



Laialipaiskuvate kivimikildude ohuala määramise meetodi valikukriteeriumid lõhkamisel Eesti lubja- ja dolokivi karjäärides

Magistritöö

Üliõpilane: Jaana Aunapuu, 191966 LARM

Juhendaja: Tõnu Tomberg, Geoloogia Instituut, lektor

Õppekava: Maapõueressursid (LARM 18/18)

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: Jaana Aunapuu

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Tõnu Tomberg

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Lihtlitsents

Mina Jaana Aunapuu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Laialipaiskuvate kivimikildude ohuala määramise meetodi valikukriteeriumid lõhkamisel Eesti lubja-ja dolokivi karjäärides,

mille juhendaja on Tõnu Tomberg,

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

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

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

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

03.06.2021

Sisukord

Autorideklaratsioon.....	2
Annotatsioon.....	6
Abstract.....	7
Jooniste loetelu.....	8
Tabelite loetelu.....	9
Kasutatud mõistete ja lühendite loetelu.....	10
1. Sissejuhatus.....	11
2. Lõhketööde ohutegurid.....	12
2.1. Mürgised plahvatusgaasid.....	14
2.2. Müra.....	15
2.3. Seismiline efekt.....	16
2.4. Õhulööklaine.....	18
2.5. Laialipaiskuvad kivimikillud.....	18
2.5.1. Laialipaiskuvad killud kui ohuallikas.....	19
2.5.2. Laialipaiskuvate kildude tekkemehhanismid.....	21
2.6. Lõhkamiskeskond.....	25
2.6.1. Eesti geoloogiline ehitus.....	25
2.6.2. Paekarjäärid Eestis.....	26
2.6.3. Mäendustingimuste ja sellest sõltuvalt lõhketööde tehnoloogia suur varieeruvus erinevates karjäärides.....	29
3. Metoodika.....	32
3.1. Kasutuselolevad tehnilised meetmed ohuala mõõtmete vähendamiseks.....	32
3.2. Kehtivad ohutusnõuded ja nende mittevastavus reaalsele olukorrale.....	33
3.3. Ohuala määramise alternatiivsed meetodid.....	36
3.3.1. Matemaatilised mudelid.....	36
3.3.1.1. Poolempiirilised mudelid.....	36
3.3.1.2. Empiirilised mudelid.....	38
3.3.1.3. Riskipõhine meetod.....	40
3.3.1.4. Hägusa hulga teooria rakendamise meetod koos tehisnärvivõrgu lahendamisega.....	41
3.3.1.5. Kokkuvõtte matemaatilistest mudelitest.....	46
4 Tulemused.....	47
4.1 Valitud meetod koos põhjendusega.....	47
4.2 Reaalne kivimikildude laialipaiskumine.....	47

4.3 Ettevõtetelt saadud algandmed	52
4.4 Algandmete genereerimine arvutusteks.....	53
4.5 Arvutuste tulemused.....	55
4.6 Järeldused arvutustest	63
Kokkuvõte.....	65
Tänuavaldused	66
Kirjanduse loetelu.....	67
Lisa 1. Arvutused erinevate lõhkeaine erikuludega	70
Lisa 2. Arvutused reaalseste karjääride andmete põhjal.....	88
Reaalne karjäär A	88
Reaalne karjäär B.....	88
Reaalne karjäär C.....	89
Reaalne karjäär D	89
Reaalne karjäär E.....	90
Reaalne karjäär F.....	90
Reaalne karjäär G	91

Annotatsioon

Käesoleva magistritöö teemaks on pealmaa-lõhketöödel laialipaiskuvad kivimikillud ja nende järgi määratud ohuala mõõtmete optimeerimine. Seni määratakse Eestis nimetatud ohuala mõõtmed 1950.–1960. aastatel koostatud tabelite järgi ehk need pärinevad ajast, mil kasutati suure läbimõõduga lõhkeauke. Ka olid tollal üksiklaengud peaaegu suurusjärgu võrra suuremad kui nüüd ning viitegrupid (lühiviitlõhkamisel üheaegselt plahvatavad lõhkeainekogused) tunduvalt suuremad kui käesoleval ajal. Tänapäeval on lõhketöödega tegelevatel ettevõtetel probleeme ohuala määramisega, sest hetkel kasutusel olev meetod on iganenud ja suuresti üledimensioneeritud. Ka ei arvestata selle meetodi juures puur-lõhketööde tegelikke parameetreid ega kivimikildude paiskumise suunda.

Kivimikildude paiskumine on lõhketöödel relevantne ohufaktor, mille ebaõige määramine on ühest küljest põhjustanud õnnetusi, kui see on määratud liiga väikeste mõõtmetega. Teisest küljest on see üledimensioneeritult arvestamise korral tähendanud lõhketööde olulisemalt kulukamat läbiviimist. Töös arutletakse ohutuse ja selle tagamise rolli lõhketöödel. Asjakohane on ennetada kivimikildude laialipaiskumist, kuid ülesanne on väljakutsuv võrreldes vibratsiooni ja õhulööklaine mõju hindamisega. Uuring baseerub oluliselt ka lõhketöid läbiviivatelt ettevõtetelt saadud andmetel laialipaiskuvate kivimikildude reaalsete paiskekauguste kohta.

Töös on tutvustatud erinevaid arvutusmeetodeid kivimitükkide laialipaiskumise hindamiseks ja analüüsimiseks. Praktilises osas on analüüsitud ja arvutuslikult prognoositud laialipaiskuvate kivimikildude paiskekaugust kasutades hägusloogika meetodit. Reaalsete töötavate karjääride andmete baasil on koostatud näitlik andmebaas, mille põhjal on tehtud järeldusi edasisteks uurimissuundadeks lõhketööde ohutuse valdkonnas.

Selection criteria for choosing a method of flyrock safety distance assessment when blasting at Estonian limestone and dolostone quarries

Abstract

This master's thesis deals with flyrock from surface blasting and optimisation of related safety distance. Until now, safety distances are determined in Estonia following calculation tables from the 1950s and 1960s, when blasters used large-diameter blast-holes. During those times individual charges were almost twice as much in size as today and delay groups (i.e. amount of explosives blasted simultaneously in short delay time blasting) were considerably larger. The method that uses outdated and overdimensioned blasting parameters causes problems for current blasting companies in determining safety distances.

Flyrock is the main cause of casualties and injuries during blasting operations when the dimensions have been underestimated. On the other hand, overestimation has led to considerably more costly blasting operations. It is necessary to prevent flyrock from scattering around, but this task is not as straightforward as dealing with seismic vibration and shockwaves. Ensuring blasting safety is analysed in this thesis. Important data received from blasting companies regarding flyrock safety in real situations forms a part of the basis of this study.

Various methods for calculation and analysis of flyrock are presented. The method of fuzzy logic has been used in the practical part of the thesis to calculate and analyze flyrock fragments. An illustrative database has been compiled using data from currently operating quarries with the purpose of drawing conclusions for further research in the field of blasting safety.

Jooniste loetelu

Joonis 1. Ebaõnnestumise põhjused (joonis on tõlgitud Seccatore jt, 2012 järgi).	14
Joonis 2. Mürgised gaasid(Researchers using drones to detect noxious gas released by explosions, 2020).....	15
Joonis 3. Plahvatusel vabaneva heli levimine (joonis on tõlgitud Schillinger ja Laowattanabandit, 1999 järgi).....	16
Joonis 4. Lainete levimine (koostatud Rosenthal ja Morlock,1987 järgi).	17
Joonis 5. Laialipaiskuvad kivimikillud (Marist,2020).	19
Joonis 6. Lõhkeaukude puurimine Sillamäel 11.06.2018. Autor: Siim Eensoo.	22
Joonis 7. Skeemid kildude paiskumise suunast (1) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.....	23
Joonis 8. Skeemid kildude paiskumise suunast (2) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.....	23
Joonis 9. Skeemid kivimikildude paiskumise suunast (3) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.	24
Joonis 10. Geoloogilise häirituse mõju lõhketöole (Einasto, 2013).	24
Joonis 11. Kuimetsa karstiaala (Autor: Heidi Tooming).	26
Joonis 12. Aktiivsed lubja-ja dolokivikarjäärid 2012.a (Nabala, 2021).....	27
Joonis 13. Kerge kaitsematt (CBC News, 2015).....	33
Joonis 14. Illustratsioon laialipaiskuvate kivimite kohta koostatud (Ghasemi jt, 2012) järgi.	39
Joonis 15. Ohutsooni definitsioon. Tõlgitud (Ghasemi jt, 2012) põhjal.....	41
Joonis 16. Hägusa järeltuse süsteem.	43
Joonis 17. Mamdani hägusmudel.	45
Joonis 18. Killud paiskuvad kaamerasse. Võetud 27.02.2020 videost (Marist,2020).	48
Joonis 19. Kildude paiskumine (Marist,2020).	49
Joonis 20. Paiskuvad kivimikillud (Marist,2020).	50
Joonis 21. Lõhkamise tulemus, kui kaamera on 15-20 m kaugusel lõhatavast plokist (Marist,2020)..	51
Joonis 22. Laialipaiskuvad kivimikildude suund videode põhjal.	52
Joonis 23. Kivimikilude paiskekauguse sõltuvus lõhkeaugu sügavusest.....	57
Joonis 24. Kivimikildude paiskumiskauguse sõltuvus lõhkeaine erikulust.....	57
Joonis 25. Puurtööde erimahu seos kivimikildude paiskumiskaugusega.	62
Joonis 26. Topise seos laialipaiskuvate kildude kaugusega.	63

Tabelite loetelu

Tabel 1. Õnnetused lõhketöödel (tabel on tõlgitud Seccatore jt, 2012 järgi).....	13
Tabel 2. Mõju hindamine (Vuolio, 1990).	18
Tabel 3. Lõhketöödega seotud õnnetused Eestis (TTJA andmed).	20
Tabel 4. Paekivi tugevustegur ja lademed (Kübar, 2004).....	27
Tabel 5. Lõhatavad lademed (Kübar, 2004).	28
Tabel 6. Paekivi mehaanilised baasomadused (Kübar, 2004).....	30
Tabel 7. Lubjakivi puuritavus (Kübar, 2004).....	30
Tabel 8. Dolokivi puuritavus (Kübar, 2004).	30
Tabel 9. Puuritavuse ja tugevusteguri vaheline seos (Kübar, 2004).	31
Tabel 10. Etalonlõhkeaine erikulu (Tomberg & Veersalu, 2017).	31
Tabel 11. Ohutu kaugus kildude laialipaiskumise järgi sõltuvalt plahvatuse toimearvust (n) ja vähima vastupanujoone pikkusest (W) (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2017).	34
Tabel 12. Minimaalsed ohutud kaugused kildude laialipaiskumise järgi (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2017).	35
Tabel 13. Parameetrid.....	44
Tabel 14. Algandmed.	53
Tabel 15. Parameetrid.....	55
Tabel 16. Kildude paiskekauguse sõltuvus lõhkeaugu sügavust.	56
Tabel 17. Maksimaalne paiskekaugus lõhkeaine erikulu 0,4 puhul.....	58
Tabel 18. Maksimaalne kivimikildude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,6.....	59
Tabel 19. Maksimaalne kivimikillu paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,8.	59
Tabel 20. Maksimaalne kivimikilude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,4.....	60
Tabel 21. Maksimaalne kivimikilude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,6.	61
Tabel 22. Maksimaalne kivimikilude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,8.	61

Kasutatud mõistete ja lühendite loetelu

Hajulaeng- mitmeks osaks jaotatud laeng, mille üksikute osade vahel on topis, õhk või vesi.

Häigusloogika - on loogika, mille puhul antakse tõeväärtusele tõenäosuslik hinnang.

KIE- Knowledge Integration Environment.

Laeng- lõhkeainekogus, mis on plahvatuseks ettevalmistatud.

Lõhkeaugu kaldenurk- kahe või enama pinnaga lõhates lõhkeaugu kalle vertikaaltasapinna suhtes.

Lõhkeauk- puuritud piklik õõs maapõues, kuhu paigutatakse laeng.

Lõhkeaine erikulu- lõhkeaine kogus kivimi mahuühiku kobestamiseks.

Lühiviitlõhkamine- lõhkamine kuni 100 ms ajavahemikega üksikute laengute plahvatuste vahel.

Ohuala- ala, mille piires on oht inimestele ja masinatele.

Tehisnärvivõrk- on bioloogiliste närvivõrkude mudelite kogum.

Topis- lõhkeaugu laenguruumi sulgemiseks kasutatav materjal. Topist kasutatakse plahvatuse suletud keskkonna saavutamiseks.

USBM uuring- United States Bureau of Mines uuring.

Viiteaeg- aeg üksikute laengute plahvatuste vahel.

Viitesamm- aeg, mis kulub kahe laengu vaheliseks plahvatuseks.

Viiteseeria- üheaegselt plahvatavate laengute arv või lõhkeainekogus.

Vähim vastupanujoon- vähim kaugus laengu keskpunktist lähima vaba pinnani, (m).

1. Sissejuhatus

Puur- ja lõhketööd on üks peamisi raimamisviise mäetööstuses. On olemas ka teisi kivimi väljamise viise nagu näiteks hüdrovasara või ripperiga väljamine, kuid lõhkamine on sellest odavam, vähem aeganõudev ja energaetiliselt kõige efektiivsem. Lõhketööd mõjutavad keskkonda vibratsiooni, õhulööklaine ja laialipaiskuvate kivimitega. Ohutuks ja efektiivseks lõhkamiseks tuleb lõhketööde parameetrite järgi määrata õigete mõõtmetega ohualad, mis tagaksid ohutuse, kuid samas ei takistaks lõhketööde läbiviimist.

Põgusalt tutvustasin oma lõputöös ka teisi lõhkamisega kaasnevaid ohufaktoreid, kuid peamiselt on mu töö fokuseeritud laialipaiskuvate kivimikildudega seotud ohutuse küsimustele. Statistiliselt juhtub kõige enam õnnetusi just laialipaiskuvate kivimikildude tagajärjel. Kildude paiskumissuunda on suhteliselt keerukas prognoosida, kuid maailmapraktikas on loodud mitmeid matemaatilisi mudeleid ja arvutusmeetodeid, mida kasutades on kivimikildude laialipaiskumise prognoosimine suurema või väiksema usaldusväärsusega võimalik. Lõhketöödel laialipaiskuvate kivimikildude paiskekaugus ulatub lõhketööde erinevate parameetrite puhul mõnest meetrist kuni kilomeetrini. Juba projekteerimise käigus peab endale selgeks tegema, kui suuri laenguid on mõistlik kasutada ja kui kaugel on inimestel ohutu viibida. Lõputöös on arutletud ka põhjuste üle, miks juhtub õnnetusi ja kuidas on võimalik neid ennetada.

Töös tutvustasin maailmapraktikas kasutusel olevaid matemaatilisi mudeleid, millega on võimalik arvutada kivimikildude teekonda. Analüüsisin videode põhjal laialipaiskuvate kivimikildude paiskumiskaugust ja koostas mõttelise skeemi, kuidas tegelikult kivimikillud paiskuvad. Lisaks praktilises osas arvutasin hägusloogika meetodil laialipaiskuvate kivimikildude paiskamiskaugust.

On erinevaid põhjuseid, miks valisin selle teema. Esiteks leian, et Eestis on sellest väga vähe räägitud. Teiseks määrused ja standardid, mille põhjal arvutatakse on Nõukogude Liidu ajast ja see ei kattu enam tänapäevaste oludega. Minu töös on oluline mitte niivõrd keskkonnamõjude kui ohutusriskide vähendamine, kusjuures nii, et puur- ja lõhketöid oleks võimalik teha.

2. Lõhketööde ohutegurid

Lõhketöödega kaasneb märgatav mõju nii keskkonnale kui ka inimestele. Kõiki keskkonnamõjusid ei ole võimalik lõhketöödega ennetada, kuid on erinevaid meetmeid nende leevendamiseks. Selleks on loodud riigipoolseid reguleeritavaid seadusi ja samuti on olemas riiklik järelevalve (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).

Lõhketööd on peamine meetod killustiku toorme tootmiseks, sest see on odav ja kiire. Selle meetodi kasutamisel tuleb arvestada keskkonnamõjudega, millest levinumad on müra, tolm, vibratsioon, laialipaiskuvad kivimikillud ja halvimal juhul võib selle tagajärjel toimuda ohualale liiga lähedal olevate objektide kahjustamine (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).

Lõhkamise puhul keskendutakse põhiliselt järgmistele keskkonda ja ohutust puudutavatele eesmärkidele:

- 1) inimeste kaitse- elu, tervise või füüsilise seisundi ohu eest;
- 2) isikute vara kaitse ohtude eest;
- 3) kaitse keskkonnareostuse eest;
- 4) veekogude kaitse (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).

Üleval väljatoodud prioriteetsed eesmärgid käsitlevad kõiki ohutusega seotud nõudeid.

- 1) inimeste elu ja tervis;
- 2) inimeste elutingimused;
- 3) keskkond (pinnas, taimed, loomad, õhk);
- 4) isikute ja naabruskonna vara;
- 5) õnnetuste vastu sealhulgas tööõnnetused;
- 6) haiguste vastu (kutsehaigused) (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).

