puistematerjalide katsetamiseks. [14]



Joonis 9. Abrasiivsuse määramise seade AT 1 ja selle osad. [15]

AT 1 mootori külge monteeritakse eelnevalt kaalutud ristkülikukujuline impeller, mis on valmistatud standardiseeritud terasest Rockwelli kõvadusega HRB 60-75. Seejärel lisatakse umrisesse 500 ± 2 g soovitud purustatud materjali fraktsioonis 4-6,3 mm. Impeller pöörleb umris 5 minutit kiirusel 4500 pöört minutis.

Test principle:



View of impeller before and after the test:



Joonis 10. (vasakul) Impelleri pöörlemise tööpõhimõte; (paremal) Impeller enne pöörlemist ja peale pöörlemist. [15]

Seejärel võetakse uhmer lahti ning kaalutakse impeller uuesti. Uhmris olev materjal sõelutakse läbi 1,6 mm sõela ja kaalutakse sõela läbinud materjal. [16]

Abrasiivsus määratakse valemiga:

$$Abr = 1000 * \frac{MP1 - MP2}{MG1}$$

Peenestatavustegur määratakse valemiga:

$$Br = 100 * \frac{MG1 - MG2}{MG1}$$

Abrasiivsus [g/t]	CAI [0,1]	Abrasiivsuse klass	Näited
0 – 50	0,0-0,3	Mitteabrasiivne	Orgaaniline materjal
50 – 100	0,3-0,5	Ülivähe abrasiivne	Põlevkivi
100 – 250	0,5-1,0	Väheabrasiivne	Lubjakivi
250 – 500	1,0-2,0	Keskmiselt abrasiivne	Liivakivi
500 – 1250	2,0-4,0	Väga abrasiivne	Basalt
1250 – 2000	4,0-6,0	Üliabrasiivne	Amfiboliit, Kvartsiit

Tabel 3. Katsekehade jagunemine abrasiivsuse klassidesse. [16]

Br [%]	Purustatavuse klass
0-25	Madal
25-50	Keskmine
50-75	Kõrge
75-100	Väga kõrge

Tabel 4. Katsekehade jagunemine peenestatavuse klassidesse. [14]

Abrasiivsuse määramisel LCPC meetodil saadakse suurus, mida ei saa kusagil arvutamises kasutada vaid see on suhteline arv, mis näitab mitu grammi kulub Rockwelli kõvadusega HRB 60-75 standardiseeritud terasest lõikepead 1 tonni katsetatud materjali raimamiseks.

Peenestatavustegur BR on suurus 0 – 100 ning see antakse protsentides. Mida suurem on protsent, seda rohkem tekis < 1,6 mm fraktsiooni peale impelleri pöörlemist uhmis. Peenestatavustegur sõltub suuresti proovikeha osakeste mineraloogilisest koostisest.

Fosforiidi ja põlevkivi abrasiivsuse tulemused

Ülgase fosforiidiproovide abrasiivsuse keskmiseks tulemuseks tuli Abr = 224,28 ± 26,43 g/t, mis teeb abrasiivsuse klassiks "Väheabrasiivne". Peenestatavustegur tuli Br = 96,3 ± 0,49 %, mis vastab peenestatavusteguri klassile "Väga kõrge". Joonis ... Proovide abrasiivsuse indeks tuli väiksem võrreldes Toolsega, sest oobulusliivakivi oli väga pude ja lagunes väga kergelt liivaks ja oobuluskarbikesteks.

Toolse fosforiidiproovide abrasiivsuse keskmiseks tuli Abr = 1373,79 ± 320,62 g/t, mis vastab abrasiivsuse klassile "Üliabrasiivne". Peenestatavustegur tuli Br = 58,98 ± 14,79 %, mis vastab peenestatavusteguri klassile "Kõrge". Joonis ... Toolse proovid olid väga kõrgelt tsementeeritud.

Põhja-Kiviõli II põlevkivi referentsproovide keskmiseks abrasiivsuseks tuli Abr = 26,16 ± 5,92 g/t, mis vastab abrasiivsuse klassile „Mitteabrasiivne“. Peenestatavustegur tuli Br = 33,11 ± 0,63 %, mis vastab peenestatavusteguri klassile „Keskmine“.

	Ülgase fosforiid	Toolse fosforiid	Põhja-Kiviõli II põlevkivi
Katsete arv	10	8	11
Vähim abrasiivsus (g/t)	165,3	1311,48	11,97
Suurim abrasiivsus (g/t)	311,44	1542,30	40,03
Abrasiivsus (g/t)	224,28 ± 26,43	1373,79 ± 320,62	26,16 ± 5,92
Peenestatavus (%)	96,3 ± 0,49	58,98 ± 14,79	33,11 ± 0,63

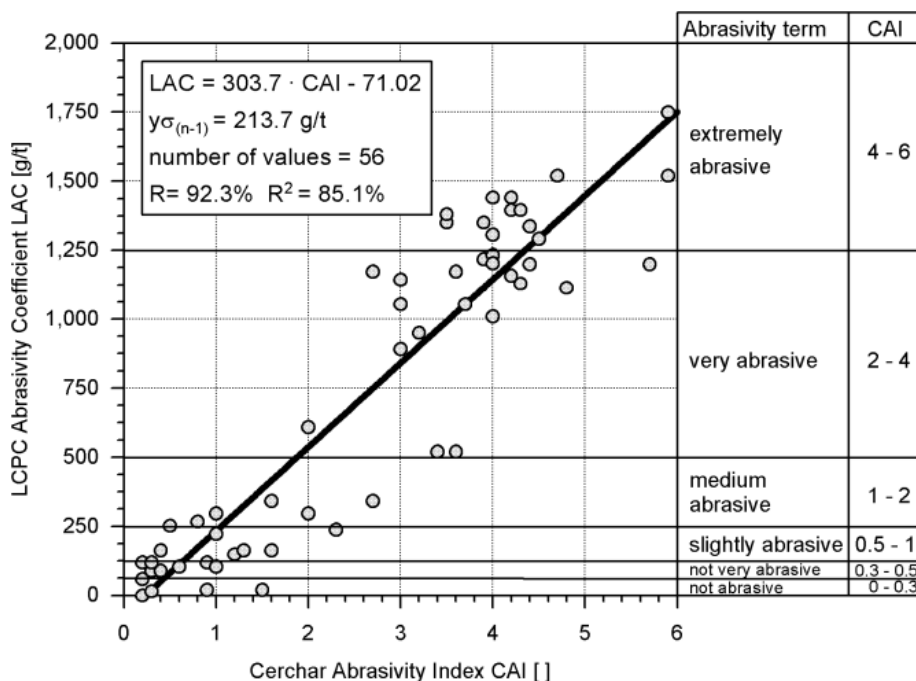
Tabel 5. Fosforiidi ja põlevkivi LCPC meetodil abrasiivsuse katsetamise tulemuse kokkuvõte.

Mida näitab LCPC abrasiivsuse test

Mitmed erinevad testid on loodud abrasiivsuse mõõtmiseks, kuid enamus ei sobi purustatud materjalide katsetamiseks. Laialt on levinud CERCHAR abrasiivsuse test. CERCHAR testi saab teha ainult tervele katsekehale. LCPC test annab võimaluse teha katseid purustatud materjalidega ja erinevate terasuurustega pinnase segudega, mis annab võimaluse suurte ja esinduslike kivimite proovide katsetamiseks.

Katsete tegemisel peab olema terasuurus 4 - 6,3 mm, nagu nägi ette originaalis LCPC. Kõik, mis on <4 ja >6,3 mm tuleb eemaldada purustamise ja sõelumise teel. Praktika on näidanud, et selline terasuurse valik ei peegelda tegelikku abrasiivsust. Suurte terasuuruste (>6,3 mm) eemaldamine katsest teeb lõpptulemuse vähem abrasiivsemaks, sest nad domineerivad impelleri kulutamises. Impelleri algaasis, kui see tööle pannakse, pörkuvad katsekivimid ja impeller ning suuremad katsetükid võivad lüüa impelleri küljest tükke lahti. Peenema fraktsiooniga osakesed (<4 mm) aga vähendavad abrasiivsust. Tunneli läbindamisel ja teistele mehaanilistele protsessidele mõjub just väiksem fraktsioon kulutavalt aga ilma <4 mm fraktsioonita näitab LCPC test tulemuseks just suuremat abrasiivsust. Sellest olenevalt peab tegema enne katsetamist otsuse, kas need jätta sisse või võtta välja. [17]

LCPC indeks võib olla vahemikus 0 – 2000 g/t ja see vahemik jaotatakse viieks erinevaks klassiks. LCPC indeksi ja valdkonnas juba laialdlaselt kasutatava CERCHAR indeksi vahel on piisavalt suur lineaarne korrelatsioon, tänu millele saab kasutada juba välja töödatud CERCHAR abrasiivsuse klassifikatsiooni (CAI). [17]



Joonis 11. CAI ja LCPC vaheline lineaarne korrelatsioon, kasutades Büchi (1995) andmeid. [17]

Punktkoormustesti metoodika

Punktkoormusega survetugevuse mõõtmine on üks kõige kiirem levinuim kivimite klassifitseerimismeetod tugevuse järgi. Testiti irregulaarse kujuga kivimiproovide punktkoormuse rakendamise teel purunemiseni kokkusurumist kahe standardse kujuga teraskoonuse vahel. Kaugus teraskoonuste punktide vahel peab olema vahemikus 30 – 85 mm ja kivimiproovi kuju suhe peab vastama mõõtudele [16]:

$$15 \leq D \leq 85 \text{ mm} \quad 0,3 \leq \frac{D}{W} \leq 1,0 \quad L \leq 0,5 * W$$

D – Kaugus kontakteeruvate kooniliste teravike vahel.