Lõhkamisega kaasnevad keskkonnamõjud võivad häirida nii ettevõtteid kui ka naabruskonda. Halvemal juhul võib keegi isegi lõhketööde ettevõtte vastu kohtusse pöörduda (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).

Peab arvestama, et lõhketööde tagajärgede parandamine pole eventuaalne. Seetõttu tuleb juba projekteerimise käigus kaaluda kõiki asjaolusid ja arvestada tulenevate riskidega. Lõhketöödega kaasnevad peamiselt kolme tüüpi riskid (Seccatore, Origliasso ja Tomi, 2012):

- 1) Tervise-ja ohutusega seotud riskid- lõhketöödel peab olema tagatud ohutus, sest halvimal juhul võib see lõppeda kellegi surma või vigastamisega (Seccatore jt, 2012);

- 2) Majanduslikud riskid- lõhatud kivim on kas järgmise tootmislüli jaoks liiga väike või isegi liiga suur. Ülemõduliste kivide töötlemise puhul on sunnitud karjäär kulutama selleks lisaraha, mis pole loomulikult kasumlik. Kui on tegu liiga väikeseks lõhatud kivimiga võib juhtuda, et seda pole lihtsalt võimalik kasutada järgmises tootmislülis. See mõjutab kaevanduse tootlikkust, sest lisatöö tähendab seda, et kaevandus pole võimeline enam nii kiiresti tootma kui vaja (Seccatore jt, 2012). Majandusliku riskina võib välja tuua ka, et lõhkamise käigus paiskuvad kivimikillud liialt kaugemale või astangu ülaservale, siis selleks kulub ka täiendavaid ressursse.
- 3) Keskkonnariskid- igapäevane probleem, millega on sunnitud kaevandajad tegelema. Liiga kõrge vibratsiooni pärast võib tekkida läheduses asuvale hoonele mõrad ja praod. (Seccatore jt, 2012). Eestis reguleerib keskkonnariske Keskkonnaamet.

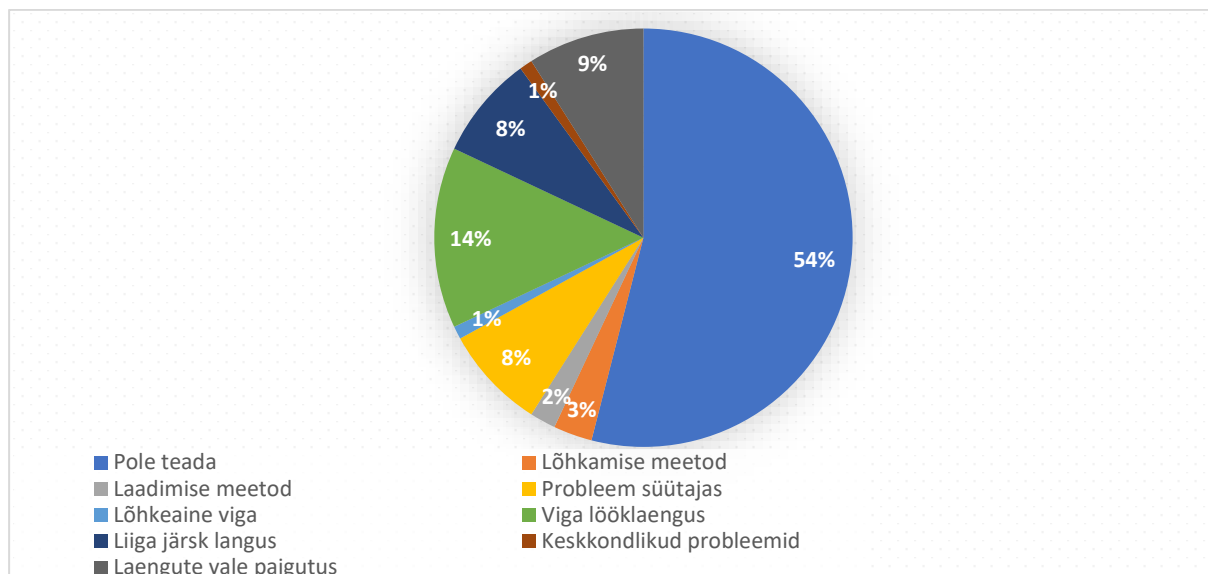
Lähemalt analüüsitakse antud lõputöös ohutusega seotud riske.

Tabel 1 sisaldab 2005-2009. aastate andmeid lõhketöodel juhtunud õnnetuste kohta. Selle põhjal võib väita, et kõige enam on õnnetusi juhtunud initsieerimisvigade tõttu, mis on jooksvalt 5. aasta jooksul tõusutrendis olnud. 2005. aastal põhjustasid 18 % kõikidest õnnetusest laialipaiskuvad kivimikillud, kuid aastate lõikes on see märkimisväärselt vähenenud. Õhulööklaine tõttu juhtunud õnnetuste protsent on äärmiselt väike. 2009.aastal juhtus palju õnnetusi plahvatusel vabanevate gaaside tõttu. Põhjus võis olla ebakvaliteetses lõhkeaines. Vähe on probleeme tekkinud vibratsiooni tõttu (Seccatore jt, 2012).

Tabel 1. Õnnetused lõhketöodel (tabel on tõlgitud Seccatore jt, 2012 järgi).

	2005		2006		2007		2008		2009		
Aasta	number	%	number	%	number	%	number	%	number	%	Keskmine
Initsieerimisvead	46	77	43	93	156	92	190	91	223	92	132
Laialipaiskuvad kivimikillud	11	18	2	4	11	7	13	6	1	0	8
Ebaõige lööklaine arvestamine	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gaasid	0	0	0	0	1	1	2	1	15	6	4
Ülerõhk/ Vibratsioon	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Kokku	60	100	46	100	169	100	208	100	242		

Lõhkamise kvaliteedivigadel on erinevad põhjused. Enamasti on põhjus teadmata, kuid levinumad on laengute vale paigutus, nende ebaõnnestunud laengu ehitus ja löökpadrundi vale paigutus lõhkeaugus. Joonis 1 kujutab peamisi kvaliteedivigade põhjuseid lõhketöodel:



Joonis 1. Ebaõnnestumise põhjused (joonis on tõlgitud Seccatore jt, 2012 järgi).

2.1. Mürgised plahvatusgaasid

Lõhkeainete plahvatusel vabanevad lõhkeaine plahvatusreaktsioonide käigus plahvatusgaasid. Enamus lõhkeaineid tekitab 1 kg plahvatusel 300-1000 liitrit gaase ja 300-1500 kcal (1,2...6,3 MJ/kg) soojusenergiat. Nende plahvatuskiirus kõigub piires 100-10000 m/s (Aruküla, Eigo, Joosep ja Reinsalu, 1980).

Hapnikubilanss näitab, kas lõhkeaine koostisesse kuuluvate põlevementide oksüdeerimiseks on piisavalt hapnikku. Hapnikubilanss on positiivne, kui lõhkeaines on liiga palju vaba hapnikku. Sel juhul eraldub lõhkamisel rohkem lämmastikoksiide ($NxOy$). Negatiivse hapnikubilanssi puhul on lõhkeaines liiga vähe hapniku, siis eraldub rohkem vingugaasi (Mixing ANFO and the Oxygen Balance, 2020).



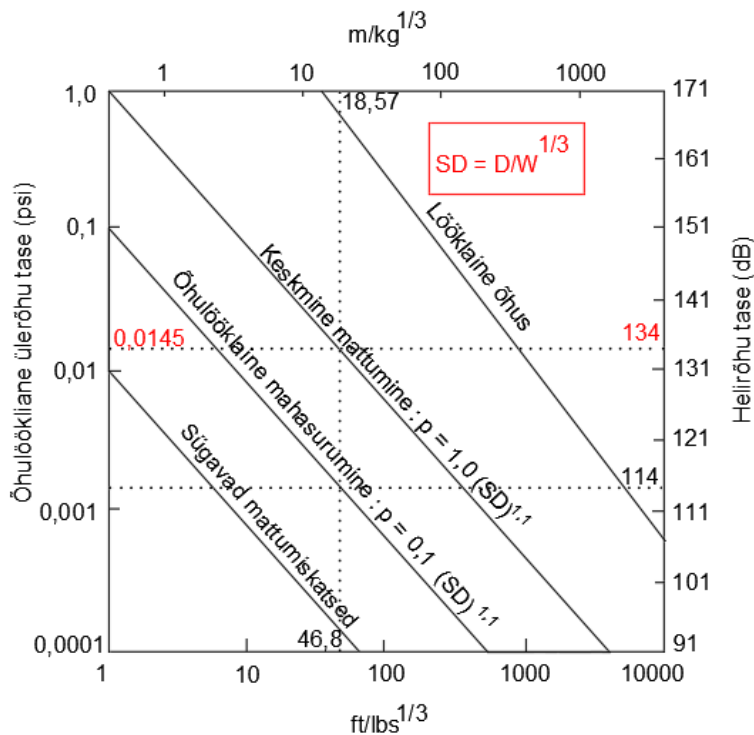
Joonis 2. Mürgised gaasid(Researchers using drones to detect noxious gas released by explosions, 2020).

Lõhkeaine detonatsiooni tagajärjel eralduvad gaasilised saadused sõltuvad lõhkeainest ja lõhkamistingimustest. Detonatsiooni tagajärjel eralduvad alati süsinikdioksiid, veeaur ja lämmastik. Lisaks sellele võib tekkida suurtes või väikestes kogustes CO, NO, NO₂, metaani (CH₄) ja vesinikku (H₂) (Santis, Rowland, Viscusi & Weslowski, 1995).

2.2 Müra

Müra on inimtegevusest põhjustatud ning välisõhus leviv soovimatu või kahjulik heli. Seda tekitavad paiksed või liikuvad allikad, sealhulgas transpordivahendid, maantee-, raudtee- ja lennuliiklus, välistingimustes kasutatavad seadmed. Lõhkamisega kaasneb lühiajaline impulssmüra (Keskkonnaamet, 2016).

Plahvatuse korral kandub edasi helirõhk, mis levib kaugusesse ja järk-järgult väheneb plahvatuskohast kaugenemisel (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999).



Joonis 3. Plahvatusel vabaneva heli levimine (joonis on tõlgitud Schillinger ja Laowattanabandit, 1999 järgi).

Lõhkamisega kaasnev müra on madalsageduslik heli, millest suurem osa kuuldavast helienergiast jääb alla 50 Hz. Sel põhjusel levib heli igas suunas võrdset. Topograafiliste iseärasuste (mäed, bermid jne) tõttu helilained murduvad. Väga tihti murduvad helilained takistuste ümber nagu seal poleks olnudki takistust (Canadian Environmental Assessment Agency, 2018).

Helilained sõltuvad vabanevate gaaside impulsist (Schillinger ja Laowattanabandit, 1999). Kui pilved on madalal, siis see aitab helilainetel levida kaugemale, mille tulemuseks on märgatavam õhulõõklaine (Canadian Environmental Assessment Agency, 2018).

Lõhkamisel tekkiva müra leevendamiseks luuakse ohuala, kus ei tohi inimesed viibida, sest müra on kahjulik nende kuulmisele (Canadian Environmental Assessment Agency, 2018).

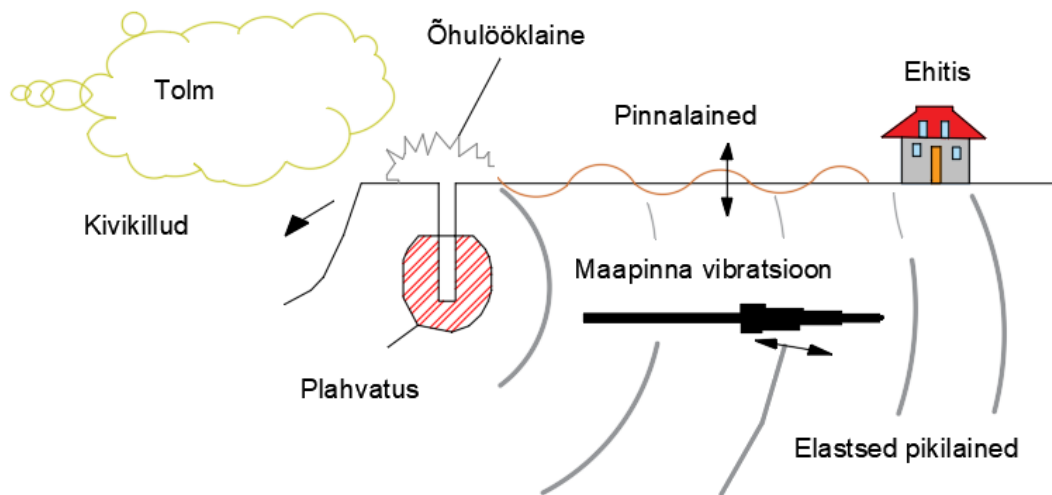
2.3. Seismiline efekt

Lõhkamisega kaasnevatest ohuteguritest üks on sellega kaasnev seismiline mõju. Maapinna vibratsiooni mõju intensiivsust ehitistele mõõdetakse kiiruseühikutes, milleks on mm/s. Tavalistes tingimustes lõhkamise vibratsiooni intensiivsus väheneb vahemaa vähenemise kiirusega, mis on umbes kolmandik varasemast väärtusest, kui vahemaa on vibratsiooniallikast kahekordistunud (Canadian Environmental Assessment Agency, 2018).

Füüsikaliselt elastsete deformatsioonide edasikandumist maapinnas tekitavad seismilised lained. Seismilise lainete energia väheneb kaugenedes võnkeallikast, sest toimub lainete sumbumine. Kõrgsageduslikud lained sumbuvad kõige kiiremini. Seetõttu domineerivad kõrgsageduslikud lained väiksemate kauguste puhul ja madalsageduslikud suuremate kauguste puhul (Olofsson, 2002).

Lõhkamisega tekkivad maapõues seismilised lained, sest selle eesmärk on kivimimassiivi kobestamine. Kivimeid purustavad pingelained, mis tekitavad pragusid ja lõhesid, sumbuvad kivimimassiivis levides seismilisteks laineteks, mis kutsuvad esile kivimimassiivi mitte purustavaid deformatsioone (Encyclopaedia Britannica, 2017).

Laialipaiskuvad kivimid



Joonis 4. Lainete levimine (koostatud Rosenthal ja Morlock, 1987 järgi).

Lõhketööl tekivad seismilised lained võivad negatiivselt mõjuda erinevatele objektidele (hooned, ehitised ja seadmed) kui ka mõjuda häirivalt elusolenditele (loomad ja inimesed) (Rosenthal ja Morlock, 1987).

Lõhketööde seismilisse mõjupiirkonda jäävate objektideni jõuavad otse levinud, peegeldunud ja murdunud lained. Seega on tegemist liitvõnkumisega, mille moodustavad liitunud pinna- ja ruumilained (Dowding, 1985).

Tabel 2. Mõju hindamine (Vuolio, 1990).

	Kivim			Eeldatav mõju
	Veega küllastunud liiv, kruus või savi	Moreen, kildad, pehme lubjakivi	Graniit, gneiss, lubjakivi, dolomiit	
Seismiliste lainete levikukiirus (m/s)	1000-1500	2000-3000	4500-6000	
Võnkekiirus (mm/s)	18	35	70	Vigatuste täielik puudumine
	30	55	110	Vähesed, väikese ulatusega praod, krohvi pudenemine
	40	80	160	Pragude moodustamine
	60	115	230	Intensiivne pragude moodustamine

2.4. Õhulööklaine

Õhulööklaine on plahvatuse tulemusel tekkinud läbi õhu liikuv rõhulaine. Plahvatuse tagajärjel tekkinud ülerõhk võib panna liiga lähedal olevate ehitiste aknaklaasid värisema. Rõhu intensiivsus sõltub laengu suuruselt, topise pikkusest ja tihedusest lõhkeaugus (Olofsson, 2002).

Õhulööklaine sagedus jääb vahemikku 0,1 Hz kuni 200 Hz. Õhulööklaine, mille sagedus on üle 20 Hz, on kuuldav mürana. Vastupidisel juhul pole seda kuulda, sest selle sagedus sumbub aeglasemalt ja põhjustab ülerõhku suuremal distantsil. Madalamad sagedused võivad põhjustada ehitistele suuremat kahju, aga enamasti kõrgemad sagedused põhjustavad vibratsioone akendes ja ustes. Nendel tingimustel on raske öelda, kas tegelikult põhjuseks on seismiline efekt või õhulööklaine, ilma vastavaid mõõdistusi tegemata (Olofsson, 2002).

2.5. Laialipaiskuvad kivimikillud

Laialipaiskuvad kivimikillud on lõhketööl üks peamisi ohutegureid. Kivimikildude laialipaiskumine on tihti soodustatud lõhketööde ebakvaliteetsest projekteerimisest ja läbiviimisest,

harvem kivimimassiivi omaduste muutlikkusest. Kivimikildude tabamused põhjustavad inimeste vigastusi ning seadmete ja rajatiste kahjustusi (Rosenthal jt, 1987).

Laialipaiskuvad kivimikillud paiskuvad vabaneva plahvatusenergia mõjul plahvatuskohast eemale. Kivimikillud muutuvad probleemiks siis, kui need paiskuvad laiali erisuundades ja kaugemale projektis määratletud ohualast. Laialipaiskuvate kivimikildude trajektoori, suuruse ja kiiruse ette nägemine on komplitseeritud ning see võib suurt ohtu seada seal töötavatele inimestele. Laialipaiskuvate kivimikilude ohtlikkuse mõistmiseks on relevantne teadvustada nende tekkepõhjuseid (How to Prevent & Control Flyrock, 2021).



Joonis 5. Laialipaiskuvad kivimikillud (Marist,2020).

2.5.1. Laialipaiskuvad killud kui ohullikas

Laialipaiskuvad kivimikillud on lõhketööde üks peamisi ohutegureid. Lõhkamisel laialipaiskuvad kivimikillud võivad põhjustada erineva raskusastmega või surmavaid vigastusi karjääris töötavatele inimestele. Aastatel 1978-2002 oli üle kahe kolmandiku kõigist lõhkamisega seotud õnnetustest tingitud ohuala määramise vigadest (aladimensioneerimisest) (Bajpayee, Verakis, & Lobb, 2004).

Põhjused, miks juhtub õnnetusi laialipaiskuvate kivimitega on järgmised:

- 1) vale lõhkeaine;
- 2) topise ebapiisav pikkus või tihedus;
- 3) lõhkeaukude ülelaadimine;

- 4) puurimise ebatäpsus;
- 5) vead lõhkevõrgu projekteerimisel või montaažil;
- 6) viidete vale paigutus;
- 7) järsud muutused massiivi ehituses ja häirituses;
- 8) lõhkeaukude paigutuse ja läbimõõdu ekslik valik.

Antud töö käigus küsisin teavet Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Ameti (TTJA) spetsialistidelt lõhketöödega juhtunud õnnetustest. Ametlikel andmetel on viimase 5 aasta jooksul juhtunud 5 lõhketöödega seotud õnnetust, kuid otseselt laialipaiskuvate kivikildude tõttu pole juhtunud ühtegi (vt tabel 3).

Tabel 3. Lõhketöödega seotud õnnetused Eestis (TTJA andmed).

1	Töötaja töötas puurmasina Face Master 1,7 R (edaspidi puurmasin) operaatorina. Tööde teostamise ajal sattus kannatanu töötava puurmasina puurvarda ohualasse ja takerdus sinna tööriietega. Puurvarras keris kannatanu sooja tööjope ümber enda.
2	Kaevanduses toimusid lõhketööd. Töötaja ei märganud, et eelmisest lõhkemisest jäi lakke rikkuma põlevkivi ripik. Uue lõhkeaugu laadimisel ripik kihistus ja kukkus alla kannatanule peale.
3	Lõhkemeister lõpetas lõhatava lõhkeainega laadimise ja suundus ca 2.7 m kaugusel asuva auto juurde. Kui töötaja oli auto juures toimus kaeveõõne seinavaring, mille tagajärjel sai täätaja mäemassi tükkidega löögi selja ja jalgade piirkonda.
4	Töötaja paigaldas redelil lõhkeainet. Ülemise lõhkeaugu laadimisel redelit kukkusid talle peale 3 mäemassi tükkis, mis viisid tasakaalust välja ja selle tõttu kukkus redelit alla.
5	Tööõnnetuse koht- maaalune kaeveõõs, kamberplokk Töötaja tööülesandeks oli lõhkamistöde läbiviimine. Lõhkamise teostamise tagajärjel lendas väike kivimi tükk kannatanuni ja traumeeris teda näo piirkonnas.

TTJA Tehnikaosakonna peaspetsialist Lauri Kütt nentis, et nendeni kahjuks ei jõua teave kõigi toimunud õnnetuste, eriti „near-miss“ juhtumite kohta, mille korral killud paiskusid inimeste

vigastusi põhjustamata kas masinate või ehitisteni. Sain sealt ka soovitusel lisaks uurida lõhketöid teostavatelt firmadelt infot selle kohta.

2.5.2. Laialipaiskuvate kildude tekkemehhanismid

Põhjused, miks laialipaiskuvad kivimikillud tekkivad on järgmised:

- 1) Ootamatud muutused kivimimassiivis - geoloogilised rikked, praod, nõrgad kihid, kavernid, karstialad jmt;
- 2) Laengu vale ehitus - liialt suure läbimõõduga lõhkeaukude kasutamine madalate astangute lõhkemisel, kus liiga suure laengu tõttu võib toimuda eekivimite ebaühtlane purunemine;
- 3) Vale lõhkeaukude laadimine ja lõhkamine - ülepuure puudulikkus, vale lõhketööde parameetrite (vähima vastupanujoon, ridadevaheline kaugus, laengusamm, lõhkeaukude ristkülikuline või malekorras paigutus jmt) määramine (Arunachalam, n.d).

Kivimikildude laialipaiskumise kontrolli võimalused:

- 1) Laengute paigutuse ja ehituse kaudu:
 - vältida ülelaadimist;
 - valida/arvutada õige vähima vastupanujoone pikkus.

Relevantne on lõhkeauke mitte üle laadida, sest see põhjustab kivimikildude laialipaiskumist. Esimese rea lõhkeaugud on vaja puurida astangu jalamile piisvalt lähedale, et ei tekiks lõhatud astangu põhja ebatasasusi (Arunachalam, n.d).

- 2) Topistamisega:
 - jälgida topise pikkust;
 - kasutada efektiivset topise materjali.

Topistamise puhul peab jälgima topise pikkust ja tihendamist, sest materjal ei tohi august välja paiskuda. Efektiivne on kasutada topistamiseks sõelmeid. Karjäärides on levinud puurpuru kasutamine topistamiseks, kuid selle kasutamine ei ole alati kuigi tõhus (Arunachalam, n.d).

- 3) viiteseeriaste paigutus ja viitekestuste valik:
 - laengute malekorras paigutus, reeglina tagab see meede ka kivimi ühtlasema purustamise.
 - pikemad viitesammud;

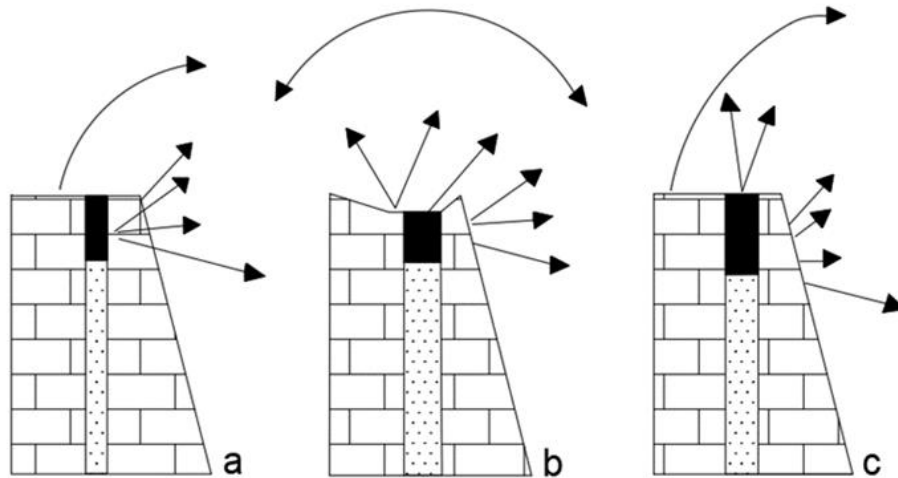
- lõhkevõrgu projekteerimise ja montaaži täpne kontroll.

Ettepoole paiskuvaid kivimikilde saab leevendada paigutades laenguid malekorras, sellega tagatakse ühtlasem purustamine. Kivimikildude teket aitab minimeerida maksimaalne ridade vaheline viivitusintervall. Rusikareeglina võiks kasutada ridadevahelise viitekestusena vähemalt 4-8 ms/ m sõltuvalt konkreetse lõhketöö soovitud eesmärgist. Enne lõhkevõrgu monteerimist tuleb kontrollida, kas kõik read ja augud on tõrgete vältimiseks lõhkevõrku ühendatud (Arunachalam, n.d). Eesti tingimustes paekivi kaevandamise praktikas on ühes viiteseerias üle 1-2, harva 3 või enam laengut.



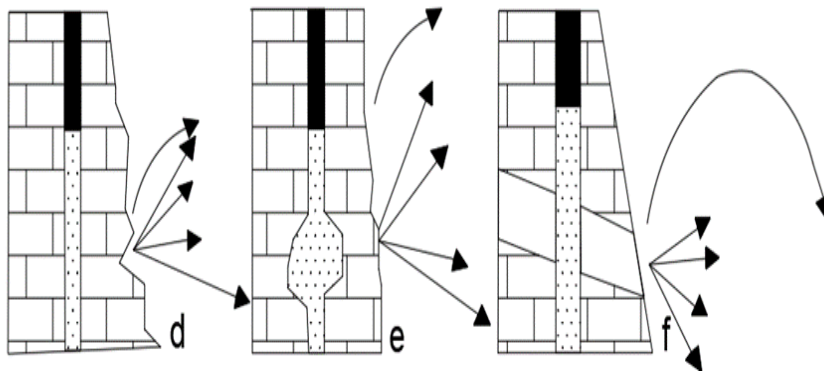
Joonis 6. Lõhkeaukude puurimine Sillamäel 11.06.2018. Autor: Siim Eensoo.

Järgnevatel skeemidel on esitatud kivimikildude paiskumise suunad koos tõenäosimate põhjustega.



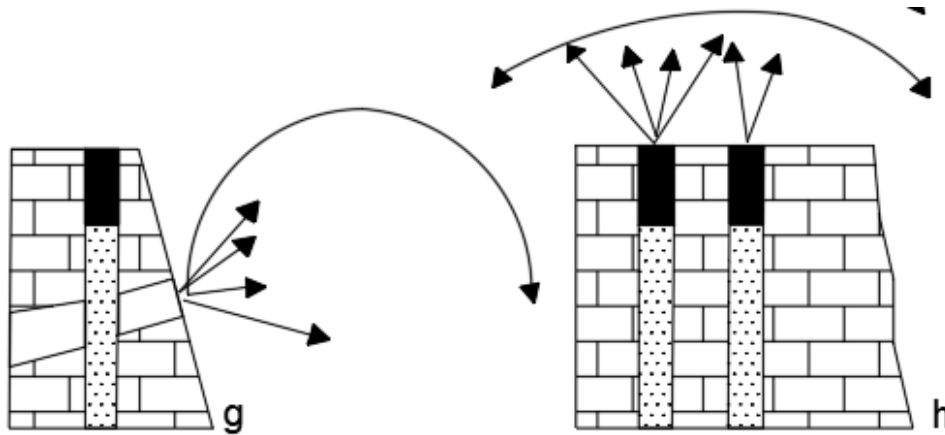
Joonis 7. Skeemid kildude paiskumise suunast (1) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.

Joonis 7a puhul on laialipaiskumise põhjuseks, et topise pikkus lõhkeaugus on liialt lühike. Joonis 7b puhul on kasutatud suure läbimõõduga lõhkeauke ja astangu ülaosa on lõheline ja ebatasane, mis soodustab kivimikildude paiskumist. Joonis 7c puhul on lõhkeauk ülelaetud (Raina, Murthy & Soni, 2014).



Joonis 8. Skeemid kildude paiskumise suunast (2) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.

Joonis 8d puhul on nõlvaga esi korrapäratu kujuga. Joonis 8e puhul pole arvestatud õõnsusega massiivis, mistõttu lõhkeauk on ülelaetud. Joonis 8f puhul on massiivis nõrk kiht, millega pole arvestatud. Kiht on langussuunaga massiivi poole (Raina jt, 2014).



Joonis 9. Skeemid kivimikildude paiskumise suunast (3) koostatud (Raina jt, 2014) järgi.

Joonis 9g puhul on massiivis nõrk kiht tõususuunaga vabapinna poole ehk suunas, kuhu poole lõhatakse. Joonis 9h puhul on valitud liiga pikk vähim vastupanu joon, mistõttu ei pruugi täiendav vaba pind järgmistele laengutele moodustuda (Raina jt, 2014).

Tugevalt lõhestunud kivimid hõlbustavad laialipaiskuvate kivimite teket kui massiivsed ja homogeenised kivid. Aga aina enam läheb vaja killustikku ning tuleb lõhata kohtades, kus pole nii ideaalsed tingimused. Karstialal, kus on suurel hulgal tühimikke, tuleb täpselt määrata lõhede ja võimalike karstiõõnsuste asukohad (Lopez & Lopez, 1995).



Joonis 10. Geoloogilise häirituse mõju lõhketööle (Einasto, 2013).

2.6 Lõhkamiskeskond

2.6.1. Eesti geoloogiline ehitus

Eesti kuulub geoloogiliselt Ida-Euroopa platvormi loodeossa, mis asub struktuurselt Fennoskandia kilbi lõunanõlva piirides (Raukas & Teedumäe, 1997).

Eesti on üldiselt tasane riik, sest see on osa Ida-Euroopa tasandikust, kus kõrgustikud ja platoolaadsed vahelduvad lohku, madalikute ja orgudega. Keskmise kõrgus merepinnas on umbes 50 m. Ligikaudu 40 % Eesti territooriumist asub absoluutkõrgusel 50-100 m ja ainult kümnendikul on kõrgus merepinnast üle 100 m. Eesti kõrgeim punkt on Haanja kõrgustikus asuv Suur Munamägi (318 m) (Raukas & Teedumäe, 1997).

Suurimad reljeefivormid on platood, kõrgustikud, madalikud, lohud, Põhja- ja Lääne Eesti astangud, mis tekkisid eel kvaternaariajal pikaajalise mandrierosiooni tagajärjel. (Tavast & Raukas, 1982). Aluspõhja kihtide monoklinaalsed kihid ja nende erinev vastupidavus erosioonile andsid tulemuseks kvaternaarse iidse topograafia (Orviku, 1955). Kõigi jääaegade ajal valitses Põhja- ja Lääne Eestis jääaja erosioon. Neid alasid iseloomustab õhuke ja kvaternaarne kate ja alvarite laialdane levik Eesti üldiselt tasase topograafiaga taustal. Siinseid erosioonilisi reljeefivorme esindavad nii väikesed liustikukriimustused kui ka suured lohud (Tavast & Raukas, 1982).

Eestis leidub karsti. Karst on nähtus, mille puhul tuleneb kivimite lahutamine pinna või põhjavee toimel. Kõige levinum on karst karbonaatsetes kivimites. Kastumise tulemusel tekivad kivimitesse mitmesuguste mõõtmetega õõnsused ehk karstivormid (Mander & Liiber, 2014).

Eesti karstialade levik langeb kokku ordoviitsiumi ja siluri karbonaatsete kivimite levikuga. Nende paksus on Põhja- Eestis vaid mõnikümmend meetrit, suurenedes lõuna poole kuni 250 m-ni. Karstumisele alluva kihi sügavus on vaid 5-10 m. Karst 30-50 m sügavusel on juba väga nõrgalt levinud. Karstialade levik on Eestis väga ebaühtlane, kuid soodsamad tingimused karsti tekkeks on olnud Põhja- ja Lääne Eestis (Mander & Liiber, 2014).

Kasutasin oma töös nii lubja- kui dolokivi kohta ühist nimetust „paas“, sest lõhketöödel pae väljamisel on selle mineraloogiline koostis marginaalse tähtsusega. Oluline on massiiv, selle ehitus ja häiritus (Mander & Liiber, 2014).



Joonis 11. Kuimetsa karstiaala (Autor: Heidi Tooming).

2.6.2. Paekarjäärid Eestis

Eestis on paekivi seotud Ordoviitsiumi ja Siluri ajastuga. On teada, et Eestis olev paekivi kuulub vanimate hulka kogu maailmas. Eesti paekivilademed ulatuvad kogupaksusega mõnekümnest meetrist Põhja-Eesti pankrannikul 400 meetrini Lõuna-Eestis. Paekivi avaneb umbkaudselt poolel Eesti territooriumil. Rändkividena ja pärast jääaegsete setete koosseisus võib paekivi leida ka Lõuna-Eestist. Kõik lademed asuvad Eestis lõuna suunas kaldu (2-4,4 meetrit kilomeetri kohta) (Levik. n.d).



Joonis 12. Aktiivsed lubja-ja dolokivikarjäärid 2012.a (Nabala, 2021).

Tabel 4. Paekivi tugevustegur ja lademed (Kübar, 2004).

Leiukoht	Lademed	Tugevustegur		
		min	max	keskmine
Pölevkivikarjäärid Kirde-Eestis	Kukuruse, Idavere	2	14	7
Maardu	Volhovi, Kunda, Aseri, Lasnamäe	4,7	15	8
Väo	Volhovi, Kunda, Aseri, Lasnamäe, Uhaku	3	19	9
Harku	Lasnamäe, Uhaku	2,8	19,5	9
Kunda-Aru	Aseri, Lasnamäe	4	19,5	10
Rakke	Rakvere	1,9	10	6
Karinu	Rakvere	1,9	11,4	7

Tabelis 4 on väljatoodud leiukohad ja lademed, kus kaevandatakse ja lõhatakse paekivi. Tabel 4 sisaldab lisaks leiukohtadele ja lademetele ka vastavat tugevustegurit. Tugevustegur iseloomustab kivimi purustatavust (Levik. n.d).

Tabel 5. Lõhatavad lademed (Kübar, 2004).