W – Proovitüki laius perpendikulaarselt koormuse suunaga.

L – Kaugus kooniliste kontaktteravike ja lähima vaba otsa vahel.

Igast proovipunktist võetud proovipaladega tehti 20 katset ja kihilisus oli kõikide proovide puhul risti.

Punktkoormuse tugevusindeks I_s arvutatakse valemiga:

$$I_s = \frac{P * 1000}{D_E^2}$$

P – Maksimaalne tugevus (kN)

D_E – Südamiku samaväärne diameeter millimeetrites

Korrapäratu kujuga katsekehade puhul:

$$D_E^2 = 4 * \frac{A}{\pi}$$

A – Katsemasina teraviku vahelise tasapinna minimaalne ristlõikepindala:

$$A = W * D$$

Diameetri parandustegur (F) on vajalik arvutada, et see aitaks defineerida üht tugevusindeksit igale kivimitüübile, sõltumatult katsekeha suurusest. Punktkoormuse indeksi I_s ei muudeta, kui test viiakse läbi katsekehadel, mille diameeter on lähedal 50 millimeetrile. Ebakorrapäraste katsekehade puhul kasutatakse valemit [18]:

$$I_{s(50)} = F * I_s$$

$$F = (D_E/50)^{0,45}$$

F – diameetri parandustegur.

Fosforiidi ja põlevkivi punktkoormustesti tulemused

Ülgase fosforiidiproovide standardiseeritud punktkoormusindeks tuli $I_{s(50)} = 0,51 \pm 0,2$ MPa. Lisa 4.

Toolse fosforiidiproovide standardiseeritud punktkoormusindeks tuli $I_{s(50)} = 4,19 \pm 0,58$ MPa. Lisa 5.

Põhja-Kiviõli II karjääri põlevkiviproovide standardiseeritud punktkoormusindeks tuli $I_{s(50)} = 1,69 \pm 0,24$ MPa. Lisa 6.

	Ülgase fosforiid	Toolse fosforiid	Põhja-Kiviõli II põlevkivi
Katsete arv	20	20	20
Punktkoormustesti suurim (MPa)	1,56	6,59	2,58
Punktkoormustesti vähim (MPa)	0,08	1,85	0,66
Punktkoormustest (MPa)	$0,51 \pm 0,2$	$4,19 \pm 0,58$	$1,69 \pm 0,24$

Tabel 6. Ülgase fosforiidi, Toolse fosforiidi ja Põhja-Kiviõli II põlevkivi punktkoormustesti tulemuste kokkuvõte.



Joonis 12. PKT masin koos purustatud fosforiidiga.

Katsetuse järeldused

Ülgase ja Toolse fosforiidi abrasiivsuse ja punktkoormustesti erinevused tulid erinevad mitmetel põhjustel. Ülgase fosforiit oli väga habras ja kivimikehad hakkasid juba käes lagunema. LCPC meetodil abrasiivsuse määramisel tuleb tähelepanu pöörata just kivimikehade suurusele. Mida suuremad ja raskemini lõhutavad need on, seda suurem on ka abrasiivsus. [17] Kõik proovid olid LCPC masinaga katsetamise ajaks sõelutud 4-6,3 mm fraktsiooniks. Kõige tõenäolisemalt purunesid Ülgase fosforiidiproovide tükid kiiresti liiva ja karbipuruks ning uhmris pöörlev impeller oli selle segu sees. Seda kinnitab ka välja arvatud väga suur peenestatavustegur Ülgase fosforiidi puhul, mis oli 96,3 %. Toolse fosforiit oli tugevalt tsementeerunud ning see ei olnud habras. Peenestatavustegur 58,98% näitab, et kogu LCPC katseperioodi aja oli impellerit kulutama rohkem kivimiproovi tükke suurusega 4-6,3 mm. See näitab Toolse fosforiidi vastupidavust purustamisele.

Võrreldes põlevkivi punktkoormustesti tulemust Toolse fosforiidi omaga siis on need sarnased. Sellest võiks järeldada, et fosforiidi väljamisel mäekombainiga ei teki probleeme. Samas võrreldes põlevkivi ja Toolse fosforiiti abrasiivsuses siis on näha, et Toolse fosforiit on ligi 53 korda abrasiivsem kui põlevkivi, mida väljab mäekombain.



Joonis 13. Ülgase fosforiidi <1,6 mm fraktsioon.



Joonis 14. Toolse fosforiidi 1,6 - 4 mm fraktsioon.



Joonis 15. Ülgase fosforiidi 1,6 - 4 mm fraktsioon.

Fosforiidi võimalikud väljamismeetodid

Väljamine on defineeritud kui kivimite massiivist eraldamine, kobestamine, tükeldamine, purustamine ja/või laadimine puistangusse või veovahendile. Üldiselt jaotatakse väljamismeetodeid neljaks:

1. Mehaaniline väljamine tööriistade või masinatega
2. Puur- ja lõhketööd
3. Termiline väljamine
4. Keemiline väljamine

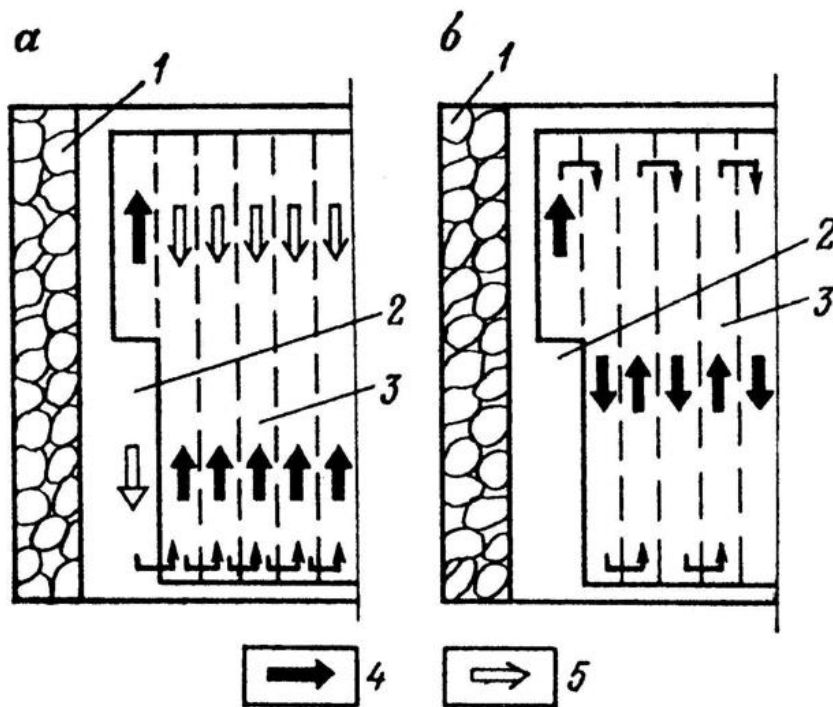
Mehaaniline väljamine

Mehaaniline väljamine jaguneb kaheks: staatiline või dünaamiline. Staatiline raimamine tekib olukorras, kus kivimimassiivile rakendatakse staatilisi koormuseid. Massiivi osa eraldatakse masina tööorgani lõiketera ja/või hammastega. Sinna alla kuulub ekskaveerimine, staatiline murdmine, freesimine, koorimine, lõikamine, saagimine. Staatilist raimamist on võimalik kasutada kobedates ja seotud mittekaljustes kivimites, nõrkades või porsunud poolkaljustes ja kaljustes kivimites. [19]

Mehaanilise väljamise staatilisel väljamisel on kaks moodust, kas lühiee- või pikkee-kaevandamine. Lühiee-kaevandamine toimub reeglina kamberkaevandamise meetodil. Kamberkaevandamisel jäetakse väljatavasse kihindisse tervikud, mille ülesanne on hoida üleval lage. Kamberkaevandamise üks suuri eeliseid on lae toetamise lihtsus ja tehnoloogia olemasolu. Eesti põlevkivikaevandustes on aastatepikkune kogemus tervikute arvutamisel. Kamberkaevandamise puhul on aga suured kaod, sest suured kogused kaevandamisväärset fosforiiti jääks tervikutesse lage toetama.

Pikkee-kaevandamisel kasutatakse tervet väljamiskompleksi, kuhu kuuluvad kombain, hüdrauliline toestik ja kraapkonveier. Fosforiidi kaevandamisel kombainiga väljab kombain fosforiiti ning laeb selle kraapkonveierile. Kivimi väljamisega toimub sama aegselt mitu erinevat operatsiooni. Toimub ee toetamine, ee-esine väljatava kivimi vedu, tuulutuse ja lae käitlus. Kui kombain on liikunud korra ühest laava otsast teisi siis liigutatakse konveierit hüdraulilise toestiku abil väljatud ee paksuse võrra edasi. Laava otstes toimuvad otsaoperatsioonid, kus valmistatakse ette uut töötsükli alustamist.