Lade	Leiukoht	Tugevustegur		Kivim
		min	max	
Volhov		4,7	13,5	lubjakivi
Kunda	Väo, Maardu	7,7	14,3	
Aseri	Väo, Aseri, Narva, Kunda	4,2	14,3	
Lasnamäe	Väo, Maardu, Harku, Kunda	4	19,5	
Uhaku	Väo, Kunda	2,8	14	
Kukruse	Põlevkivimaardla	1	5	
Idavere	Põlevkivimaardla	1,8	3,5	
Jõhvi	Aluvere	6,8	13,6	
Keila	Keila	6	8	
Oandu	Vasalemma	4,6	11	
Rakvere		8		
Nabala		8		
Vormsi		7		
Pirgu				
Porkuni	Seli	7	12	
Juuru				dolomiit
Raikküla	Tamsalu, Rakke, Adavere	8	21	
Adavere	Adavere	11		
Jaani				
Jaagarahu	Anelema, Ungru	20		
Rootsiküla	Kaarma	10		

2.6.3. Mäendustingimuste ja sellest sõltuvalt lõhketööde tehnoloogia suur varieeruvus erinevates karjäärides

Mäendustingimustest sõltub lõhketööde tehnoloogia valik. Puurimise seisukohast olulised mäendustingimused on järgmised (Kübar, 2004):

- 1) Teralisus;
- 2) Tugevus;
- 3) Sitkus;
- 4) Abrasiivsus.

Lõhkamise puhul (Kübar, 2004):

- 1) Lasumi paksus ja ehitus – määrab suuresti lõhatava astangu kõrguse;
- 2) Kihilisus – oluline puurimisel;
- 3) Lõhelisus – oluline lõhkeaukude ja viiteseeriade paigutamisel;
- 4) Kivimite tugevus – lõhkeaine erikulu määramisel
- 5) Tihedus – lõhkeaine erikulu määramisel;
- 6) Poorsus – lõhkeaine erikulu määramisel;
- 7) Tugevus – oluline puurimisel;
- 8) Kobestatus – lõhkeaine erikulu määramisel;
- 9) Veega küllastatus – lõhkeaine erikulu määramisel.

Nende andmete põhjal valitakse sobiv lõhketööde tehnoloogia. Kihilist kivimit tuleb puurida risti kihistuspindadega, vältimaks kõrvalekaldeid ja suurendada lõhketööde efektiivsust (Kübar, 2004).

Kivimi lõhelisus on lõhketööde üks relevantne kvaliteeti näitav tegur, eriti soovitava tükisuuruse saavutamiseks (Kübar, 2004).

Tabel 6. Paekivi mehaanilised baasomadused (Kübar, 2004).

Tihedus (kg/dm ³)	1,5...2,7
Kobestustegur	1,2...1,5
Varikaldenurk (kraadi)	60...90
Poorsustegur (%)	0,5...1,2

Lõhkamisel on oluline puuritavus ja lõhkeaine erikulu.

Tabel 7. Lubjakivi puuritavus (Kübar, 2004).

Lubjakivi puuritavus	min/m
pehme, poorne, murenev	3,9-5
pehme, mergline	5-6,6
mergline, kompaktne	6,5-9
Kõva	9-12
kompaktne, tihe	12-16

Puuritavuse määramiseks on mõõdetakse ainult puurimisele kuluvat aega, arvestamata abioperatsioone nagu sissepuurimine ja puuripea vahetamine (Kübar, 2004).

Tabel 8. Dolokivi puuritavus (Kübar, 2004).

Dolokivi puuritavus	min/m
pehme, poorne, murenev	5-6,5
Kompaktne	6,5-9
Kõva	9-12

Kivimi puuritavust hinnatakse tavaliselt tema puurimiskiiruse (m/s) ja lõhatavust lõhkeaine erikulu (kg/m³) kaudu.

Puuritavus ja tugevustegur on omavahel seotud.

Tabel 9. Puuritavuse ja tugevusteguri vaheline seos (Kübar, 2004).

Puuritavus min/m	tugevustegur	Tugevuskategooria
alla 1	kuni 0,8	VIII
1...2	0,8...1	VIIa
3...4	1...1,5	VII
4...5	1,5...2	VI
5...7	3...4	V
7...9	5...8	IV
9...12	8...10	IIIa
12...17	10...15	III
17...22	15...20	II
üle 22	üle 20	I

Kivimi lõhatavust iseloomustab selle lõhkamiseks vajalik lõhkeaine erikulu. Erikulu määramiseks tuleb valida kindel etalonlõhkeaine ja lõhkamise eesmärk ning meetod. Lõhkeaine erikulu on massiivi moodustava kivimi ühe ruumalaühiku purustamiseks vajalik lõhkeainekogus. See sõltub lõhatava kivimi omadustest, lõhkamisviisist ja lõhketööde eesmärgist. Seda määratakse empiiriliste valemitte ja pikaajalise praktika alusel. Tabelis on teatud piirid, mis on määratakse esmaprojekterimisel suuresti projekteeija eksperthinnangu alusel esialgne lõhkeaine erikulu. Peale katselõhkamist täpsustakse lõhkeaine erikulu üle. Varieeruvate mäenduslike tingimuste puhul on vaja teha mitu katselõhkamist. Selle alusel koostatakse tüüpprojekt, kus on esitatud hulk karjääris ette tulevaid variante (Tomberg & Veersalu, 2017).

Tabel 10. Etalonlõhkeaine erikulu (Tomberg & Veersalu, 2017).

Kivimi nimetus	Etalonlõhkeaine erikulu (kg/m ³)		
	Väljapaiskelaeng	Kobestuslaeng	Välislaeng
Ülinõrk lubjakivi	1,5...1,75	0,5...0,6	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

3. Metoodika

Vastavalt majandus- ja taristuministri 08. 09.nr 49 määruse „Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded“le sätestatule peab lõhketöö projekt vastavalt nimetatud määruse §.1 p 7) sisaldama ohuala suurust kildude laialipaiskumise järgi.

Lõhketöödel on oluline järgida ohutusnõuded ja kaitsemeetmeid. Relevantne on vältida ohualas ja selle ligiduses olevate objektide kahjustamist. Vajalik on järgida, et inimesed ei satuks ohualasse, sest see pole ohutu.

Analüüsisin erinevaid prognoosimeetodeid ja valisin Eesti tingimustes ratsionaalselt kasutatava meetodi. Otsustasin prognoosimeetodiks valida hägusloogikal põhineva metoodika, mis arvestab piisavalt paljusid lõhketööde parameetreid. Minu valitud meetod küll toimib, aga täpsustamiseks oleks vaja kindlasti viia läbi suuremahuline uuring, mis oleks vastavuses Eesti tingimustega.

3.1. Kasutuselolevad tehnilised meetmed ohuala mõõtmete vähendamiseks

Laialipaiskuvate kivimikildude paiskekauguse miniseerimiseks on otsustava tähtsusega kasutada laengu õiget ehitust. Sealjuures tuleb arvestada konkreetse karjääri geoloogiliste iseärasustega. See peaks parandama kivimi purunemist ja minimeerima kivimikildude laialipaiskumist, sealhulgas ka maapinna vibratsiooni ja õhulööklainet. Enne lõhkamist peab olema kindel, et millist lõhkeainet, lõhkeaugu diameetrit kui ka laengusammu ja ridade vahelist kaugust peab kasutama arvestades mäenduslike tingimusi (Bajpayee jt, 2004).

Topistamine on oluline meede laialipaiskuvate kivimikildude paiskumise minimeerimiseks. Topis on materjal lõhkeaugu täiteks, et vältida gaaside välja voolu ja kivimikildude paiskumist lõhkeaugust. Valesti valitud topise pikkus võib soodustada kivimikildude paiskumist ja halvendada killu kvaliteeti (Concretebroker, 2019).

Kildude laialipaiskamise täielikuks ärahoidmiseks tuleb lõhatav objekt katta kaitsemattidega. Kaitsematid on tehtud vanadest autorehvidest, traatvõrgust, kapronkalavõrgust või hagudest (Majandusministeerium, 2001).

Lõhketööde kaitsematid on kasutusel lõhkeainete lõhkamisel karjäärides, ehitusplatsidel või asulas. Matid on asetatud lõhkamiskohale nii, et lõhkamisel summutab see müra, takistab tolmu üleslöömist ja kivide lendamist suvalises suunas. Matte võib kasutada üksikult kui ka kihtidena, sõltuvalt lööklaengu suurusest, mati tüübist ja vajaliku kaitse suurusest. Neid võib kasutada horisontaalselt maapinnal või vertikaalselt kraanade küljes või konstruktsiooni külge kinnitatuna (Incidents like Cape Ray blasting mishap deemed rare, 2015).

Kaitsematte kasutatakse lõhketöödel kivimikildude laialipaiskumise välistamiseks ja õhulööklaine mõju vähendamiseks. Massilt on matid küllaltki suured 1400-2700 kg. Neid on tülikas paigaldada ja eemaldada just nende suure massi tõttu, sest vajalik on kasutada täiendavaid masinaid (Hill, 2013).

Enne iga lõhkamist tuleb kaitsematte põhjalikult kontrollida, et need, sh trossid, oleks terved. Kaitsematid on küll korduvkasutatavad, kuid need peavad vastu vaid piiratud arvu lõhkamisi. Kaitsematte tohivad paigaldada ainult väljaõppinud ja kogenud meeskonnad. Kõige levinumad probleemid mattidega on trosside juhuslik purunemine või mitteelektrilise initsieerimissüsteemi detonatsioonitorude vigastamine, mis võivad põhjustada tõrkeid (CBC News, 2015).



Joonis 13. Kerge kaitsematt (CBC News, 2015).

3.2. Kehtivad ohutusnõuded ja nende mittevastavus reaalsele olukorrale

Ohualade mõõtmed määratakse järgnevate riskitegurite järgi: õhulööklaine ja seismika. Antud töös kontsentreerusin vaid ohuala mõõtmete määramisele ja kivimikildude-ja tükkide laialipaiskumise järgi. Ohutu kaugus tuleb määrata lõhketööde projektis või passis (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2017).

Tabel 11. Ohutu kaugus kildude laialipaiskumise järgi sõltuvalt plahvatuse toimearvust (n) ja vähima vastupanujoone pikkusest (W) (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2017).

W,m	Ohuala raadius erineva plahvatustoimearvu (n) juures							
	Inimeste jaoks				Masinate ja seadmete jaoks			
	1,0	1,5	2,0	2,5-3,0	1,0	1,5	2,0	2,5-3,0
1,5	200	300	350	400	100	150	250	300
2,0	200	400	500	600	100	200	350	400
4,0	300	500	700	800	150	250	500	550
6,0	300	600	800	1000	150	300	550	650
8,0	400	600	800	1000	200	300	600	700
10,0	500	700	900	1000	250	400	600	700
12,0	500	700	900	1200	250	400	700	800
15,0	600	800	1000	1200	300	400	700	800
20,0	700	800	1200	1500	350	400	800	1000
25,0	800	1000	1500	1800	400	500	1000	1000
30,0	800	1000	1700	2000	400	500	1000	1200

Tabel 12. Minimaalsed ohutud kaugused kildude laialipaiskumise järgi (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2017).

Lõhketöö liigid ja meetodid	Ohuala minimaalne raadius, m
Pinnase ja kaljuse kivimi lõhkamine pealmaatööl välislaengumeetodil	300
Pinnase ja kaljuse kivimi lõhkamine pealmaatööl lõhkeaugumeetodil	200
Pinnase ja kaljuse kivimi lõhkamine pealmaatööl katlalaengumeetodil	200
Ülemõõdulise kivimitüki purustamine allapandud laenguga	400
Kännu juurimine	200
Kaitsevööndi tegemine pinnases metsatulekahjus lokaliseerimisel	50
Põhjasüvendustöö jääkatteta veekogus mittekaljuses pinnases	100
Põhjasüvendustöö jääkatteta veekogus kaljuse pinnase lõhkamine lõhkeaugumeetodil	50
Põhjasüvendustöö jääkatteta veekogus kaljuse pinnase lõhkamine kuni 100 kg välislaenguga	200
Põhjasüvendustöö jääkatte esinemisel	200
Jääkatte lõhkamisel	100
Rüsi jää lõhkamisel	200
Metallkonstruktsiooni purustamine lagedal polügoonil	1500

Ebasoodsate meteoroloogiliste tingimuste, nagu tugeva tuule, madala ja tiheda pilvituse, õhu temperatuuri järsu languse ja inversioonikihi esinemise korral võib õhulööklaine mõju märgatavalt tugevneda. Lõhketööde tegemine tuleb sellisel juhul peatada või ohutuid kaugusi suurendada (kahekordistada) (Majandus- ja kommunikatsiooniminister, 2005).

Antud määruse ohuala tabelid on ebatäiuslikud, sest tabel 11 on väljatöötatud välja- ja kõrvalepaiskelaengute järgi ning just seda tabelit on otstarbekas kasutada kas karjäärid või kraavi algmurde lõhkamisel ehk seal, kus lõhatakse ühe vaba pinnaga. Sel juhul tõesti paiskuvad kivimikillud suurima tõenäosusega kõigis suundades enam-vähem võrdselt laiali.

Kahe vaba pinnaga lõhkamisel paiskub vähemalt 80 % kivimist vaba pinna suunas ning mitte üle 20 % kõigus teistes suundades kokku. Seda väidab ka 2020. a avaldatud Tõnu Tombergi ekspertarvamus lõhketööde ohuala määramisest purustatud materjali tükide/kildude laialipaiskumise järgi. Tuginedes Ivar Maristi poolt avaldatud videodele võib visuaalse vaatluse kohaselt järeldada eksperthinnangus esitatut.

Tabel 12 ei arvesta puur-ja lõhketööde parameetritega. Need meetmed võivad olla küll vaba pinna suunas kasutatavad, kuid mitte vastassuunas. Seega on see meetod üsna meelevaldne ja liigub ilma igasuguse põhjusteta eeskirjast eeskirja.

3.3. Ohuala määramise alternatiivsed meetodid

Alternatiivina on uuritud selliseid laialipaiskuvate kivimikildude paiskekauguse prognoosimeetodeid, mis arvestavad reaalseid lõhketöid ja põhinevad lõhatava kivimimassiivi omadustel (Selle ehitust, häiritust, põhjavee taset jmt) ning lõhketööde parameetreid (astangu kõrgust, lõhkeaugu läbimõõtu, laengute paigutust, lõhkeaine erikulu, viidete/viiteseeriade paigutust). Minu poolt analüüsitud meetodid on välja töötatud suhteliselt homogeensete ja isotroopsete tardkivimimassiivide alusel. Laialipaiskuvaid kive peab Eesti tingimustes uurima komplekselt, et mõista paremini nende paiskumiskaugust. Antud töös on analüüsitud kildude paiskumist vaba pinna poole, sest realselt ei ole ohuala ringikujuline nagu on kujutatud määruses nr 49.

3.3.1. Matemaatilised mudelid

3.3.1.1. Poolempiirilised mudelid

1975. aastal Lundborg kasutas ohuala määramiseks laialipaiskuvate kivimikildude järgi poolempiirilist lähenemist, et hinnata kivimikildude laialipaiskumise maksimaalselt kaugust. Meetod töötati välja baseerudes graniidimassiivides läbi viidud lõhketööde uuringutel (Ghasemi, Sari & Ataei, 2012).

$$V_0 = \frac{10d \times 2600}{T_b \times \rho_r}, \quad (\text{Valem 1})$$

$$L_m = 260d^{2/3}, \quad (\text{Valem 2})$$

$$T_b = 0.1d^{2/3}, \quad (\text{Valem 3})$$

kus L_m on kivimikillu maksimaalne paiskekaugus, (m);

d on lõhkeaugu läbimõõt, (toll);

T_b on lõhatud kivimi keskmine tükisuurus, (m);

ρ_r on kivimi tihedus, (g / cm^3).

Selles metoodikas on lõhkeaugu läbimõõt esitatud tollides. Eesti tingimustes kasutuselevõtuks on vajalik üleminekukonstandi kasutamine.

1983. a leti Chiapetta jt. poolt kaks seost maksimaalse laialipaiskuva kivimikillu paiskekauguse tuletamiseks, mille puhul ei ole arvestatud õhutakistuse, tuulesuuna ega kiirusega, sest on eeldatud kivimikild ei paisku üle 300 jala (91 m) ja trajektoori kõrgus tõuseb maksimaalselt paarsada jalga. Saadi järgmised seosed (Ghasemi jt, 2012):

$$R1 = V_0 \times \frac{2 \sin 2\Phi}{g}, \quad (\text{Valem 4})$$

$$R2 = \frac{V_0 \times \cos (V_0 \sin \Phi + 2V_0 \sin \Phi + 2gH)}{g}, \quad (\text{Valem 5})$$

kus $R1$ on kivimikillu paisketrajektoori projektsioon horisontaaltasnadil, (m);

$R2$ on maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus, arvestades selle kõrgust plahvatuskohast, (m);

V_0 on kivimikillu algkiirus;

Φ on trajektoori tõusunurk;

g on raskuskiirendus $9,81 \text{ m/s}^2$.

Õhutakistuse võib üldjuhul kõrvale jätta, sest selle mõju on võrreldes teistega marginaalne (Ghasemi jt, 2012).