Kombainil on kaks võimalikku tööskeemi. Ühepoolse tööskeemi korral väljab kombain kivimit ainult ühes suunas. Laava lõppu jõudes liigub kombain tühikäigul tagasi algusesse. Kahepoolse tööskeemi e. süstikskeemi puhul väljab kombain kivimit mõlemas suunas ning töötsükklisse ei teki sisse pausi. Tööskeemi valik on seotud kasutatava kombaini ehituslike omapäradega.



Joonis 16. Kombaini tööskeemid, ühepoolne tööskeem (a), süstiktööskeem (b). Varistatud lagi (1); tööesi (2); kaevandatav materjal (3); töösuund (4); tühikäigul liikumine (5) [19]

Dünaamiline raimaine on olukorras, kus masina tööorgan mõjutab kivimimassiivi perioodilise löökoormusega, mille tagajärjel kivimis laienevad olemasolevad lõhed ning tekivad uued. Kaljused kivimid võivad staatilisel koormusel deformeeruda elastselt ja plastselt, kuid dünaamilisel koormusel purunevad hapralt. Dünaamilist raimamist, piikvasarate ja hüdrovasaratega, kasutatakse seetõttu kaljuste kivimite raimamiseks. [19]

Puur- ja lõhketööd

Puur- ja lõhketöödega väljamise korral väljatakse kivim lõhkeaine plahvatusel vabaneva energiaga. Levinuim ja tõhusaim meetod on lõhkeaugumeetod, mille kasutamisel paigutatakse lõhkeaine kivimimassiivi puuritud lõhkeaukudesse. Selline raimamisviis koosneb kahest osast: lõhkeaukude puurimine ja lõhketöö ehk lõhkeaine plahvatusel vabaneva energia mõjul kivimi purustamine. Üldiselt väga tõhus väljamismeetod, sest energia vabaneb kiiresti aga tõhusus sõltub laengu paigutusest massiivis. [20]

Lõhkeaukude puurimine toimub poolkaljustes kivimites keerd- või löökpuurimisega. Keerdpuurimisel murtakse kivim augu põhjast lahti pöörleva lõiketeraga, mis surutakse staatilise jõuga kivimisse. Efektiveks puurimiseks on vajalik tekitada lõiketera eesservas kivimi lõiketugevusest suurem surve ja puuri lõiketera all kivimi kõvadusest suurem pinge. Keerdpuurimine on tõhus väheabasiivsetes pehmetes ja keskmise kõvadusega kivimites. Löökpuurimisel on lõikepea peitelpuuripea. Puuripeaga lüüakse perioodiliselt raimatavat kivimit ja kivim puruneb peamiselt muljumise mõjul. Keerdlöökpuurimisel on protsess nagu löökpuurimisel aga puuripead ka keeratakse. Kivim puruneb

löökidel ja pöörlemisel tekkivate löikepingete korral, kui konstantselt pöörlev puuripea surutakse kivimisse. Selline puurimisviis on tõhus puurimisviis keskmise kõvadusega ja kõvades kivimites. [20]

Termiline väljamine

Termilisel väljamilisel kuumutatakse väljatavat kivimit kõrgetel temperatuuridel ning seejärel jahutatakse kiiresti maha. Kivimi termiline gradient põhjustab kivimi erinevates piirkondades erinevaid pingeid. Piisava pinge korral puruneb kivim termilise šoki tulemusel. Selle meetodi tootlikkus on madal, kui kasutatakse siis ainult kaljuste kivimite raimamisel. [19]

Keemiline väljamine

Keemilist väljamist kasutatakse mineraalide puhul, mis lahustuvad kuumas vedelikus. Kuum vedelik pumbatakse maa sisse, kus see lahustab kaevandavat mineraali või kivimit. Lahustunud mineraalidega pumbatakse survestatud õhuga maapinnale. Selline keemiline väljamine on võimatu fosforiidi puhul. Fosforiidi tuumaines on oobuluskarbikesed, mida ei ole võimalik lahustada ning isegi, kui saaks, oleks nende väljamine, maapõue pumbatud kuuma vedelikuga, äärmiselt reostav piirkonnas asuvatele suure deebitiga põhjaveekihtidele [21]. Paisuvad tsemendid ja häälitud keemilised kobestus/raimamistahendid (Expansive cements and soundless chemical demolition agents), edaspidi SCDA, on suurepärased oma selektiivse väljamise omaduste poolest. SCDA'd ei tooda vibratsiooni, lärmi, ohtlike gaase ega lendavaid kivimitükke. Miinuseks on aga väga aeglane kivimi purustamise aeg >6 tundi. [22]

Eesti fosforiidi puhul tuleks vaadelda kahte kõige tõenäolisemat väljamismeetodit: mehaaniline või puur- ja lõhketööd. Termiline ja keemiline väljamine on liiga väikese tootlikkusega ning seetõttu ka liiga kallid väljamismeetodid fosforiidi raimamiseks.

Varasemad katsetööd kombainiga

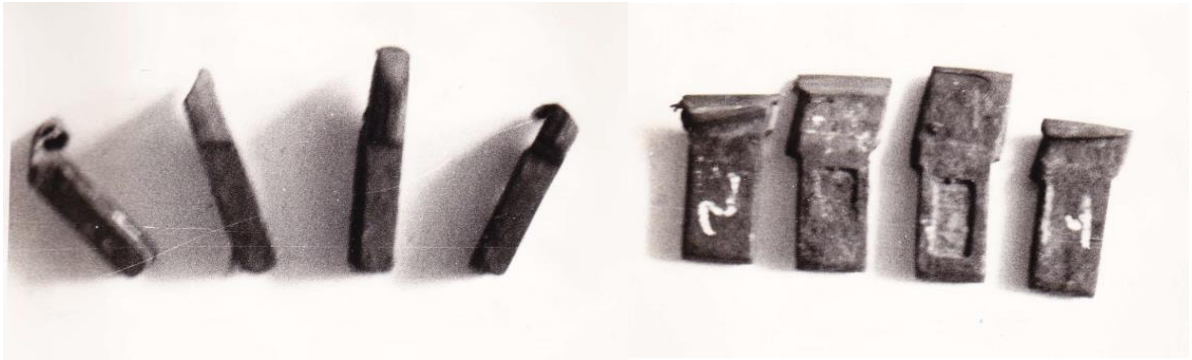
1964. aastal tehti Tallinna Polütehnilise Instituudi poolt lepinguline uurimistöo teemal „Uute kaevandamisviisi variantide katsetamine Maardu fosforiidikaevanduses“. Töö oli tellitud Maardu Keemiakombinaadi poolt, et leida uus mehhaniseeritud tehnoloogia fosforiidi allmaakaevandamiseks. Maardu fosforiidikaevanduses kasutati pikk-lank kaevandamisviisi, kus jäeti alles tervikud. Fosforiidi raimamine toimus puur-lõhketöödega ning seejärel laaditi käsitsi see ee konveierile. Lage hoidsid üleval tervikud. Eelnevate uuringute kohaselt leiti, et parim kaevandamisviis Maardu allmaakaevanduses oleks pikk-lank kaevandamisviis lae varistamisega. Kuna puudus vajalik tehnika siis toimusid koristustööd käsitsi. Selle probleemi lahendamiseks toodi kohale söekombain K-52M ja hakati uurima kombaini kasutatavust Maardu fosforiidikaevanduses. [2]

Kombaini katsetamisega alustati 9. juunil 1964. aastal. Kombaini lõiketrumlile oli paigutatud 24 hammast. Täiskoormusel töötav kombain kulutas 5,5 minuti jooksul ära kõik äärmised 40° all olevad lõikehambad, ülejäänud hambad olid ka raskelt kulutatud. Kombain liikus edasi 55 cm. Tehti veel mitu prooviväljamist päeva jooksul. Kokku raimas kombain maaki eest 2,3 m pikkuselt, 0,5 m sügavuselt ja 1,1 m kõrguselt. Lahtimurtud maak oli väga peen. 40° all olevaid lõikehambaid kulus 5 komplekti ning katsetamine lõpetati. [2]

Edaspidi otsustati lõhketöödega fosforiiti osaliselt eelkobestada. Kolm moodust otsustati võtta kasutusele.

1. Maagi kihti puuriti kaks rida 1,2 m sügavusega auke maleruudustikus 1 m vahekaugusega. Lõhkeaugud täideti 400 g lõhkeainega.
2. Maagi kihti puuriti üks rida 1,2 m sügavusega auke, vahekaugusega 1 m. Lõhkeaugud täideti 400 g lõhkeainega.
3. Maagikihi katvasse aherkivimisse puuriti 0,7 m sügavusega augud 0,7-0,8 m vahemaaga. Lõhkeaugud täideti 200 g lõhkeainega.

Esimese variandi juures töötas kombain peamiselt laadimismasinana, peenendades lahtimurtud maagitükke ja lõigates lakke jäänud pragulist aherkivimit. 3,5 m testlõigu läbimiseks kulus 3 minutit. Teise variandi puhul ei kobestunud maak piisavalt ja kombain pidi seda rohkem raimama. 3,2 m testlõigu läbimiseks kulus 4,2 minutit ja kulus üks hammaste komplekt. Kolmanda variandi puhul ei kobestunud lõhkamine maaki piisavalt. 5,2 minutilise töötamisega läbis kombain 3,1 m ja kulus 3 hambakomplekti. Söekombain K-52M ei olnud mõeldud sellise abrasiivsusega kivimite raimamiseks ja katsetamised lõpetati. [2]



Joonis 17. Kombaini lõikehambad peale 50 cm edasi liikumist. (vasakul) Eestvaade, (paremal) külgvaade. [2]

Fosforiidi väljamismeetodite võrdlev analüüs

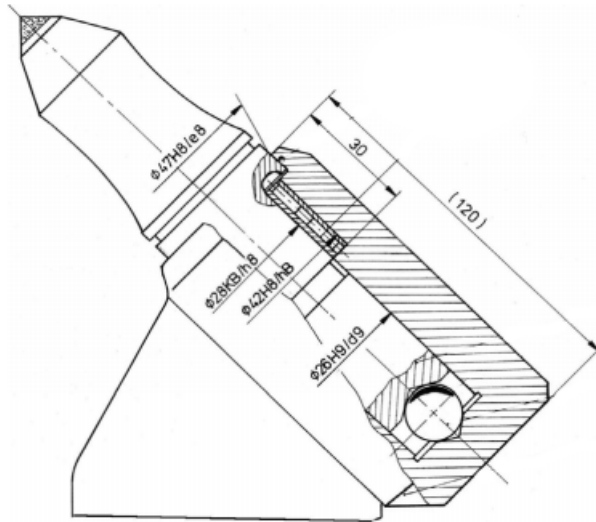
Fosforiidi kaevandamise tehnoloogiat tuleb võtta ühtse tervikuna, kus kõik protsessid sõltuvad üksteisest. Koristustöödel toimuvad järgmised protsessid: raimamine, kaevise laadimine veovahendile, kaevise eesisene vedu, toestamine, laekäitlus. Kõigi erinevate tegevuste lülid moodustavad ühise terviku.

Mehaaniline väljamine

Fosforiidi väljamisel tuleks vaadata eelkõige pikkee-kombainkaevandamist. See kaevandamisviis sobib poolkaljustele kivimitele nagu on fosforiit. Maailmas kasutatakse seda kaevandamisviisi ka umbes sama survetugevusega pruun- ja kivisöe kivimites. [23]

Fosforiidi väljamistehnoloogia kombainkaevandamisel näeks välja nii, et kombain liigub mööda ett ja raimab, kõvasulamiga armeeritud lõikehammastega, oobulusliivakivi. Raimatud kivim langeb kombaini ees olevale kraapkonveierile. Kraapkonveierilt liigub raimatud oobulusliivakivi edasi veostreki konveierile. Samal ajal, kui toimub kivimi raimamine, toimub ka lae toestamine mehhaniseeritud hüdrauliliste toestike abil ja laekäitlus. Toestik nihutatakse edasi kohe kombaini järel sektsioonide kaupa või korraga kogu laava pikkuses. Laekäitlus toimub pikkee-kombainkaevandamisel kas lae varistamisega või lae ülalhoidmisega. Otsus kas lagi varistatakse või mitte tuleb teha, kui on kindel, kas fosforiidikihi peal olevat põlevkivi on plaanis kaevandada või ei. Kaevandatud ala täitmise korral saab kasutada raimamisel tekkivat aherainet. Täitmiseks saab kasutada ka eraldi spetsiaalselt kaevandatud ala täitmiseks loodud materjale ja segusid, mis omakorda oleksid kulukamad kui aherainet kasutades.

Töös välja toodud fosforiidi abrasiivsuse katsetulemused näitavad, et tegemist on üliabrasiivse materjaliga. Kõik väljamise protsessis osalevad mehaanilised osad kuluvad selle tulemusena. Kõige suurem kulumine toimub aga lõikehammastel, mis on vahetus kontaktis raimatava kivimiga. Lõikehammaste kulumise vähendamiseks saab võtta kasutusele mitmeid meetmeid. Lõikehammastena kasutada tangentsiaal-pöörlevaid hambaid, mis on laialdaselt kasutuses tänapäevastes mehaanilistes söekombainides. Lõikehammastel on paagutatud karbiidist lõikepead, mis asuvad pöörleval lõikehambal. Lõikehammast hoiab kinni hoidik, milles olev lager laseb lõikehambal pöörelda. [24]



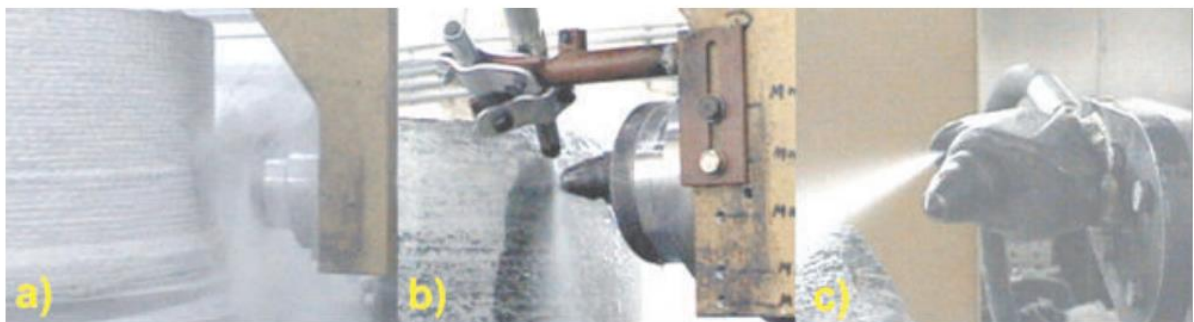
Joonis 18. Tangetsiaal-pöötlev lõikehammas, lõikehamba hoidikus. [24]

Lõikehamba pöörlemine hoidikus aitab lõikepeal kuluda ühtlaselt ja sümmeetriliselt. Pideva pöörlemise tagamine on võimatu, sest määrde kasutamisel (vesi-õli emulsioon või puhas vesi) raimamisel rikub see vee-tolmu segu laagri ja lõikehamba vahelist piiri. Ilma pöörlemiseta kulub lõikehammas asümmeetriliselt ja suureneb vajadus lõikehammaste tihedamaks vahetamiseks. Ilma määrdata raimamine ei oleks arvatavasti võimalik, sest fosforiidi raimamisel sellise meetodiga oleks kulumine eriti märgatav. Varasemad uuringud [2] ja LCPC masinaga leitud peenestatavustegur (Tabel 7) näitavad, et fosforiit puruneb kombainiga kaevandades peeneks fraktsiooniks. Lisaks lõikepeades kasutatav paagutatud karbiidi (B2, B20, B23, G15) mehaanilised omadused nõrgenevad järsult, kui lõikeorgani töötemperatuur ületab 500 °C. [25] Lõikehamba ülejäänud osa, mis ei ole paagutatud karbiidist, on terasest (12HN31, 40H, 40HN, 36HNM, 35HGS) ja seda on töödeldud keemiliselt ning termiliselt. Töödeldud terase pinnal on suurem vastupanu abrasiivsusele. [25]

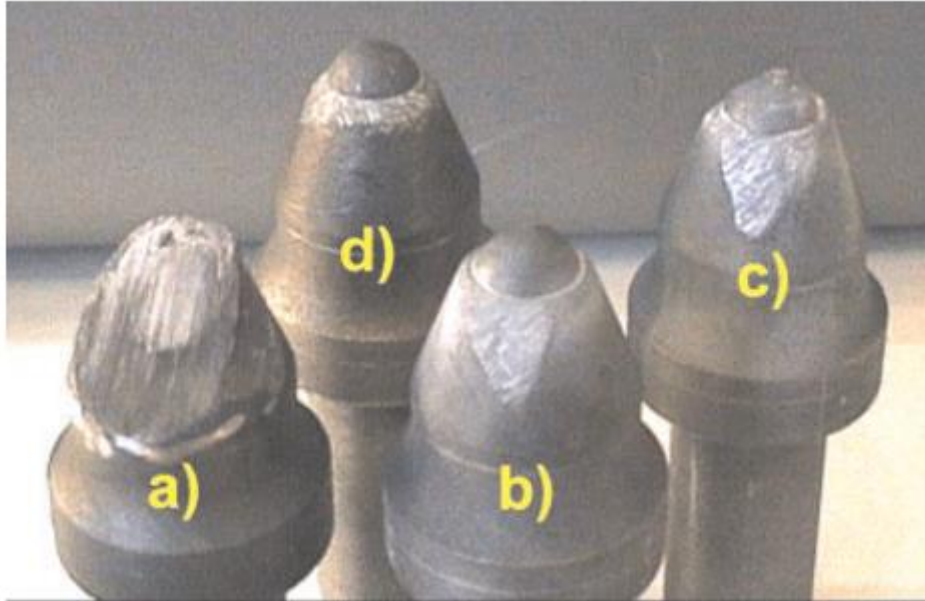


Joonis 19. Erinevad viisid lõikehamba kaitsmiseks karbiidiga, a) standardne lõikehammas, b) keevitatud lõikehambad, c) lõikehammas paagutatud karbiidist rõngaga, d) lõikehammas rõngaga, e) alandatud kehaga paagutatud karbiidist CAP-tüüpi lõikehammas. [25]

Lõikehammastele tuleb juurde panna ka jahutus-määrde süsteem, et tagada lõikehammaste pikem eluiga.