1979. aastal Roth tuletas maksimaalse laialipaiskuva kivimikillu kauguse määramiseks, kus kasutati kriitilist muutujat V_0 kui esialgset algkiirust. Oma arvutustes kasutas ka Gurney võrrandit, mille põhjal saadi kivimikildude algkiirus lõhkeaine järgi järgmine seos (Ghasemi jt, 2012):

$$V_0 = 2E^{0,5} f[gl/ml], \quad (\text{Valem 6})$$

kus $(2E)^{0,5}$ on Gurney konstant;

gl on laengu pikkus lõhkeaugus;

ml on laengu kogumass topise pikkuse kohta.

3.3.2.2. Empiirilised mudelid

1990. aastal tuletas Gupta empiirilise seose laengupikkuse, vähima vastupanujoone ja kivimitükkide maksimaalse laialipaiskumise kauguse vahel (valem 7):

$$L = 155,2 \times D^{-1,37}, \quad (\text{Valem 7})$$

kus L on laengu pikkuse ja vähima vastupanujoone suhe;

D on laialipaiksuvate kivimiosakeste paiskekaugus (m).

1993. aastal avastasid Flinchum ja Rapp viisi, kuidas mõõta vaba pinda astangu lõhkamisel erinevate mõõtmismeetodite abil. Nad tuletasid matemaatilise valemi lõhkeaukude paigutuse arvutamiseks ja selle skeemi koostamiseks. Selle põhjal töötati välja näidiskaardid USBM uuringuga õhulööklaine ja laialipaiksuvate kivimite kahjustava mõju minimeerimiseks. Näidiskaardid määratleti valemi 8 abil (Ghasemi, Sari & Ataei, 2012):

$$P_f = \left(\frac{d}{12}\right)^2 \times K, \quad (\text{Valem 8})$$

kus P_f on näidiskaart;

d on laengu läbimõõt;

K on empiiriline konstant.

Kasutades üleval toodud valemi 8 näidiskaarti, määrati ridade vaheline kaugus järgmise seose abil:

$\sqrt{P_f}$ on ridade vaheline kaugus lõhkeaukude ruudukujulise võrgu kasutamisel;

$\sqrt{P_f}$ on 0,85 kordne ridade vaheline kaugus ristkülikukujulise võrgu kasutamisel.

Jõuti järeldusele, et neil olemasoleva teabe kohaselt sobib nende loodud meetod vaid teatud kindlates mäendustingimustes kasutamiseks, millest järeldub vajadus katsetöodes nende poolt kasutatust erinevate mäendustingimustes (Ghasemi jt, 2012).

2004. aastal tuletasid Richards ja Moore kolm valemit kivimikildude maksimaalse paiskekauguse arvutamiseks (Ghasemi jt, 2012).

$$L_{max} = \frac{k^2 \sqrt{m^{2,6}}}{g B}, \quad (\text{Valem 9})$$

$$L_{max} = \frac{k^2 \sqrt{m^{2,6}}}{g l_s}, \quad (\text{Valem 10})$$

$$L_{max} = \frac{k^2 \sqrt{m^{2,6}}}{g B} \sin 2\Phi_0, \quad (\text{Valem 11})$$

kus Φ_0 on Lõhkeaugu kaldenurk;

L_{max} on kivimikillu suurim paiskekaugus, (m);

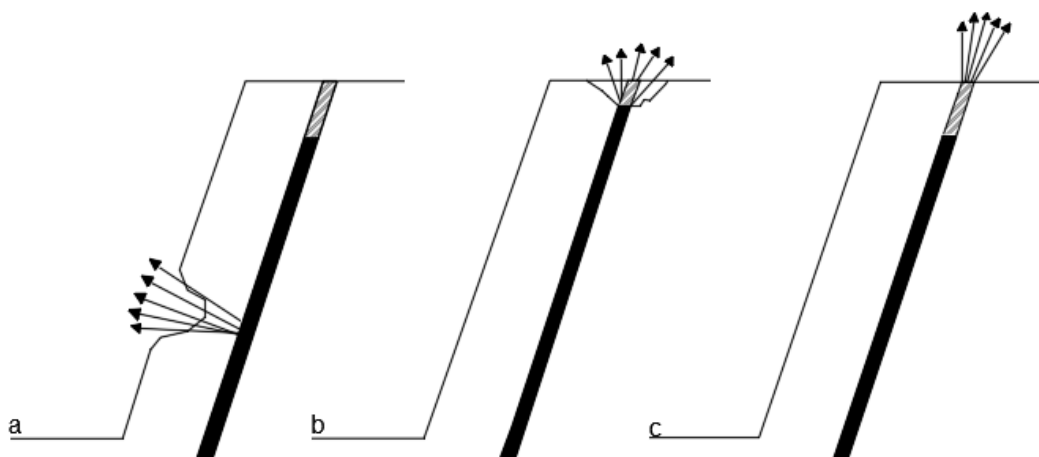
m on laengu mass (kg/m);

B on laengu ridadevaheline kaugus;

l_s on topise pikkus (m);

g on raskuskiirendus, 9,81 m/s²

Joonisel 14a puhul kildude laialipaiskumine (valem 9) kehtib siis, kui lõhkeaugud on risti peamiste geoloogiliste struktuuride ja nõrkade pindadega. Plahvatusgaasid tungivad sel juhul nõrkadesse kihtidesse, tekitades tugevat õhulööklainet ja suurele kaugusele laialipaiskuvaid kivimikilde. (Ghasemi jt, 2012).



Joonis 14. Illustratsioon laialipaiskuvate kivimite kohta koosatud (Ghasemi jt, 2012) järgi.

Väljapaise lõhkeaugu suudme piirkonnas (joonis 14b, valem 10) toimub juhul, kui topise pikkuse ja lõhkeaugu läbimõõdu suhe on liiga väike või lõhkeaugu ümbritsev kivim on liiga nõrk. Sel juhul paiskuvad kivimitükid kraatrist suvalises suunas (Ghasemi jt, 2012).

Topise väljapaiskumine lõhkeaugust (joonis 14c, valem 11) toimub siis, kui topiseks kasutatav materjal on liialt kerge või topise pikkus ei ole piisav. Plahvatusgaasid võivad mööda lõhkeaku üles tungida, mistõttu topise puhul või selle puudumisel toimub kivimikildude paiskumine (Ghasemi jt, 2012).

2006. aastal töötasid Raina jt. välja mudeli ohutusteguri määramiseks horisontaalselt ja vertikaalselt laialipaiskuvate kivimikildude puhul karjäärides. Parameetrid, mida kasutati ohutusteguri väljatöötamiseks, olid väga lihtsad. Need olid seotud kivimimassiivi ja lõhketööde parameetritega. Ohutustegur on dimensioonita suurus, mis tuletati kasutades lõhketööde parameetreid koos parandusteguritega erinevates olukordades. Ohutustegur näitab laialipaiskuvate kivimite vahemiku sõltuvalt ohutustegurist (Ghasemi jt, 2012).

McKenzie (2009) tuletas võrrandid, millega on võimalik ennustada maksimaalne laialipaiskuva kivimikillu kaugust ja killu suurust. Ta tugines oma järeldustes varasematele uuringutele Lundborgi (1974) ja Lundborgi jt. (1975). Ta tuletas võrrandi laialipaiskuva kivimikillu paiskumiskaugust tuginedes lõhkeaugu läbimõõdu, kuju ja maksimaalse kivimikillu suurusele. Uuring oli relevantne lõhkamise ohuala määramisel (Ghasemi jt, 2012).

2011. aastal Stojadinovic jt kasutasid numbrilist lahendust ja Runge-Kutta neljandat algoritmi laialipaiskuvate kivimikildude ja ohutu kauguse hindamiseks. Jõuti järeldusele, et maksimaalne kaugus on saadud 45 kraadise nurga all, mis on vastuolus McKenzie (2009) järeldustega (Ghasemi jt, 2012).

3.3.2.3. Riskipõhine meetod

1995. aastal tuletas Davies uue seose ohualade mõõtmete määramiseks, arvestades laialipasukvate kivimikillude kaugust, mis on arvutatud olemasolevate andmete ja tõenäosuse põhjal kui ennustatud kaugus ületatakse. Võimalike tabamuste sagedus ühe lõhkamise puhul laialipaiskuvale kivimikillule on järgmine (Ghasemi jt, 2012):

$$I = Nf(p_d p_p p_e), \quad (\text{Valem 12})$$

kus I on võimalike tabamuste sagedus (mõju aasta kohta);

N on lõhkamiste koguarv aastas;

p_d on tõenäosus, et kivikild liigub soovitud kaugusele ja suunas;

p_p on tõenäosus, et kivimikild jääb määratud ohualasse;

p_e on kokkupõrke tõenäosus.

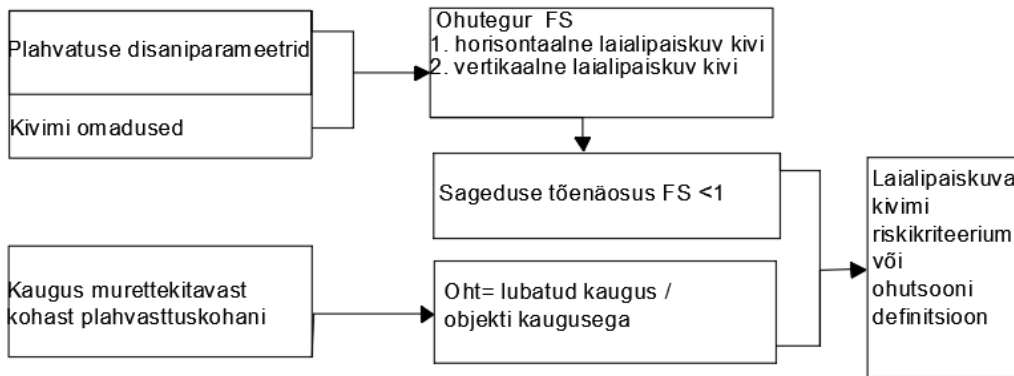
1995. aastal koostatud Daviese riskianalüüsimise meetod on küll põhjalik, kuid seda kasutada hindamisel väga keeruline, sest puudub korralik andmebaas, mille põhjal järeldusi teha (Ghasemi jt, 2012).

St George ja Gibson (2001) töötasid välja stohhastilise mudeli tõenäosusliku lähenemisega lõhkamise simuleerimiseks laialipaikuvate kivimikildude suhtes. Jõuti järeldusele, et kivimi suurus mõjutab laialipaikuvate kivimite maksimaalset kaugust (Ghasemi jt, 2012).

2004. aastal Richards ja Moore jõudsid järeldusele, et laialipaikuvate kivimikildude paiskumiskaugus näitab, kuidas selle ohutsoon peaks põhinema tõenäosuse põhjal ja milline peaks kujult olema lõhkeala. Raina jt (2003) avastas, et laialipaikuvate kivimikildude paiskumise vöönd ei ole oma olemuselt isotroopne (Ghasemi jt, 2012).

Bandopadhyay jt (2003) kasutasid Yageri meetodikat riskide hindamisel hägusloogika komplekte, et analüüsida ja hinnata laialipaikuvate kivimikildude paiskumist (Ghasemi jt, 2012).

Raina jt. (2011) tuletas riskipõhise kriteeriumi kasutades ohuteguri kontseptsiooni ja ohu suhet ja jõudis järeldusele, et riskikriteeriumi saab kasutada dünaamilise ohutsooni lõhkamiseks. Mõiste esialgu kinnitati kolme kaevanduse andmetega (Ghasemi jt, 2012).



Joonis 15. Ohutsooni definitsioon. Tõlgitud (Ghasemi jt, 2012) põhjal.

3.3.2.4. Hägusa hulga teooria rakendamise meetod koos tehiskarjääri lahendamise

Hägusloogika võeti kasutusse 1965. aastal Zadeh poolt. Selle teooria põhineb ebatäpse või puudliku teabega tegelemisel. Teooria on kasutusel reeglipõhiste mudelite väljatöötamisel, mis ühendab füüsilisi teadmisi, ekspertteadmisi ja arvandmeid, mis on sarnased reaalsele maailmale. See pakub ka süstemaatilist arvestust keelilise teabega tegelemiseks. Pealegi see täidab arvulise arvutamise, kasutades KIE poolt ette nähtud keelilisi silte liikmelisuse funktsioonidega. Sel viisil vastupidiselt klassikalise kogumiga, milles elemendid kuuluvad või ei kuulu komplekti, määratakse hägusas komplektis iga elemendi liikmelisuse aste vahemikus 0 kuni 1 (Rezaei, Monjezi, Yazdian & Varjani, 2011).

Esimene etapp hägusmodelleerimises on hägusus, mis on määratletud kui arvvaartuste teisendamiseks häguseks väärtuseks liikmefunktsioonide abil. Liikmefunktsioonide kuju võib olla, kas lineaarne (trapetsikujuline või kolmnurkne) või mittelineaarne, sõltuvalt probleemi olemusest (Rezaei, 2011).

Modelleerimiseprotsessi teine etapp on sisendi ja väljundi suhte kirjeldamine häguste tingimuslike reeglite järgi. Hägune tingimusreegel koosneb üldjuhul eeldusest ja tagajärjest (eelduse näide „ kui x on kõrge, siis y on madal“, kus mõisted kõrge ja madal saab esitada uduste komplektide ehk täpsemalt liikmefunktsioonide abil). Hägusmodelleerimise kolmas etapp on valida hägune järeldusmehhanism, et koondada reeglid (Zadeh, 1973). Liitmise tulemus on antud reeglite väljundi ja sisendparameetrite saamine. Selliseid hägusaid järeldussüsteeme on mitu nagu Mamdani ja Takagi-Sugeno algoritm, mida on kasutatud erinevates rakendustes. Tuleb mainida, et järeldussüsteemide hägusate reeglite tagajärjed ei ole samad seega on ka liikumisprotseduurid erinevad (Grima ja Verhoef, 1999; Gokceoglu ja Zorlu, 2004; Kayabasi jt, 2003; Sonmez et al., 2003, 2004). Mamdani algoritm on laialt levinud keerukate probleemide lahendamiseks. Mamdani ja Assilian (1975) näitasid, et hägused komplektid saab tõlkida täiesti struktureerimata keelelise heuristika terminidena struktureerituks. Selline struktureeritud komplekt võtab järgmise vormi (Iphar ja Goktan, 2006):

kui X_I on A_{iI} . . . ja X_r on A_{ir} , siis Y on B_i $I = 1, 2, \dots, K$

X_I, X_r on sisendiparameetrid;

A_{iI}, A_{ir} on udused kogumid;

Y on väljundparameeter;

K reeglite arv.

Mamdani algoritmis võib olla erinevaid häguseid kogumeid. Kõige sagedamini kasutatav tehnika on nn max-min funktsioon (Ross, 1995). Meetod põhineb koondamisel, mis toodab väljundit eraldusreeglite kogumist võrdsusega.

$$\mu_{C_k}(Z) = \max[\min [\mu_{A_k}(input(x)), \mu_{B_k}(input(y))]] \quad k= 1, 2 \dots r,$$

kus

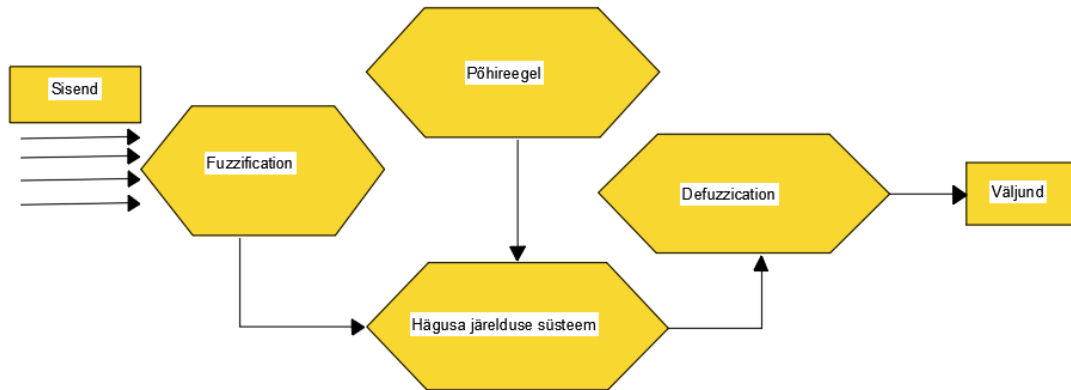
μ_{C_k}, μ_{A_k} ja μ_{B_k} on väljundi „Z“ liikmefunktsioonid reegli „k“ korral sisendiga „x“ või „y“

Viimane etapp hägusmodelleerimises on hägususe teisendamine. See tähendab kõigi hägusväärtuste numbrilisteks teisendamist (kvantitatiivseteks väärtusteks) (Ross 1995). On mitmeid hägususe teisendamise meetmeid, näiteks pindala tsentroidid (COA), mis tähendab maksimumis väiksemat maksimumi. COA on üks kõige kasutatavam hägususe teisendamise meetod (Hellendoorn ja Thomas, 1993; Grima, 2000). Väärtuse saab võrrandist. Hägusloogika kasutamist iseloomustav plokk skeem on esitatud joonisel 22.

$$Z_{COA}^* = \frac{\int_Z \mu_A(Z)zdz}{\int_Z \mu_A(Z)dz}, \quad (\text{Valem 12})$$

Kus Z_{COA}^* on crsip väärtus väljundi „Z“ jaoks ja $\mu_A(Z)$ on koondatud väljundliikmete koondfunktsiooni.