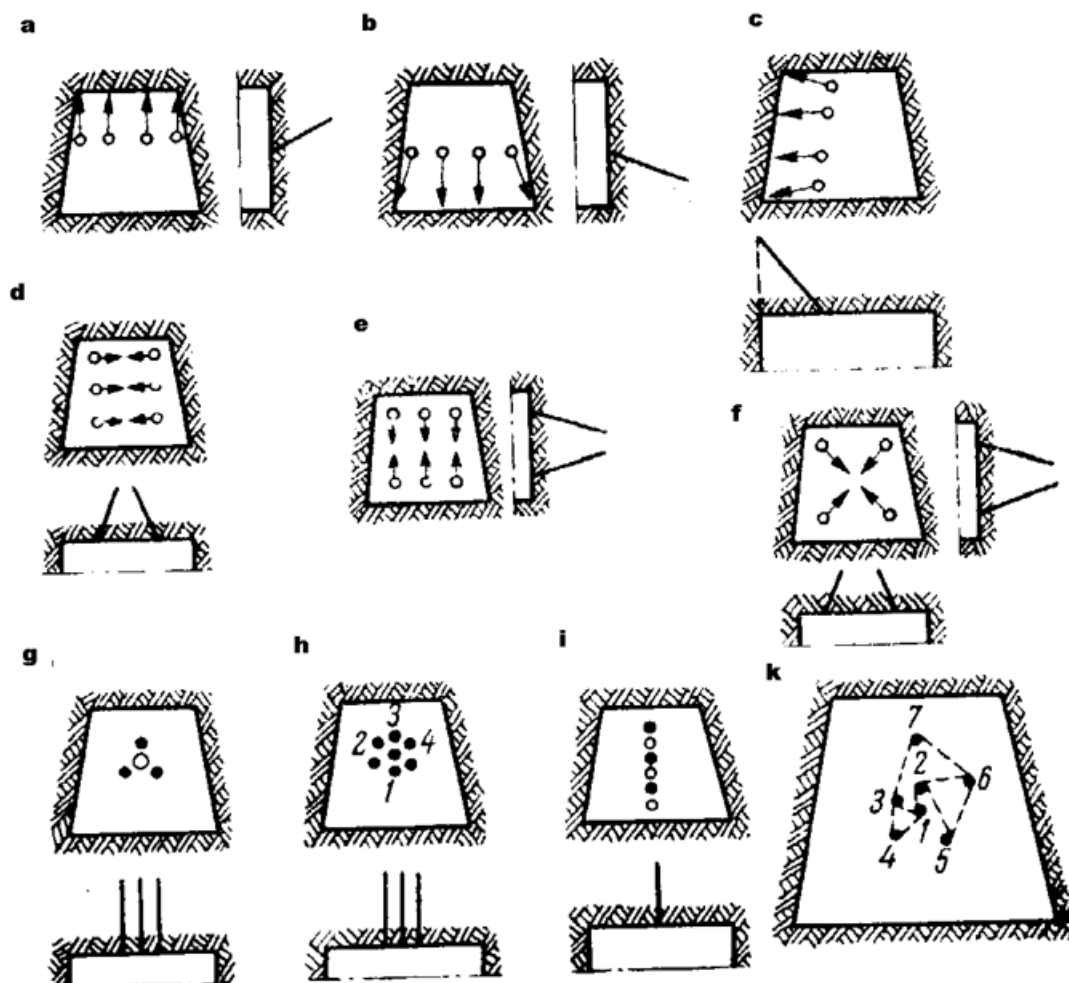
Joonis 11. a) määrdesüsteem puudub, b) määrdesüsteem, kus kõrgsurvestatud lahus lastakse lõikepea eest, c) määrdesüsteem, kus kõrgsurvestatud lahus lastakse lõikepea tagant. [24]



Joonis 12. Tangentsiaal-pöörlevad lõikehambad peale 2500 m pikkust töörežiimi. a) kuivalt raimamine, b) raimamine lõikepea eest lastud kõrgsurvestatud lahusega, c) raimamine lõikepea tagant lastud kõrgsurvestatud lahusega, d) raimamine määrdega hoidikus. [24]

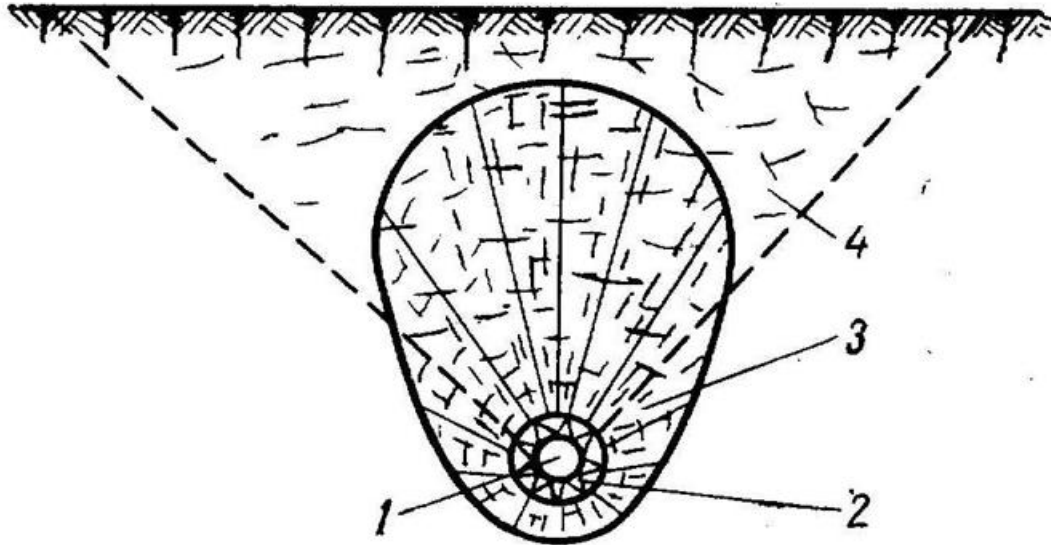
Puur-lõhketöödega väljamine

Puur-lõhketöödega väljamisel tuleb kasutada lõhkeaugumeetodit. Lõhkeaugumeetodi efektiivsus oleneb lõhkeaugu paigutusest, laengu ehitusest, vabade pindade arvust ja laengute lõhkamise järjekorrast. Kõige tõhusam on kahe vaba pinnaga lõhkeaugumeetod, kus lõhkeaugulaengud asetsevad paralleelselt vaba pinnaga. Allmaatingimustes on võimalik ainult ühe vaba pinnaga lõhkeaugu meetod, kus esimesed lõhatud laengud moodustavad uue vaba pinna (algmurde). Algmurre suurendab järgmiste laengute tõhusust. [26]



Joonis 20. Algmurrete tüübid allmaa- lõhketöödel. a) laealgmurre, b) põhjaalgmurre, c) külgalgmurre, d) püstkill-algmurre, e) rõhtkiil- algmurre, f) püramiidalgmurre, g) koonusalgmurre, h) prisma- algmurre, i) pilu-algmurre, k) spiraalalgmurre [26]

Lõhkelaengu plahvatusel tekib laengu läheduses lööklaine, mis levides muutub 5-7 lõhkelaengu läbimõõdu kaugusel helikiirusega levivaks pingelaineks. 100 laengu läbimõõdu kaugusel muutub pingelaine seismiliseks laineks. Lõhkamisel tekkinud rõhk ja lööklaine tekitavad kivimis suuri radiaalseid survepingeid ning tangentsiaalseid tõmbepingeid. [27]



Joonis 21. Kivimi purunemine laengu plahvatusel vaba pinna läheduses. 1) laeng, 2) suruala, 3) kobestusala, 4) lõhede tekkimise ala. [27]

Ka puur-lõhketöodel tuleb arvestada abrasiivsusega. Lõhkeaukude puurimisel ainult keerdpuurimisega võib abrasiivsus liigselt kulutada lõiketera ja seejärel väheneb puurimise efektiivsus. Löök-keerdpuurimisega ei ole nii suur pinge lõiketeral, sest puuripea surutakse löögiga kivimisse. Moodustunud purunemistsoonist murtakse pöörleva lõiketeraga lahti purunenud kivim. Seda puurimisviisi on tõhus kasutada keskmise kõvadusega kivimites nagu tsementeerunud liivakivi.

Optimaalse väljamismeetodi valik

Puur-lõhketööde analüüs

Kabala fosforiidi optimaalse väljamismeetodi valikut tehes tuleb arvestada sealseid keerulisi mäenduslikke tingimusi. Fosforiit asub 42 – 107 m sügavusel, mis tähendab, et puur-lõhketöödega tuleb jätta piisavalt suured tervikud lae üleval hoidmiseks. Tervikud oleksid oobulusliivakivist, mis asetsevad aleuroliidi peal ja vahetu lagi oleks oobulusliivakivist või graptoliit-argilliidist. Kuna fosforiidikihi paksus on Kabala piirkonnas 6-12 m siis ei ole tõenäoline, et kogu kiht kaevandatakse ära. Lage jääks üleval hoidma sama liivakivi, mida lõhati ning see muudab vahetu lae ebapüsivaks. Sellisel juhul tuleks siduda vahetu lagi põhilaega. Abrasiivsuse poolt oleks mõjutatud ainult lõhkeaukude puurimine ja oobulusliivakivi äravedu.

Pikk-ee kombaini analüüs

Pikk-ee kombainiga kaevandades tuleb arvestada, et kogu süsteemis on palju kuluvaid asju. Ülikõrge abrasiivsus ei kuluta ainult kombaini lõikehambaid, vaid ka vahetut eetransporti, kombaini liikuvaid osi jne. Lõikehammade tehnoloogia ja materjalide mehaanilised omadused on arenenud võrreldes 1964. aasta tehtud söekombaini katsetega Maardus. Uued kõrgtehnoloogilised materjalid nagu paagatud karbiid ja volfram karbiid on vastupidavamad liivakivi abrasiivsusele aga ei pruugi olla piisavalt kuluefektiivsed fosforiidi kaevandamiseks. Lisaks kaotavad need materjalid kõrge kuumuse juures oma mehaanilise tugevuse. Lae langetamisel tuleb probleemiks peal asuvad kaaskivimid. Kõik fosforiidi peal asuvad kivimid muutuvad kaevandamiskõlbmatuks.

Järeldus

Punktkoormustest näitas, et fosforiidi survetugevus ei olnud suur (Lisa 5). Fosforiidi ja põlevkivi tugevus on üldiselt samas suurusjärgus, vastavalt 4,19 MPa ja 1,69 MPa. Ainult tugevust arvestades saaks fosforiiti mehaaniliselt väljata, nagu praegu tehakse Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääris põlevkiviga. Abrasiivsus on aga ülikõrge 1373 g/t (Tabel 7) võrreldes põlevkivi 26,16 g/t kohta (Tabel 9). Suur abrasiivsus tekitab probleeme lõikehammade kulutamisel. Tänapäevased kompleksmaterjalid, mida kasutatakse lõikehammade lõikepeades võivad piirata kulutamist aga siis tuleb veenduda, et lõikehammade temperatuur ei ületa 500 °C.

Uute kombainikatsetustega saaks anda täpsemaid hinnanguid, kuidas mõjutab abrasiivsus lõikehammade kulumist. Praeguse info olemasolul on optimaalne väljamismeetod Kabala maardla tingimustes puur-lõhketööd.

Kokkuvõte

Eesti fosforiiti kaevandades kindlustaksime me nii Euroopa Liidu kui ka Eesti fosforväetiste ja fosforhappe turu. Kõige kvaliteetsem ja kõige rohkem geoloogiliselt uuritud fosforiidilasum asub Rakvere maardlas Lääne-Kabala piirkonnas. Selle maa-aluseliseks kaevandamiseks ei ole loodud väljamistehnoloogiat. Antud bakalaureusetöö eesmärk oli valida välja väljamistehnoloogia fosforiidi kaevandamiseks, kasutades LCPC meetodil leitud abrasiivsust ja punktkoormustesti.

Geoloogilised ja mäenduslikud tingimused on Kabala fosforiidimaardlas keerulised. Kabala maardla fosforiit asub 42 m – 107 m sügavusel. Fosforiidikihi peal asuvad mitmed haprad liivakivid ning teised maavarad, mida oleks perspektiivikas tulevikus kaevandada aga ainult fosforiiti kaevandades muutuvad need kasutuskõlbmatuks.

Katsetuste jaoks võeti proovid Ülgase fosforiidikaevandusest ja Toolse jõe kalda paljandilt. Põlevkivi referentsproovid võeti Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjäärist. Seejärel tehti kivimitele punktkoormustest ja LCPC meetodil abrasiivsuse katse.

Katsetatud Ülgase fosforiidiproovi abrasiivsuseks tuli $Abr = 224,28 \pm 26,43$ g/t, mis teeb abrasiivsuse klassiks "Väheabrasiivne". Toolse fosforiidiproovide abrasiivsuse keskmiseks tuli $Abr = 1373,79 \pm 320,62$ g/t ning vastab abrasiivsuse klassile "Üliabrasiivne". Punktkoormustesti tulemuseks Toolse fosforiidil tuli $I_{s(50)} = 4,19 \pm 0,58$ MPa, Ülgase fosforiidil $I_{s(50)} = 0,51 \pm 0,2$ MPa. Põhja-Kiviõli II karjääri $I_{s(50)} = 1,69 \pm 0,24$. Töös välja toodud abrasiivsuse ja punktkoormustesti tulemused näitavad, et väljamine toimub puur-lõhketöödega. Mehaaniline väljamine ei ole otstarbekas suure abrasiivsuse tõttu. Mehaaniliseks väljamiseks on vaja teha lisauuringuid, kuidas mõjutab fosforiidilasumi ebakorrapärasus, tsementeeruvus lõikehammaste ning muude mehaaniliste osade kulumist. Lisaks tuleks uurida erinevate jahutus ja määrdesüsteemide mõju lõikehammastele.

Lisad

	Asukoht	Fraktsioon	Mg1	Mg2	Mp1	Mp2	U	Abr	Br	
		mm	g	g	g	g		g/t	%	
1	Toolse	4-6,3	501,20	95,57	46,18	45,40	773,0	1542,30	80,93	
2	Toolse	4-6,3	500,50	221,89	46,16	45,47	689,0	1376,62	55,67	
3	Toolse	4-6,3	500,20	221,95	46,23	45,57	656,0	1311,48	55,63	
4	Toolse	4-6,3	500,40	224,87	46,38	45,70	679,0	1356,91	55,06	
5	Toolse	4-6,3	501,60	219,01	46,23	45,56	673,0	1341,71	56,34	
6	Toolse	4-6,3	500,40	222,81	46,30	45,62	680,0	1358,91	55,47	
7	Toolse	4-6,3	499,40	221,09	45,80	45,12	680,0	1361,63	55,73	
8	Toolse	4-6,3	501,20	215,34	46,39	45,72	672,0	1340,78	57,04	
								1373,79	58,98	Keskmine
								462,69	21,35	Standardhälve
								8	8	Valimi suurus
								1311,48	55,06	Vähim
								1542,30	80,93	Suurim
								0,05	0,05	Usaldusnivoo (95%)
								320,62	14,79	Usaldusvahemik
								1373,79 ± 320,62	58,98 ± 14,79	Tulemus

Tabel 7. Toolse fosforiidiproovide abrasiivsus.

	Asukoht	Fraktsioon	Mg1	Mg2	Mp1	Mp2	U	Abr	Br	
Ühik		mm	g	g	g	g		g/t	%	
1	Ülgase	4-6,3	500,00	19,52	45,85	45,75	98,7	197,40	96,10	
2	Ülgase	1,6-4	500,00	14,27	46,26	46,17	89,0	178,00	97,15	
3	Ülgase	1,6-4	501,20	16,26	46,08	46,00	83,0	165,60	96,76	
4	Ülgase	4-6,3	501,50	16,75	46,05	45,93	118,0	235,29	96,66	
5	Ülgase	6,3-12,5	500,90	28,09	46,25	46,10	156,0	311,44	94,39	
6	Ülgase	4-6,3	500,20	17,47	46,22	46,09	130,0	259,90	96,51	
7	Ülgase	4-6,3	500,00	21,09	45,92	45,81	107,0	214,00	95,78	
8	Ülgase	4-6,3	500,20	16,79	46,14	46,03	109,0	217,91	96,64	
9	Ülgase	4-6,3	501,40	19,44	46,26	46,15	106,0	211,41	96,12	
10	Ülgase	4-6,3	500,40	15,48	46,16	46,03	126,0	251,80	96,91	
								224,28	96,30	Keskmine
								42,64	0,79	Standardhälve
								10	10	Valimi suurus
								165,60	94,39	Vähim
								311,44	97,15	Suurim
								0,05	0,05	Usaldusnivoo (95%)
								26,43	0,49	Usaldusvahemik
								224,28 ± 26,43	96,3 ± 0,49	Tulemus

Tabel 8. Ülgase fosforiidiproovide abrasiivsus.

	Asukoht	Fraktsioon	Mg1	Mg2	Mp1	Mp2	U	Abr	Br	
Tähis		mm	g	g	g	g		g/t	%	
1	Kiviõli	4-6,3	250,60	170,60	45,825	45,82	5	19,95	31,92	
2	Kiviõli	4-6,3	250,80	168,00	46,173	46,167	6	23,92	33,01	
3	Kiviõli	4-6,3	250,00	164,80	46,314	46,305	9	36,00	34,08	
4	Kiviõli	4-6,3	250,60	165,00	46,202	46,199	3	11,97	34,16	
5	Kiviõli	4-6,3	249,90	167,70	46,254	46,249	5	20,01	32,89	
6	Kiviõli	4-6,3	250,40	171,80	45,92	45,911	9	35,94	31,39	
7	Kiviõli	4-6,3	250,00	170,10	45,523	45,519	4	16,00	31,96	
8	Kiviõli	4-6,3	249,80	163,90	45,687	45,677	10	40,03	34,39	
9	Kiviõli	4-6,3	250,30	164,10	45,782	45,774	8	31,96	34,44	
10	Kiviõli	4-6,3	250,30	167,50	46,2	46,196	4	15,98	33,08	
11	Kiviõli	4-6,3	250,40	168,00	46,089	46,08	9	35,94	32,91	
								26,16	33,11	Keskmine
								10,02	1,06	Standardhälve
								11	11	Valimi suurus
								11,97	31,39	Vähim
								40,03	34,44	Suurim
								0,05	0,05	Usaldusnivoo (95%)
								5,92	0,63	Usaldusvahemik
								26,16 ± 5,92	33,11 ± 0,63	Tulemus

Tabel 9. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääri põlevkiviproovide abrasiivsus.