Defuzzifikatsioon on kvantifitseeritava tulemuse loomise protsess täppisloogika alusel, arvestades hägusaid komplekte ja neile vastavaid liikmelisuse astmeid. See on protsess, mis kaardistab häguse komplekti täppisloogikaks (Rezaei, 2011).



Joonis 16. Hägusa järelduse süsteem.

Hägusmodelleerimise rakendamine kivimikildude laialipaiskumise prognoosil

Sisend- ja väljundparameetrid

Antud meetodil kasutakse 8 sisendiparameetrit:

- 1) vähima vastupanujoone pikkus;
- 2) laengusamm;
- 3) lõhkeaugu sügavus;
- 4) puurtööde erimaht;
- 5) topise pikkus;
- 6) koormus viitele;
- 7) kivimi mahumass;
- 8) lõhkeaine erikulu.

Väljundiks on laialipaiskuva kivimitüki suurim paiskekaugus. Modelleerimisprotsessi on kaasatud parameetrite miinimum-ja maksimumväärtused ning nende väärtused sümbolid on väljatoodud tabelid (Rezaei, 2011).

Tabel 13. Parameetrid.

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	Min.	Max.
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	2	6,5
	Laengusamm reas (m)	S	3	8
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	5	17,5
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,061
	Topise pikkus (m)	T	2	10
	Koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	175,5
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	1,85	4,86
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,13	0,35
Väljundid	Laialipaiskuva kivimitüki paiskekaugus (m)	F	10	70

Sisendi/väljundi parameetrid täidetakse liikmefunktsiooni abil. Kolmnurkseid ja trapetsikujulisi liikmefunktsioone peeti kavandatava mudeli jaoks sobivaks (Habibagahi ja Katebi, 1996; Den Hartog et al., 1997; Grima, 2000)

Kolmnurkse ja trapetsikujulise häguskogumi liikmefunktsioonid on arvutatavad järgmiste valemitega:

Kolmnurkse liikmefunktsiooni korral:

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right], 0 \right], \quad (\text{Valem 13})$$

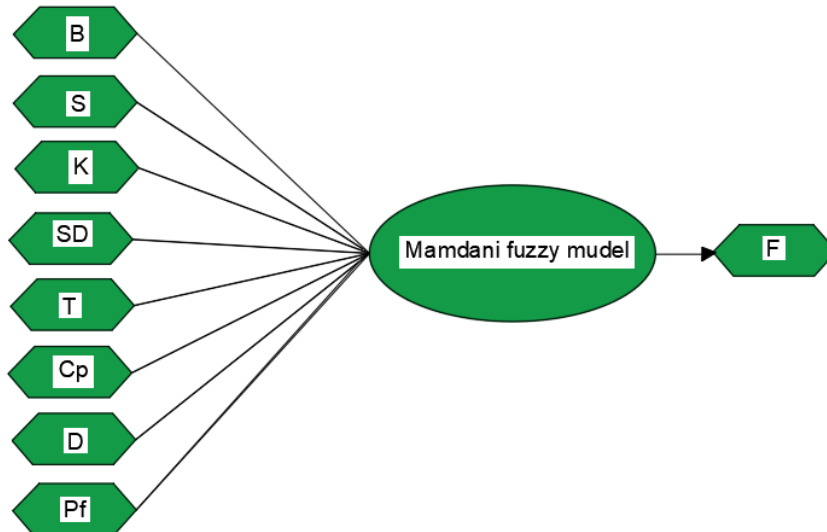
Nelinurkse liikmefunktsiooni korral:

$$\mu_A(x) = \max \left[\min \left[\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right], 0 \right], \quad (\text{Valem 14})$$

Kus $\mu_A(x)$ on häguskogumi liikmefunktsioon;

a, b, c ja d on empiirilised konstandid.

Sisend-ja väljundparameetrite häguskogumid on esitatud järgnevatel joonistel 22,23. Lühendid VVL, M ja VVJ tähistavad väga madalat, keskmist ja väga kõrget vastavalt.



Joonis 17. Mamdani hägusmudel.

Hägune tingimuslause ehk kui-siis reegel

Hägusad väited peavad olema esitatud implikatsioonifunktsiooniga, mida nimetatakse hägusaks tinglikuks lauseks või hägusaks kui-siis (*what-if*) reegliks. Allolevas näites kasutati kokku 390 hägusat kui-siis reeglit. Selleks on kujundatud MATLABi keskkonnas hägune kui-siis reegliredaktor, mis sisaldab mudelis üheksat reeglit. Kui-siis reeglite liitmiseks kasutati Mamdani algoritmil põhinevat hägusat järeldusmehhanismi (Rezaei, 2011).

Esitatud näites on kasutatud järgmisi sisendparameetreid:

- $B=5,5$ m,
- $S= 6,5$ m,
- $K=17,5$ m,
- $SD=0,028\text{m}/\text{m}^3$,
- $T= 4$ m
- $Cpd= 20,22$ kg/ms,

- $D = 4,1 \text{ g/cm}^3$ ja
- $P_f = 0,25 \text{ kg/tonn}$,

Kivimitüki paiskekauguseks prognoositi antud näite korral 40 m.

Koostatud hägusumodeli tulemusi on võrreldud tavapärase statistilise meetodiga- usaldustegurid (R^2) on häguse ja statistilise meetodil vastavalt 0,984 ja 0,701. Hägusa ja statistilise mudeli ruutkeskmise viga (RMSE) võrdne vastavalt väärtustega 1,98 ja 8,31. Võrdlus näitab häguse mudel on parem kui statistiline mudel. Analüüsist selgus, et kõige tõhusamad parameetrid laialipaiskuva kivimikildude puhul on erikulu ja topise pikkus. Sisendparameetritest avaldab kõige vähem mõju kivimi tihedus (Rezaei, 2011).

3.3.2.5 Kokkuvõtte matemaatilistest mudelitest

Kivimikildude laialipaiskumise maksimaalse paiskekauguse määramiseks tuleb valida meetod, mis arvestab piisavalt paljusid lõhketööde parameetreid. Kivimikildude laialipaiskumise kaugust on ülimalt raske määrata, sest seda mõjutavad väga paljud tegurid. Kivimikildude laialipaiskumist mõjutavad kivimimassiivi erinevad omadused:

- Poorsus;
- Tugevus;
- Lõhkelisus;
- Kihilisus.

Valitud meetod peab arvestama ka lõhkamise parameetreid:

- Topise pikkus;
- Ridade vaheline kaugus;
- Laengusamm;
- Vähi vastupanujoon;
- Lõhkeaugu sügavus;
- Jne.

4 Tulemused

4.1 Valitud meetod koos põhjendusega

Oma töös kasutasin hägusloogikat, sest seda kasutatakse tehisintellektisüsteemides ning võimaldab saada suhteliselt usaldusväärseid tulemusi ka sisend-ja väljundparameetrite vaheliste korrelatiivsete seoste vähesenusaldusväärsuse, eriti nende matemaatiliste/algebralise kuju osas.

Meetodit rakendades kasutasin kaheksat sisendit:

- Vähima vastupanujoone pikkus;
- Laengusamm;
- Lõhkeaugu sügavus;
- Puurtööde erimaht;
- Topise pikkus;
- Koormus viitele;
- Kivimi mahumass;
- Lõhkeaine erikulu.

Väljundiks on laialipaiskuva kivimitüki suurim paiskekaugus. Need andmed on esimeses lähenduses piisavad arvutuslikult maksimaalse paiskekauguse realistlikuks prognoosiks, et määrata arvutuslik võimalik realistlik paiskekaugus.

Valitud meetod on välja töötatud M. Rezaei poolt Iraanis Gol-E-Gohar rauamaagi karjääri tingimuste alusel. Valisin antud meetodi, sest maailmapraktikas on seda juba kasutatud laialipaiskuvate kivimikildude paiskumiskauguse määramiseks. Hägusloogika arvestab piisavalt paljude lõhketööde parameetritega kivimikildude paiskumiskauguse arvutamiseks. Arvutustel kasutasin Gol-E-Gohar rauamaagi karjääri andmete põhjal koostatud valemit, sest Eestis ei ole uuritud kivimikilude paiskumiskaugust. Eestis puudub andmebaasi kivimikildude paiskumiskauguse kohta, mistõttu tuleb Eestis läbi viia suuremahuline uuring kauguse uurimiseks, kuid see eeldab suurt ressursikulu ja pikaajalist koostööd lõhketöödega tegelevate ettevõtetega.

Teise meetodina kasutasin droonivideode analüüsimist. See meetod on visuaalne ja pole sugugi täpne.

4.2 Reaalne kivimikildude laialipaiskumine

Antud töös analüüsisin Ivar Maristi filmitud videosid lõhkamistest ettevõttes Väo Paas (Marist, 2020). Ivari on filminud lõhkamisi erineva nurga alt, isegi drooniga. Paaril korral on ta kaamera jätnud lõhkamisele liiga lähedale. Hea näide on 27.veebruari 2020. aasta videos, kus kivimikillud paikusid otse kaamerasse, sest kaamera oli asetatud lõhkamisele lähedale. Häid näiteid oli ka videodest, kus kaamera ongi hinnanguliselt 15-20 m kaugusel ja mitte ükski kivimikild ei paisku kaamerasse. Sellest

võib järeldada, et lõhkamise tagajärjel laialipaiskuvad killud on ettearvamatud ja nende täpset suunda on keeruline prognoosida (Marist, 2020).



Joonis 18. Killud paiskuvad kaamerasse. Võetud 27.02.2020 videost (Marist,2020).

Analüüsid Ivar Maristi videoid on väga hästi näha, et kivimikillud lendavad suuresti ühes kindlas suunas ehk vaba pinna suunas alla 100 m vaba pinna poole. Väga hästi on näha, et kivimikilde massiivi poole paiskub pigem vähem. Selle põhjal koostas illustreriva joonise, et kuidas realselt paiskuvad kivimikillud ühes karjääris. (Marist, 2020). Pikaajalise lõhketööde kogemustega inseneridelt olen saanud samu hinnanguid, et ohuala ei ole praktiliselt kunagi ideaalne ring, vaid see on oluliselt välja venitatud vaba pinna poole.



Joonis 19. Kildude paiskumine (Marist,2020).

2020.a jaanuaris koostati Tõnu Tombergi poolt ja saadeti TTJA-le ekspertarvamus lõhketööde ohuala määramisest purustatud materjali tükkide/kildude laialipaiskumise järgi. Majandus- ja taristuministri 08.09.2017 määruse nr 49 „Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded“ lisa „Ohuala ja ohutute kauguste määramine“ on tabelites 9 ja 10 ohualade raadiused on määratud tuginedes väljapaiskelaengute ühe vaba pinnaga lõhkamisele, ka ei arvesta lõhketööde parameetreid (Tomberg, 2020).

Selle määruse lisa tabelid on määratud juhtudeks, kui üksiklaengud on suurusjärgus 100 kg ja enam. Vertikaalsete lõhkeaukude kahe vaba pinnaga lühiviitlõhkamisel paiskub juba ainuüksi vaba pinna olemasolu ja piisava viitekestuse (üle 25 ms) tõttu ka väljapaiskelaengute lõhkamisel üle 80% lõhatud kivimitükkidest ja -kildudest olemasoleva vaba pinna suunas, seda sõltumata laengute suurusest. Kõigisse teistesse suundadesse kokku võib paiskuda maksimaalselt kuni 20% lõhatud kivimi tükkidest. (Tomberg, 2020).



Joonis 20. Paiskuvad kivimikillud (Marist,2020).

Tuginedes Eesti ja maailmapraktikale oleks realselt ohuala mõõtmed vaba pinna suunas suurusjärgus kuni 50-60 m ning teistes suundades suurusjärgus kuni 30-40 m inimestele ja 10-15 m masinatele ning pealmaataristule. Sealjuures peavad olema täidetud järgmised tingimused (Tomberg, 2020):

1. lõhkamise eesmärgiks on kivimi kobestamine;
2. lõhkamine toimub kahe või enama vaba pinna tingimustes;
3. topistamine peab olema kvaliteetne, st kasutatud on kvaliteetset topisematerjali, mis laengu plahvatusel lõhkeaugust välja ei paisku ning topise pikkus on vähemalt 15 lõhkeaugu läbimõõtu;
4. iga laeng plahvatab eraldi viiteseerias, st korraga plahvatab ainult üks laeng;
5. viite kestus on vähemalt 42 ms;
6. viiteseeriade liikumine (üksiklaengute laengute plahvatamise järjekord) on suunatud olemasoleva vaba pinna poolt lõhatava kivimimassiivi poole.



Joonis 21. Lõhkamise tulemus, kui kaamera on 15-20 m kaugusel lõhatavast plokist (Marist,2020).

Täites eespool nimetatud tingimusi on tagatud olukord, kus iga järgmise laengu plahvatuse ajaks on lõhatavas kivimimassiivis, lisaks juba olemasolevale vabale pinnale, moodustunud vähemalt üks täiendav vaba pind, mis oluliselt suurendab plahvatuse mõju vabade pindade suunas ning vähendavad plahvatuse toimet kõigis teistes suundades. Lõhatud materjali kildude laialipaiskumine jääb sel juhul samuti vaba pinna suunas eelnimetatud suurusesse ning on kõigis teistes suundades marginaalne (Tomberg, 2020).

Kontsentreerusin oma töös vaid vaba pinna poole paiskuvatele kivimikildudele, kuid see ei tähenda, et kivimikillud ei paisku teistes suundades.

Visuaalse hindamise järgi paiskuvad kivimikillud ligikaudu 90 % ulatuses olemasoleva vaba pinna suunas. Mõned üksikud killud paiskuvad astangu ülemisele servale. Filmitud videodes polnud ühtegi näidet, et kivimikillud paiskuks liiga kaugele. Lõhketööde käigus paiskuvad kivimikillud on ettearvamatud ja puudub ülevaade kivimikildude paiskumist. Seda teemat on uuritud vähe just selle keerukuse tõttu. Kivimikildude laialipaiskumise jaotuse teemat suundade kaupa ei ole seni ka maailmapraktikas kuigi põhjalikult uuritud.

Joonisel 20 märkisin illustratiivselt videode põhjal jõudnud järelduse, et killud paiskuvad vabapinna poole, tegelikult ka kõrvale, mitte vaid otse suunas. Ülevale astangule paiskub äärmiselt vähe antud videode puhul. (Marist, 2020).



Joonis 22. Laialipaiskuvad kivimikildude suund videode põhjal.

4.3 Ettevõtetelt saadud algandmed

Algandmed sain lõhketööde ettevõtetelt. Selline teave on konfidentsiaalne, sest sisaldab eneses ettevõtete ärisaladusi, mis ei kuulu kolmanda osapoolega jagamisele. Seetõttu kasutasin oma arvutustest selliseid numbrilisi väärtusi, mida ei saa otseselt siduda ühegi konkreetse ettevõtte ega karjääriga.

Saadud andmetele tuginedes koostasid koondtabeli, kus on toodud välja lõhketööde parameetrite miinimum- ja maksimumväärtused, mille põhjal määrasin arvutuslikult laialipaiskuvate kivimikildude paiskekauguse vaba pinna suunas.

Tabel 14. Algandmed.

Parameetrid	
Lõhkeaine	ANFO/EXAN
Lõhkeaukude asetus	malekorras
Augu diameeter (mm)	64-95
Ridade arv	2-4
Aukude arv	7-120
Astangu kõrgus (m)	1,5-18
Erikulu	0,4-0,7
Topis	1-3

4.4 Algandmete genereerimine arvutusteks

Nagu mainitud kasutan juba valmis modelleeritud valemit, sest mul puudub reaalne andmebaas kivimikildude paiskekaugusest Eesti paekarjäärides. Tuginedes Eesti lõhketööde firmade kogemusele ja maailmapraktikale võib kasutada hägusloogika teooria valemit laialipaiskuvate kivimikildude maksimaalse kauguse prognoosimiseks.

Lõhketööde parameetrid arvasin TTJA poolt heakskiidetud metoodika järgi, mida kasutavad sisuliselt kõik Eestis lõhketöid tegevad ettevõtted.

Arvutan olemasolevate andmete põhjal vähima vastupanujoone pikkuse (Tomberg & Veersalu, 2017):

$$B = 0,9 * \sqrt{\frac{q_1}{q}}, \quad (\text{Valem 15})$$

kus q_1 on laengu jaotatud mass (laengu 1 meetri mass) lõhkeaugus, (kg/m);

q on lõhkeaine erikulu, (kg/m³).

Laengusammu arvasin valemiga (Tomberg & Veersalu, 2017):

$$S = B \cdot m, \quad (\text{Valem 16})$$

kus m on paigutustegur, milleks valisin $m=1,1$

Puurtööde maht (Tomberg & Veersalu, 2017):

$$P_t = N \cdot I_d \text{ (m)}, \quad (\text{Valem 17})$$

kus N on laengute arv ploki lõhkamisel;

I_d on lõhkeaugu sügavus (m).

Puurtööde erimaht (Tomberg & Veersalu, 2017):

$$p_t = P_t/V \text{ (m/m}^3\text{)}, \quad (\text{Valem 18})$$

kus P_t on puurtööde maht;

V on lõhatava ploki maht.

Tabelis nr 15 on väljatoodud nende sümbolid järgmistest arvutustest. Mõned parameetrid on esitatud teisiti, kui käesoleval ajal Eestis lõhketööde parameetrite määramiseks kasutatavas arvutusmetoodikas.

Tabel 15. Parameetrid.

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	Min.	Max.
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	1,5	3,5
	Laengusamm reas (m)	S	1,8	4
	lõhkeaugu sügavus (m)	K	1,5	18
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,061
	Topis (m)	T	0,9	3
	Koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	175,5
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	1,5	2,78
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,4	0,65
Väljundid	Laialipaiskuva kivimitüki paiskekaugus (m)	F		

$F = -43,9 - 37,422B + 30,581S + 2,614K - 119,355SD - 6,4T + 0,144Cpd - 2,256D + 303,78Pf$, (Valem 19)

Eeltoodud võrrandis olevad konstandid ei ole universaalsed, sest võrrand on väljatöötatud Gol-E-Gohar rauamaagi karjääri andmete põhjal. Võrrandi kuju ning eelkõige selles esitatud konstandid vajavad täpsustamist Eesti paekarjääride tingimustes.

4.5 Arvutuste tulemused

Analüüsisin sõltuva muutuja (paiskekauguse) sõltuvust üksikparameetrite (lõhkeaugu sügavus ja läbimõõt, topise pikkus, lõhkeaine erikulu) muutumisest ja jõudsin mitmete seosteni. Antud töös on tegemist kompleksse (mitme sõltumatu muutuja funktsiooniga väljendatava) sõltuvusega sõltuva muutuja leidmiseks, kus paiskekaugus sõltub korraga mitmest sisendparameetrist.

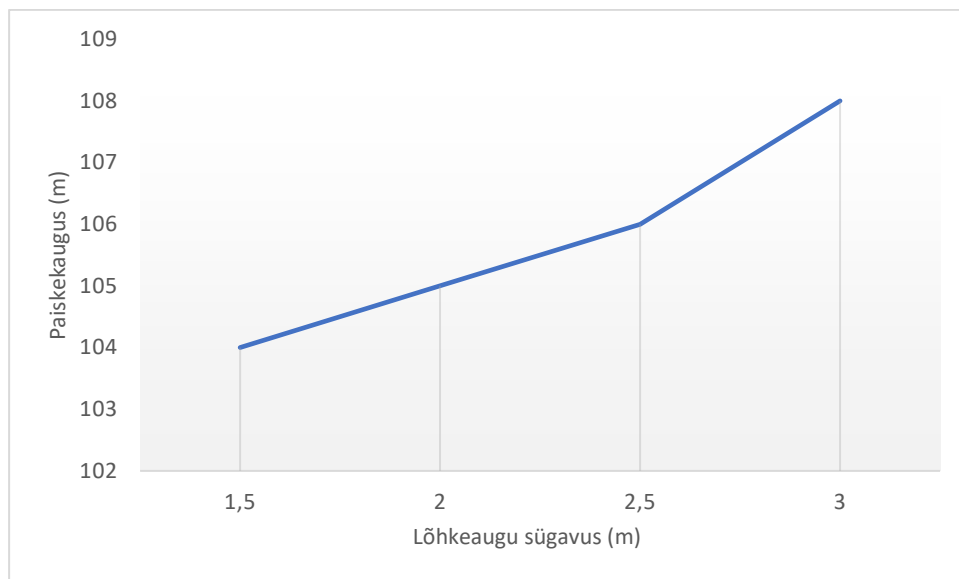
Analüüsisin kivimitükkide paiskumist vaba pinna poole ja arvutasin varem väljatöötatud võrrandiga, mis on välja töötatud teistes mäenduslikes tingimustes. Antud võrrandis olevad konstandid pole universaalsed.

Kildude laialipaiskumiskauguse sõltuvus lõhkeaugu sügavusest

Esmalt määrasin lõhkeaugu sügavuse mõju. Tabel 16 arvustustes muutsin vaid lõhkeaugu sügavust. Arvutasin paiskekauguse lõhkeaugu läbimõõdu ja madala lõhkeaine erikulu põhjal. Selle põhjal maksimaalne kildude paiskumiskaugus 3 m sügavuse augu korral 108 m, mis on karjääri lõhkamise puhul natukene üle poole ohualast. Liiga paljugi sellel juhul paiskub kivimikilde vaba pinna poole. Seos on korrelatiivne.

Tabel 16. Kildude paiskekauguse sõltuvus lõhkeaugu sügavust.

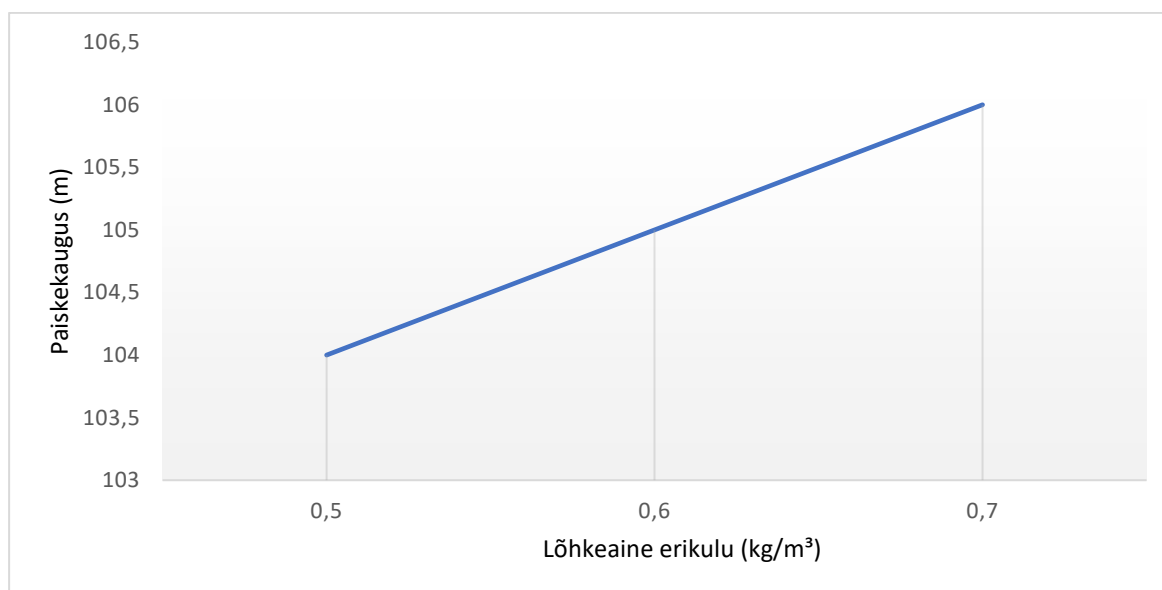
Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d = 64 mm; q = 0,5 kg/m ³			
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	1,8	1,8	1,8	1,8
	Laengusamm reas (m)	S	2,34	2,34	2,34	2,34
	lõhkeaugu sügavus (m)	K	1,5	2	2,5	3
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topis (m)	T	0,96	0,96	0,96	0,96
	Koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi tihedus (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/m ³)	Pf	0,5	0,5	0,5	0,5
Väljundid	Laialipaiskuva kivimikillu maksimaalne kaugus (m)	F	104	105	106	108



Joonis 23. Kivimikildude paiskekauguse sõltuvus lõhkeaugu sügavusest.

Leidsin graafiliselt seoseid laialipaiskuvate kivimite paiskekauguse ja lõhketööde parameetrite vahel. Jõudsin järeldusele, et lõhkeaugu sügavus on üks teguritest, mis mõjutab laialipaiskuvate kivimikildude teket. Joonis 23 kujutab oskuslikult, kuidas lõhkeaugu sügavusega suureneb kivimikildude maksimaalne paiskekaugus. Leidsin graafiliselt seoseid laialipaiskuvate kivimite paiskekauguse

Kivimikildude laialipaiskumiskauguse sõltuvus lõhkeaine erikulust



Joonis 24. Kivimikildude paiskumiskauguse sõltuvus lõhkeaine erikulust.

Lõhkeaine erikulu seos paiskekaugusega on positiivselt korrelatiivne. Erikulu suurenemisega suureneb ka paiskekaugus. Algebraalne kuju ei ole antud kontekstis relevantne, sest ei oma suurt praktilist väärtust. See on vaid üks muutujatest, mis paiskekaugust määrab.

Arvutasin lõhkeaine erikulu väärtustega, mida kasutatakse Eesti paekarjäärides erinevates tingimustes lõhates. Allpool toodud tabelides 16-18 on esitatud maksimaalne laialipaiskumise kaugus erikulu 0,4 kg/m³, 0,6 kg/m³ ja 0,8 kg/m³ põhjal. Neid tabeleid võrreldes võib väita, et erikulu suurenedes, suureneb ka maksimaalne kivimikildude paiskekaugus. Muutsin arvutustes vaid lõhkeaine erikulu, ülejäänud algandmed jäid samaks.

Tabel 17. Maksimaalne paiskekaugus lõhkeaine erikulu 0,4 puhul.

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	70	71	72	74	76

Tõstes lõhkeaine erikulu 0,2 kg/m³, suureneb maksimaalne kivimikildude laialipaiskumise kaugus peaaegu 2 korda.

Tabel 18. Maksimaalne kivimikildude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,6.

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	131	132	133	135	137

Kui võtta lõhkeaine erikuluks $0,8 \text{ kg/m}^3$, siis võivad kivikillud paiskuda maksimaalselt peaaegu 200 m kaugusele. Tavaliselt ei kasutata nii kõrget lõhkeaine erikulu, kuid mõnikord on märgade lõhkeaukude lõhkamisel vajalik kasutada ka sellist oluliselt suurendatud lõhkeaine erikulu. Karjäärilõhkamiste puhul on ohualaks määruse järgi 200 m, mis muudab lõhkamise ohtlikuks. Määruses on arvestatud ka, et kivimikillud lendavad ringkujuliselt, kuid tegelikkuses paiskuvad killud siiski vabapinna poole.

Tabel 19. Maksimaalne kivimikillu paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,8.

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	192	192	194	196	198

Allpool toodud tabelid 20-22 on esitatud maksimaalne laialipaiskumise kaugus erikulu $0,4 \text{ kg/m}^3$, $0,6 \text{ kg/m}^3$ ja $0,8 \text{ kg/m}^3$ põhjal. Neid tabelleid võrreldes võib väita, et erikulu tõstes, tõuseb ka

maksimaalne kivimikildude laialipaiskumise kaugus. Kõik muud andmed olid samad, muutsin vaid lõhkeaine erikulu.

Tabel 20. Maksimaalne kivimikildude paiskeaugus lõhkeaine erikuluga 0,4.

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	89	90	91	93	95	100	102	104	106

Tabel 20 lõhkeaine erikulu 0,4 kg/m³ ja lõhkeaugu sügavuse 8 m puhul on maksimaalne laialipaiskumise kaugus 89 m. Tõstes erikulu 0,6 kg/m³ jättes muud andmed samaks, tõuseb maksimaalne laialipaiskumise kaugus 150 m. Erikulu 0,8 kg/m³ puhul on maksimaalne laialipaiskumise kaugus 211 m, mis on üle 200 m.

Tabel 21. Maksimaalne kivimikilude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,6.

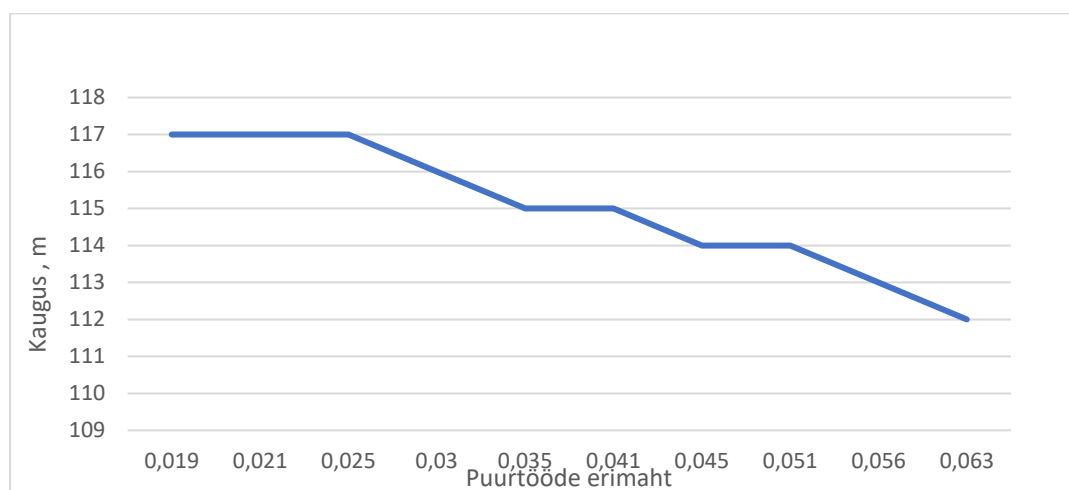
Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	150	151	152	154	156	163	164	165	167

Tabel 22. Maksimaalne kivimikilude paiskekaugus lõhkeaine erikuluga 0,8.

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	211	211	213	215	217	224	225	226	228

Kivimikildude paiskekauguse sõltuvus puurtööde erimahust

Puurtööde erimahu kasvuga kaasneb paiskekauguse vähenemine. Seos ei ole otseselt pöördvõrdeline. Seos on korrelatiivne, korrelatsioon on negatiivne. Algebraline kuju ei ole antud kontekstis relevantne, sest ei oma suurt praktilist väärtust.



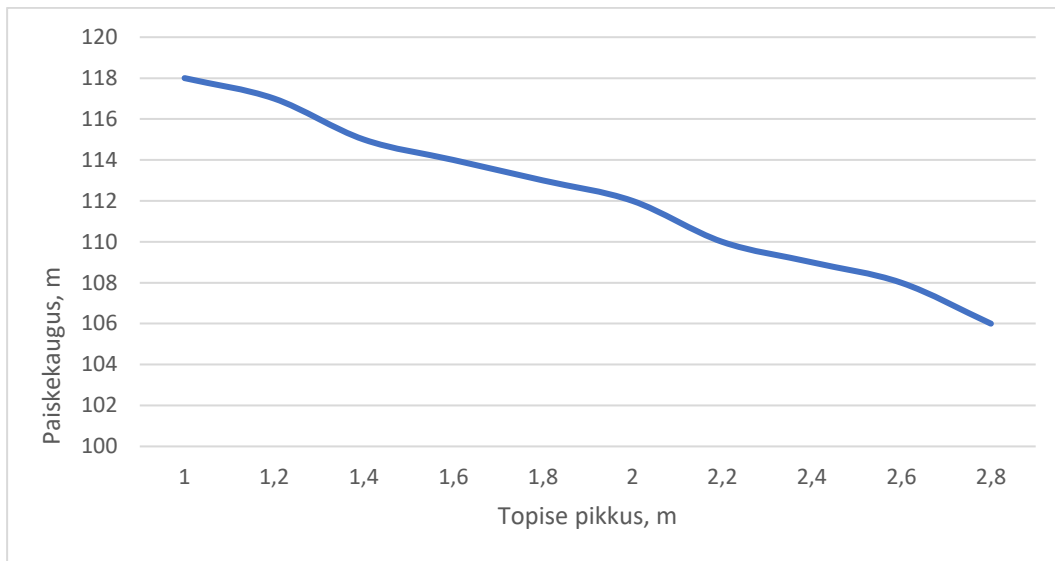
Joonis 25. Puurtööde erimahu seos kivimikildude paiskumiskaugusega.

Joonisel 25 väljendab puurtööde erimahu seost laialipaiskuvate kivimikildude paiskumiskaugusega. Selle põhjal saab järeldada, mida kõrgem on erimaht puurimisel seda väiksem on maksimaalne kivimikildude paiskumiskaugus.

Kivimikildude paiskekauguse sõltuvus topise pikkusest

Topise pikkuse suurenemine vähendab kildude laialipaiskumist. Seos ei ole otseselt pöördvõrdeline. Seos on korrelatiivne ja korrelatsioon on negatiivne. Topise pikkuse kasvuga kaasneb paiskekauguse vähenemine. Algebraline kuju ei ole antud kontekstis relevantne, sest ei oma praktilist väärtust.

Joonis 26 on esitatud kivimikildude paiskekauguse sõltuvus topise pikkusest. Maksimaalne laialipaiskuvate kildude kaugus väheneb topise pikkuse kasvuga. Relevantne on topistada piisavalt tihedalt, et gaasid ja kivimikillud ei paiskuks üles.



Joonis 26. Topise seos laialipaiskuvate kildude kaugusega.

4.6 Järeldused arvutustest

Antud töös on analüüsisin kivimikildude laialipaiskumist vaba pinna suunas. Arvustasin maksimaalsed kaugused erinevate üksikparameetrite korral. Leidsin erinevaid seoseid paiskekauguse ja erinevate lõhketööde üksikparameetrite vahel. Paiskekaugust mõjutavad mitmed erinevad parameetrid. Leitud seosed ei ole funktsionaalsed, vaid korrelatiivsed. Ohutsooni laius on sõltuvuses puur- ja lõhketööde põhiparameetritest. Ohuala täpne kuju pole küll universaalne, kuid mitte ringikujuline. Järeldan enda töö põhjal killud paiskuvad 90 % vaba pinna suunas ja 10 % teistes suundades.