Proovi nr.	Kivim	Kihilisus	Koonuste vahe (enne krõpsu)	Koonuste vahe (pärast krõpsu)	Koonuste vahe (keskmine)	Pala laius (ülevalt)	Pala laius (alt)	Pala laius (keskmine)	Surve tipp	Surve tipp	Puru- nemis- pindala	Ekviva- lentse silindri diameetri ruut	Punkt- koormus- indeks	Ekviva- lentse silindri dia- meeter	Diameetri korrekt- siooni- tegur	Standardi- seeritud punkt- koormus- indeks
		piki/risti	D	D'		W ₁	W ₂	W	ρ	F _B	A	De ²	I _s	De	F	I _{s(50)}
			mm	mm		mm	mm	mm	Mpa	kN	mm ²	mm ²	MPa	mm		MPa
1	fosforiit	risti	30	27	28,5	45	29	37,0	0,32	0,30	1054,50	1342,63	0,22	37	0,87	0,19
2	fosforiit	risti	26	21	23,5	50	36	43,0	0,26	0,24	1010,50	1286,61	0,19	36	0,86	0,16
3	fosforiit	risti	21	19	20,0	30	30	30,0	0,08	0,08	600,00	763,94	0,10	28	0,77	0,08
4	fosforiit	risti	26	20	23,0	28	28	28,0	1,44	1,33	644,00	819,97	1,62	29	0,78	1,26
5	fosforiit	risti	32	28	30,0	45	45	45,0	0,23	0,22	1350,00	1718,87	0,13	41	0,92	0,12
6	fosforiit	risti	27	21	24,0	35	25	30,0	1,09	1,01	720,00	916,73	1,10	30	0,80	0,88
7	fosforiit	risti	33	30	31,5	53	35	44,0	0,21	0,20	1386,00	1764,71	0,11	42	0,92	0,10
8	fosforiit	risti	25	20	22,5	40	39	39,5	0,59	0,55	888,75	1131,59	0,49	34	0,84	0,41
9	fosforiit	risti	30	24	27,0	30	31	30,5	2,16	1,99	823,50	1048,51	1,90	32	0,82	1,56
10	fosforiit	risti	29	21	25,0	35	40	37,5	1,02	0,94	937,50	1193,66	0,79	35	0,85	0,67
11	fosforiit	risti	31	25	28,0	40	35	37,5	0,19	0,18	1050,00	1336,90	0,13	37	0,87	0,12
12	fosforiit	risti	32	27	29,5	25	25	25,0	1,02	0,94	737,50	939,01	1,00	31	0,80	0,80
13	fosforiit	risti	32	26	29,0	30	35	32,5	0,46	0,43	942,50	1200,03	0,36	35	0,85	0,30
14	fosforiit	risti	29	26	27,5	34	35	34,5	0,16	0,15	948,75	1207,99	0,12	35	0,85	0,11
15	fosforiit	risti	22	18	20,0	44	40	42,0	0,88	0,81	840,00	1069,52	0,76	33	0,83	0,63
16	fosforiit	risti	26	18	22,0	30	34	32,0	0,57	0,53	704,00	896,36	0,59	30	0,79	0,47
17	fosforiit	risti	29	18	23,5	35	25	30,0	0,35	0,33	705,00	897,63	0,37	30	0,79	0,29
18	fosforiit	risti	31	26	28,5	25	20	22,5	0,43	0,40	641,25	816,46	0,49	29	0,78	0,38
19	fosforiit	risti	24	21	22,5	25	35	30,0	0,39	0,36	675,00	859,44	0,42	29	0,79	0,33
20	fosforiit	risti	25	18	21,5	30	32	31,0	1,63	1,50	666,50	848,61	1,77	29	0,78	1,39

0,51	Keskmine
0,45	Standardhälve
20	Valimi suurus
0,08	Vähim
1,56	Suurim
0,05	Usaldusnivoo (95%)
0,198	Usaldusvahemik
0,51 ± 0,2	Tulemus

Tabel 10. Ülgase fosforiidiproovide punktkoormustesti tulemused.

Proovi nr.	Kivim	Kihilisus	Koonuste vahe (enne kröpsu)	Koonuste vahe (pärast kröpsu)	Koonuste vahe (keskmine)	Pala laius (ülevall)	Pala laius (all)	Pala laius (keskmine)	Surve tipp	Surve tipp	Purunemis-pindala	Ekvivalentse silindri diameetri ruut	Punkt-koormus-indeks	Ekvivalentse silindri diameeter	Diameetri korrektsiooni-tegur	Standardiseeritud punkt-koormus-indeks	
		piki/risti	D	D'		W ₁	W ₂	W	p	F _B	A	De ²	I _s	De	F	I _{s(50)}	
			mm	mm		mm	mm	mm	Mpa	kN	mm ²	mm ²	MPa	mm		MPa	
1	fosforiit	risti	22	16	19,0	33	29	31,0	5,97	6,48	589,0	749,9	8,64	27	0,76	6,59	
2	fosforiit	risti	32	22	27,0	38	27	32,5	4,23	3,90	877,5	1117,3	3,49	33	0,83	2,91	
3	fosforiit	risti	23	19	21,0	28	40	34,0	6,77	6,23	714,0	909,1	6,85	30	0,80	5,46	
4	fosforiit	risti	17	12	14,5	38	35	36,5	3,89	3,58	529,3	673,9	5,31	26	0,74	3,96	
5	fosforiit	risti	33	27	30,0	37	55	46,0	3,82	3,52	1380,0	1757,1	2,00	42	0,92	1,85	
6	fosforiit	risti	28	21	24,5	38	40	39,0	4,85	4,47	955,5	1216,6	3,67	35	0,85	3,12	
7	fosforiit	risti	16	12	14,0	40	44	42,0	3,41	3,14	588,0	748,7	4,19	27	0,76	3,20	
8	fosforiit	risti	30	25	27,5	39	43	41,0	7,40	6,81	1127,5	1435,6	4,74	38	0,88	4,19	
9	fosforiit	risti	21	16	18,5	39	44	41,5	4,51	4,15	767,8	977,5	4,25	31	0,81	3,44	
10	fosforiit	risti	16	12	14,0	41	41	41,0	4,45	4,10	574,0	730,8	5,61	27	0,76	4,25	
11	fosforiit	risti	21	16	18,5	40	37	38,5	7,40	6,81	712,3	906,9	7,51	30	0,80	5,98	
12	fosforiit	risti	18	13	15,5	38	36	37,0	4,30	3,96	573,5	730,2	5,42	27	0,76	4,11	
13	fosforiit	risti	18	13	15,5	37	34	35,5	4,32	3,98	550,3	700,6	5,68	26	0,75	4,27	
14	fosforiit	risti	17	13	15,0	30	31	30,5	3,33	3,07	457,5	582,5	5,27	24	0,72	3,80	
15	fosforiit	risti	21	12	16,5	35	28	31,5	5,10	4,70	519,8	661,8	7,10	26	0,74	5,27	
16	fosforiit	risti	20	16	18,0	34	29	31,5	2,68	2,47	567,0	721,9	3,42	27	0,76	2,59	
17	fosforiit	risti	17	12	14,5	24	26	25,0	2,19	2,02	362,5	461,5	4,38	21	0,68	2,99	
18	fosforiit	risti	21	17	19,0	30	32	31,0	5,83	5,37	589,0	749,9	7,16	27	0,76	5,46	
19	fosforiit	risti	15	10	12,5	43	50	46,5	4,01	3,69	581,3	740,1	4,99	27	0,76	3,79	
20	fosforiit	risti	25	17	21,0	36	35	35,5	8,43	7,76	745,5	949,2	8,18	31	0,80	6,57	
																4,19	Keskmine
																1,32	Standardhälve
																20	Valimi suurus
																1,85	Vähim
																6,59	Suurim
																0,05	Usaldusnivoo (95%)
																0,579	Usaldusvahemik
																4,19 ± 0,58	Tulemus

Tabel 11. Toolse fosforiidiproovide punktkoormustesti tulemused.