Esmakordselt kasutasin antud metoodikat Eesti tingimustes lõhketööde ohuala määramiseks laialipaiskuvate kivimikildude järgi, arvestades puur- ja lõhketööde parameetreid. Varem on kasutatud seda meetodit Iraanis Gol-E-Gohar rauamaagi karjääris. Arvutused viisin läbi Gol-E-Gohar rauamaagi karjääri tingimuste põhjal tuletatud võrrandiga, mille kuju ja konstandid ei ole universaalsed ja vajavad korrigeerimist.

Puur- ja lõhketööde parameetritest Eesti paekarjääride kohta koostas andmebaasi, kuid paremate järelduste tegemiseks oleks vaja siiski eelnevat uurida, kui kaugele päriselt paiskuvad kivimikillud. Eestis puudub varem uuritus kivimikildude paiskekauguse kohta. Nõukogude Liidu ajal lõhati suurte laengutega suure läbimõõduga puuraukudes, kuid Eesti ajal enam mitte. Seega on ohuala mõõtmete Eesti oludesse sobiva ja realistliku puur- ja lõhketöödest parameetritest sõltuva metoodika väljatöötamiseks vajalik täpsustada komplekssete mitme muutuja funktsioonide kuju ja konstante. Kogu maailmas on vähe uuritud tükkide/kildude paiskekaugust muudes suundades (st mitte vaba pinna poole). Väga paljude autorite poolt on seda küll mainitud, kuid ei ole eriti palju enam Pareto printsiibi 20/80 jaotusest ka kõige ebasoodsamates tingimustes lõhkamisega. Väga vähe on kirjandust, mis sisaldaks seoseid ja võrrandeid. Neiski vaid mõned üldised andmed, peale Bhandari (Bhandari, 1997) töö, mille kohaselt peaks paiskekauguste suhe olema ca 2/1. Seega tuleb täpsustada ka seda suhet meie oludes.

Täpsustada saab vaid praktiliste tööde/mõõtmistega. See ei tähenda suuremahulist katselõhkamiste korraldamist, vaid mõõtmisi konkreetsetes karjäärides. Droonivideotest saadud andmed ei ole piisava usaldusväärsusega. Mõõta tuleb konkreetset seda, kui kaugele kivikillud päriselt paiskuvad, seda nii nii astangu esialgsest servast, kui ka viimasest lõhkeaukude reast. Mõõtmisi on võimalik korraldada suhteliselt lihtsate vahenditega ja ohutult teha, kuid see on ajakulukas.

Kokkuvõte

Antud töö kirjutasin laialipaiskuvatest kivimikildude paiskumisest vaba pinna suunas ja võimalikust arvutusmeetodist, mis arvestab erinevaid lõhketööde üksikparameetreid. Laialipaiskuvate kivimite paiskumiskaugust mõjutavad mitmed tegurid, millede kohta leidsin analüüsil erinevaid seoseid. Leitud seosed on oma olemuselt korrelatiivsed.

Analüüsisin ohutsooni laiuse sõltuvust puur-ja lõhketööde parameetritest. Tuginesin oma töös ekspertarvamustele, arvutustele ja analüüsitud videotele. Sellest järeldan, et ohuala ei ole horisontaalmõõtnes ringikujuline, sest ligikaudu 90% kildudest paiskuvad vaba pinna poole ja ülejäänud teistes suundades.

Minu kasutatud meetodikat on varem kasutatud Iraanis Gol-E-Gohari rauamaagi karjääris. Kasutasin selle karjääri tingimuste põhjal koostatud võrrandit, mille kuju ja konstandid vajavad Eesti tingimustes kindlasti täpsustamist, sest tegu ei ole universaalse võrrandi ega konstantidega. Leian, et võrrand ise on suhteliselt universaalne, sest see arvestab piisavalt paljusid lõhkamisega seotud parameetreid, mis mõjutavad kivimikildude paiskumiskaugust. Samas aga ei ole universaalsed võrrandi konstandid, sest võrrand on välja töötatud lõhketöödeks enam-vähem homogeenses ja isotroopses kivimimassiivis.

Koostasin oma töös Eestis realselt töötavate paekarjääride andmete alusel andmebaasi, kuid kindlamate järelduste ja tegelike seoste tegemiseks on lähitulevikus vajalik erinevates Eesti paekarjäärides uurida, kui kaugele pealmaa-lõhketöödel killud tegelikult paiskuvad. Eestis ei ole varem uuritud kildude laialipaiskumise kaugust ning ka maailmapraktikas on sellega tegeletud suhteliselt vähe, eriti kildude ruumilise jaotuse osas. Väga vähe on avaldatud kirjandust, mis sisaldaks vastavaid seoseid ja võrrandeid kivimikildude paiskumise kohta. Samuti on enamikes uuringutes keskendutud enam-vähem isotroopsetes massiivides lõhkamisele.

Eestis on vajalik uurida kivimikildude laialipaiskumist lõhketöödel. Kildude tegelikku paiskumiskaugust saab prognoosida vaid praktilistel mõõtmistel baseerudes. See ei tähenda suuremahulist katselõhkamiste korraldamist, mõõtmistoid on võimalik läbi viia reaalsete lõhkamiste puhul karjäärides, kuid see tekitab ettevõtetele, tõsi küll, mitte eriti suuremahulist, lisatööd. Vajalik on mõõta kivimitükkide paiskumist nii astangu esialgsest servast kui ka viimasest lõhkeaukude reast. Selliste tööde ohutu läbiviimine ei nõua väga kulukaid vahendeid, kuid see võib tekitada mõningast ajakulu lõhketöödel.

Tänuavaldused

Antud lõputöö valmimisel soovin tänada oma juhendajat Tõnu Tombergi. Tänan kõiki lõhketööde ettevõtteid, kes olid minuga nõus infot jagama ja loomulikult tänan enda elukaaslast, kes oli mulle sellisel pingelisel ajal toeks.

Kirjanduse loetelu

- Aaloe, A., & Miidel, A. (1967). Eesti pangad ja joad. Eesti raamat.
- Arunachalam, B. (n.d.). Fly Rock Hazards In Blasting & Control Measures.
https://www.Academia.Edu/10277171/FLY_ROCK_HAZARDS_IN_BLASTING_and_CONTROL_MEASURES
- Bajpayee, T. S., Verakis, H. C., & Lobb, T. E. (2004, February). An Analysis and Prevention of Flyrock Accidents in Surface Blasting Operations. Proc 30th Ann Conf Explos Blasting Tech, New Orleans, LA.
<https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover-sheet857.html>
- Bajpayee, T. S., Verakis, H. C., & Lobb, T. E. (2007). An Analysis and Prevention of Flyrock Accidents in Surface Blasting Operations.
https://www.researchgate.net/publication/265184111_An_Analysis_and_Prevention_of_Flyrock_Accidents_in_Surface_Blasting_Operations
- Bhandari, S. (1997). Engineering rock blasting operations. A.A. Baklema.
- British Standards Institute Staff & British Standards Institute Staff. (1999). Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings. B S I Standards.
- Canadian Environmental Assessment Agency. (2018). Blackwater Gold Project.
<https://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents/p80017/126000E.pdf>
- CBC News. (2015). Incidents like Cape Ray blasting mishap deemed rare. <https://www.cbc.ca>
- Concretebroker. (2019). How to choose the right stemming material for your blast.
<https://www.concretebroker.com/Blog/View/456>
- Dowding, C. H. (1985). Blast Vibration Monitoring and Control. Dowding.
- Einasto, R. (2013). *Vertikaalne lõhelisus*. eprints.tktk.ee.
https://eprints.tktk.ee/id/eprint/5574/9/paas2/vertikaalne_lhelisus.html
- Encyclopeadia Britannica. (2017). Seismic wave,. Inc.
- Estonica. (2001). Karst forms.
http://www.estonica.org/en/Nature/Limestone_plateaus_of_North-Estonia/Karst_forms/
- Four Star Blasting Mats. (2015). Four Star. <https://www.blastingmats.com>
- Ghasemi, E., Sari, M., & Ataei, M. (2012). Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 52, 163–170.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.03.011>

- Gustafsson, R. (1981). *Blasting technique*. Dynamit Nobel Wien.
- Hansen, T. C. (2004). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. CRC Press, 284.
https://books.google.ee/books?id=z4KM4Xrr6YOC&dq=blasting+mat&redir_esc=y&hl=et
- Hill, W. (2013). Dangers posed to highway 7 by hidden quarry flyrock. William Hill Mining Consultants Ltd. <https://www.crcrockwood.org>
- How to Prevent & Control Flyrock | Blast Control Solutions. (2021, January 27). T.M. International. <https://www.tmi2001.com/blog/preventing-controlling-flyrock/>
- Ideal supply, INC. (2015). "Wire Rope Blasting Mat. INC. <https://www.idealblasting.com>
- Incidents like Cape Ray blasting mishap deemed rare. (2015). CBC News. <https://www.cbc.ca>
- Keskkonnaamet. (2016, December 16). Välisõhus leviv müra.
<https://www.keskkonnaamet.ee/et/Eesmargid-Tegevused/Valisohukaitse/Valisohus-Leviv-Mura>.
<https://www.keskkonnaamet.ee/et/eesmargid-tegevused/valisohukaitse/valisohus-leviv-mura>
- Konya, C. J. & National Highway Institute (U.S.). (2008). *Rock Blasting and Overbreak Control*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute.
- Kübar, R. (2004). *Paekivi kasutus ja omadused Eestis*.
http://www.ene.ttu.ee/maeinstituut/loput/kybar_paekivi.pdf
- Lopez, C., & Lopez, E. (1995). *drilling and blasting of rocks*. A. A. Balkema.
- Majandus- ja kommunikatsiooniminister. (2005). Lõhketöö projektile esitatavad nõuded. Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/907012>
- Majandusministeerium. (2001). Lõhkematerjali valmistamise, hoidmise ja kasutamise tehniline eeskiri. Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/26683>
- Mander, Ü., & Liiber, Ü. (2014). *Üldmaateadus*. Tartu Ülikool.
- Marist, I. (2020, October 14). <https://www.facebook.com/ivar.marist/videos> [Facebook videos]. Facebook. <https://www.facebook.com/ivar.marist/videos>
- Mathiak, H. A. & Wisconsin. Conservation Department. (1965). *Pothole Blasting for Wildlife*. Wisconsin Conservation Department.
- Nabala*. (2021). Eesti Geoloogia Selts. <https://www.egeos.ee/egeos/nabala/>
- Olofsson, S. O. (2002). *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. APPLEX.

- Raina, A. K., Murthy, V. M. S. R., & Soni, A. K. (2014). Flyrock in bench blasting: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(4), 1199–1209. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0588-6>
- Raukas, A., & Tavast, E. (1982). Рельеф коренных пород Эстонии. Valgus.
- Raukas, A., & Teedumäe, A. (1997). *Geology and Mineral Resource of Estonia*. <https://geoloogia.info/geology/index.html>
- Researchers using drones to detect noxious gas released by explosions. (2020, April 24). [Photograph]. <https://www.rit.edu/news/researchers-using-drones-detect-noxious-gas-released-explosions>
- Rezaei, M., Monjezi, M., & Yazdian Varjani, A. (2011). Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining. *Safety Science*, 49(2), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.004>
- Rosenthal, M. F., Morlock, G. L., & United States. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement. (1987). *Blasting Guidance Manual*. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, U.S. Department of the Interior.
- Tomberg, T. (2020, January). Ekspertarvamus lõhketööde ohuala määramisest purustatud materjali tükkide/kildude laialipaiskumise järgi. Geoloogia Instituut.
- Tomberg, T., & Veersalu, K. (2017). LÕHKETÖÖD I. Tallinna Tehnikaülikool. https://www.taltech.ee/public/g/Geoloogia_instituut/Oppematerjal/LOHKETOOD_LOENGUKONSPEKT.pdf
- Vuolio, R. (1990). *Blast Vibration: Threshold Values and Vibration Control*. The Finnish Academy of Technology.
- Zhang, Z. Z. (2016). *Rock Fracture and Rock Strength*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bedding-plane>

Lisa 1. Arvutused erinevate lõhkeaine erikuludega

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	70	71	72	74	76

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	62	62	64	66	68	73	74	76	78	81	83

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	79	80	81	83	85	89	91

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
F	89	90	91	93	95	100	102	104	106

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
F	85	86	87	89	91

Sümbo lid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
F	77	78	79	81	83	90	91	92	94	96	99

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
F	94	95	96	98	100	104	106

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
F	104	105	106	108	110	116	117	119	121

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
F	101	101	103	105	107

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
F	92	93	94	96	98	103	105	107	108	112	114

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
F	110	110	112	114	116	123	123

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
F	120	120	122	124	126	133	133	135	137

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
F	116	116	118	120	122

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
F	107	108	109	111	113	120	121	122	124	126	129

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
F	125	126	127	129	131	138	139

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
F	135	135	137	139	141	148	149	150	152

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	131	132	133	135	137

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	122	123	124	126	128	135	136	138	139	141	144

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	140	141	142	144	146	153	154

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
F	150	151	152	154	156	163	164	165	167

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
F	146	147	148	150	152

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
F	138	138	140	142	144	151	151	153	155	157	159

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
F	155	156	157	159	161	166	168

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
F	165	166	167	169	171	176	178	180	182

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
F	161	162	163	165	167

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
F	153	153	155	157	159	166	167	168	170	172	174

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
F	170	171	172	174	176	182	183

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
F	180	181	182	184	186	192	193	195	197

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
F	177	177	179	181	183

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
F	168	169	170	172	174	181	182	183	185	187	190

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
F	186	186	188	190	192	195	197

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	2	3	4	5	6	2	3	4	5
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
F	180	181	182	184	186	180	181	182	184

Sümbolid	d=64 mm				
B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
S	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
K	2	3	4	5	6
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	192	192	194	196	198

Sümbolid	d=76 mm										
B	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
S	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
K	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,6	1,5	1,6
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	183	184	185	187	189	194	196	198	200	203	205

Sümbolid	d=89 mm						
B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
S	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
K	6	7	8	9	10	11	12
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	201	201	203	205	207	212	213

Sümbolid	d=102 mm								
B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
K	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
T	0,9	1,2	1,4	1,5	1,6	0,9	1,2	1,4	1,5
Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
D	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Pf	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
F	211	211	213	215	217	224	225	226	228

Lisa 2. Arvutused reaalseste karjääride andmete põhjal

Reaalne karjäär A

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=64 mm ; q = 0,5 kg/m ²										d=89 mm ; q = 0,5 kg/m ²											
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	1,8	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Laengusamm reas (m)	S	2,34	2,34	2,34	2,34	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	1,5	2	2,5	3	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	0,96	0,96	0,96	0,96	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	104	105	106	108	106	107	108	109	111	112	113	115	116	117	105	107	108	109	111	112	113	113

Reaalne karjäär B

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=64 mm		d=76 mm			d=89 mm	
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	1,5	3,5	2,1	2,1	2,1	2,5	2,5
	Laengusamm reas (m)	S	1,8	4	2,8	2,8	2,8	3,25	3,25
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	1,5	18	2,5	6	11,5	6	11,5
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,061	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	1	3	1,15	1,15	1,15	1,35	1,35
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	175,5	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,78	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,4	0,65	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	68	184	108	117	131	115	129

Reaalne karjäär C

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=89 mm				d= 76			
			Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	2,6	2,6	2,6	2,6	2,3
	Laengusamm reas (m)	S	3,1	3,1	3,1	3,1	2,5	2,5	2,5	2,5
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	3,7	4,2	4,7	5,2	3,7	4,2	4,7	5,2
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	1,4	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,4
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	145	147	147	148	140	140	141	142

Reaalne karjäär D

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=95 mm					
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
	Laengusamm reas (m)	S	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	146	148	148	150	151	152

Reaalne karjäär E

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=95						
			mm						
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
	Laengusamm reas (m)	S	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	3,7	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	150	151	151	153	154	155	157

Reaalne karjäär F

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=95			
			mm			
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	3	3	3	3
	Laengusamm reas (m)	S	3,2	3,2	3,2	3,2
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	7,8	8,3	8,8	9,3
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	1,5	1,7	1,8	1,8
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,55	0,55	0,55	0,55
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paiskumiskaugus (m)	F	113	113	114	115

Reaalne karjäär G

Andmed	Parameetrid	Sümbolid	d=76			
			mm			
Sisendid	Vähima vastupanujoone pikkus (m)	B	2,5	2,5	2,5	2,5
	Laengusamm reas (m)	S	2,7	2,7	2,7	2,7
	Lõhkeaugu sügavus (m)	K	7,8	8,3	8,8	9,3
	Puurtööde erimaht (m/m ³)	SD	0,019	0,019	0,019	0,019
	Topise pikkus (m)	T	2	2,1	2,1	2,2
	koormus viitele (kg/ms)	Cpd	14,7	14,7	14,7	14,7
	Kivimi mahumass (g/cm ³)	D	2,75	2,75	2,75	2,75
	Lõhkeaine erikulu (kg/ton)	Pf	0,55	0,55	0,55	0,55
Väljundid	Maksimaalne kivimikillu paikumiskaugus (m)	F	113	114	115	116