Proovi nr.	Kivim	Kihilisus	Koonuste vahe (enne krõpsu)	Koonuste vahe (pärast krõpsu)	Koonuste vahe (keskmine)	Pala laius (ülevall)	Pala laius (alt)	Pala laius (keskmine)	Surve tipp	Surve tipp	Purunemispindala	Ekvivalentse silindri diameetri ruut	Punktkoormusindeks	Ekvivalentse silindri diameeter	Diameetri korrigeeritud tegur	Standardiseeritud punktkoormusindeks	
		piki/risti	D	D'		W ₁	W ₂	W	p	F _B	A	De ²	I _s	De	F	I _{s(50)}	
			mm	mm		mm	mm	mm	Mpa	kN	mm ²	mm ²	MPa	mm		MPa	
1	Pölevkivi	risti	15	10	12,5	55	50	52,5	1,13	1,04	656,25	836	1,24	29	0,78	0,97	
2	Pölevkivi	risti	27	21	24	47	30	38,5	2,55	2,35	924	1176	2,00	34	0,84	1,69	
3	Pölevkivi	risti	26	20	23	43	30	36,5	1,44	1,33	839,5	1069	1,24	33	0,83	1,03	
4	Pölevkivi	risti	25	20	22,5	39	25	32	3,21	2,96	720	917	3,23	30	0,80	2,58	
5	Pölevkivi	risti	22	17	19,5	34	26	30	2,36	2,18	585	745	2,93	27	0,76	2,23	
6	Pölevkivi	risti	38	32	35	41	29	35	3,53	3,25	1225	1560	2,08	39	0,90	1,87	
7	Pölevkivi	risti	35	30	32,5	25	38	31,5	2,46	2,27	1023,75	1303	1,74	36	0,86	1,50	
8	Pölevkivi	risti	34	27	30,5	51	49	50	4,14	3,81	1525	1942	1,96	44	0,94	1,85	
9	Pölevkivi	risti	35	29	32	31	48	39,5	3,54	3,26	1264	1609	2,03	40	0,91	1,83	
10	Pölevkivi	risti	26	22	24	27	25	26	1,6	1,43	624	795	1,80	28	0,77	1,39	
11	Pölevkivi	risti	37	30	33,5	30	35	32,5	3,26	3	1088,75	1386	2,16	37	0,88	1,90	
12	Pölevkivi	risti	26	21	23,5	27	35	31	1,89	1,74	728,5	928	1,88	30	0,80	1,50	
13	Pölevkivi	risti	42	36	39	30	55	42,5	2,97	2,74	1657,5	2110	1,30	46	0,96	1,25	
14	Pölevkivi	risti	30	25	27,5	30	21	25,5	2,77	2,53	701,25	893	2,83	30	0,79	2,25	
15	Pölevkivi	risti	28	23	25,5	43	31	37	1,46	1,58	943,5	1201	1,32	35	0,85	1,12	
16	Pölevkivi	risti	27	22	24,5	39	31	35	1,64	1,51	857,5	1092	1,38	33	0,83	1,15	
17	Pölevkivi	risti	18	13	15,5	35	41	38	2,52	2,32	589	750	3,09	27	0,76	2,36	
18	Pölevkivi	risti	26	22	24	36	35	35,5	0,94	0,87	852	1085	0,80	33	0,83	0,66	
19	Pölevkivi	risti	28	22	25	43	38	40,5	3,45	3,18	1012,5	1289	2,47	36	0,86	2,13	
20	Pölevkivi	risti	40	29	34,5	54	60	57	6,94	6,39	1966,5	2504	2,55	50	1,00	2,55	
																1,69	Keskmine
																0,56	Standardhälve
																20	Valimi suurus
																0,66	Vähim
																2,58	Suurim
																0,05	Usaldusnivoo (95%)
																0,244	Usaldusvahemik
																1,69 ± 0,24	Tulemus

Tabel 12. Põhja-Kiviõli II põlevkivikarjääri põlevkiviproovide punktkoormustesti tulemused.

Kasutatud kirjandus

- [1] A. Rosentau, V. Puura, L. Ainsaar, H. Aosaar ja L. Zukker, „Lääne-Virumaa strateegilised maavarad,“ Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Tartu, 2010. pp. 45-50
- [2] L. Kalman, H. Aruküla, E. Lüütse, A. Reier, H. Piiraja, B. Tšalõi, A. Kukrus, R. Tali ja E. Tihkan, „Uute kaevandamisviisi variantide katsetamine Maardu fosforiidikaevanduses,“ Tallinna Polütehniline Instituut, Tallinn, 1964. pp. 45-54
- [3] K. Mucha ja K. Krauze, „Planning experiment for laboratory tests on rock abrasivity,“ AGH University of Science and Technology, Krakow, 2018.
- [4] R. Fowell ja M. A. Bakar, „A review of Cerchar and LCPC rock abrasivity measurement methods,“; *1 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, London, 2007.
- [5] Euroopa Komisjon, „EUR-Lex,“ 2 Veebruar 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:52011DC0025>. [Kasutatud 8 Aprill 2019].
- [6] Euroopa Komisjon, „EUR-Lex,“ 26 5 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/ALL/?uri=CELEX%3A52014DC0297>. [Kasutatud 8 Aprill 2019].
- [7] Euroopa Komisjoni peadirektoraat, Siseturu tööstuse ettevõtluse ja VKEde, „EUR-Lex,“ 13 9 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/ALL/?uri=CELEX:52017DC0490>. [Kasutatud 8 Aprill 2019].
- [8] IndexMundi, „Rock Phosphate Monthly Price - Euro per Metric Ton,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=180¤cy=eur>. [Kasutatud 10 05 2019].
- [9] The World Bank, „The World Bank Data Catalog GEM Commodities,“ 19 August 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/gem-commodities>. [Kasutatud 8 Aprill 2019].

- [10] Alliance Européenne des Engrais Phosphatés, „Phosphorus: Key to Life,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://aeep.eu/data-and-statistics/fertilizers/>. [Kasutatud 21 05 2019].
- [11] Grand View Research, „Phosphate Fertilizers Market Size \$78,06 Billion By 2025,“ San Francisco, 2018.
- [12] A. Raukas ja A. Teedumäe, Geology and Mineral Resource of Estonia, Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus, 1997.
- [13] H. Aruküla, Исследование комплексных технологических решений подземной разработки фосфоритно-сланцевых месторождений Эстонской ССР : (промежуточный) отчёт : шифр работы 312, Tallin: Tallinna Polütehniline Instituut, 1987.
- [14] H. Käsling ja K. Thuro, „Determining rock abrasivity in the laboratory,“ Technische Universität München, Germany, München, 2010.
- [15] Wille Geotechnik, „Abrasion Test Device AT 1 Operation manual,“ APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH, Rosdorf, 2017.
- [16] T. Tomberg, E. Siim ja S. Aleks, „Kivimimehaanika, väljamine ja töötlemine" Metoodiline juhend laboratoorse tööde sooritamiseks,“ Tallinn, 2019. pp. 22-25
- [17] K. Thuro, J. Singer, H. Käsling ja M. Bauer, „Determining abrasivity with the LCPC test,“ American Rock Mechanics Association, Vancouver, 2007.
- [18] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock*, West Conshohocken: ASTM International, 1995.
- [19] T. Tomberg, *Kivimite väljamine, Õppematerjal*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2019.
- [20] T. Tomberg, *Lõhkeaukude puurimine, Õppematerjal*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2019.
- [21] E. Reinsalu, Eesti mäendus : maapõueinseneri õpik, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2011. pp 211-

215.

- [22] M.-P. Huynh ja D. F. Laefer, „Expansive cements and soundless chemical demolition agents : state of technology review,“ University College Dublin, Dublin, 2009.
- [23] E. Reinsalu, A. Anepaio, V. Karu, E. Lüütre, R. Roots, M. Saarnak, O. Sein ja V. Väizene, „Nõrkade kihiliste kivimite tugevusomadused,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2014. pp 12-16.
- [24] K. Kotwica, „Effect of selected working conditions of cutting picks on their wear during the mining of hard rocks,“ *Mechanics and Control*, kd. 29, nr 3, p. 110, 2010.
- [25] K. Krauze, L. Boloz ja T. Wydro, „Parametric Factors for the Tangential-Rotary Picks Quality Assessment / Wskaźniki Parametryczne Oceny Jakości Noży Stycznno-Obrotowych,“ *Archives of Mining Sciences*, kd. 60, nr 1, pp. 265-281, 2015.
- [26] T. Tomberg, „Kaeveõõnte läbindamine ja toestamine,“ Õppematerjal, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2019.
- [27] T. Tomberg, „Lõhketööde alused,“ Õppematerjal, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2019.
- [28] T. Tomberg, *Kivimite mehaanilised omadused, Õppematerjal* Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2019.

Metaandmed

Töö pealkiri (eesti keeles): Fosforiidi optimaalse väljamismeetodi valik Kabala maardla tingimustes

Töö pealkiri (inglise keeles): Selection of optimal breaking method for phosphate ore in conditions of Kabala deposit

Autor: Oliver Vilu

Juhendaja: Tõnu Tomberg

Kaitsmise kuupäev: 07.06.2019

Töö keel: est

Asutus (eesti keeles): Tallinna Tehnikaülikool

Asutus (inglise keeles): Tallinn University of Technology

Teaduskond (eesti keeles): Loodusteaduskond

Teaduskond (inglise keeles): School of Science

Instituut (eesti keeles): Geoloogia Instituut

Instituut (inglise keeles): Department of Geology

Märksõnad (eesti keeles): fosforiit, väljamine, Kabala, Rakvere maardla, abrasiivsus

Märksõnad (inglise keeles): phosphorite, breaking, Kabala, Rakvere deposit, abrasivity

Õigused:

Lihtlitsents lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ja reprodutseerimiseks

Mina Oliver Vilu (sünnikuupäev: 17.09.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Fosforiidi optimaalse väljamismeetodi valik Kabala maardla tingimustes“,

mille juhendaja on: Tõnu Tomberg

1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas TTÜ raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

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

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

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

allkiri

kuupäev