

18.Lõhketööde mõjust kaubapõlevkivi klassi 0...30 mm väljatulekule

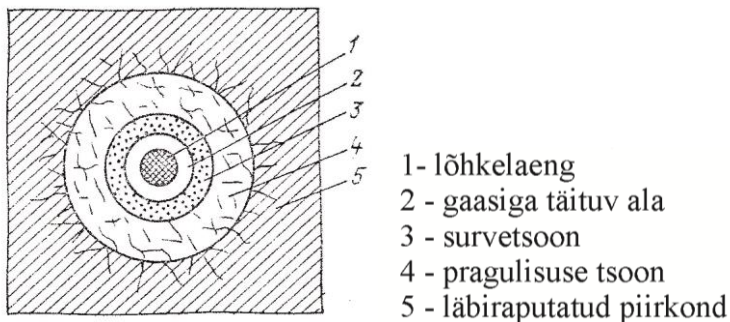
Enn Lüütre, Enno Reinsalu, Martin Saarnak

Kivimites toimuvad protsessid lõhkamisel ei ole siiani üheselt selged. Teooriad ja arvutusvalemid annavad mõningad suunitlused, kuid konkreetsetel juhtudel tuleb paljuski tugineda olemasolevale praktikale ja kasutada sobivate lõhketööde passide koostamisel katselõhkamisi [6]. Kivimid iseenesest kujutavad materjali, mille määratlemine paljude omaduste kaudu ei ole ühene [9]. Lõhketööde projekteerimine erinevate omadustega kihilises maardlas nagu seda on eesti põlevkivimaardla on eriti komplitseeritud [7, 10]. Probleemi teevad keerulisemaks lõhketöödele esitatavad erinevad nõuded: lõhkeaine erikulu vähendamine, müra ja tolm [1]

Sesmilise mõju piiramine, lõhatud materjali sobiv tükisuurus laadimiseks jne. Käesolevas töös vaadeldakse võimalusi vähendada peenese osakaalu lõhatud materjalis ja sellega suurendada tükikivi väljatulekut allmaakaevandamisel [8].

Kivimi purunemine lõhkamisel

Mittesoovitud klassi 0...30 mm osatähtsus lõhatud materjalis on ligikaudu 30%. Püüame selgitada, kus ja miks see materjal lõhketööde käigus tekkib. Selleks vaatleme alusuuringuid, mis käsitlevad silindrilise lõhkelaengu plahvatuse mõju kivimis. Lõhkeaugus oleva lõhkeaine plahvatus mõjutab ümbritsevat kivimit tekkinud gaasidega, lööklainega ja pingelainega. Lõhkelaengu ümber toimuvat iseloomustavad purunemisprotsessid (Joonis 18-1).

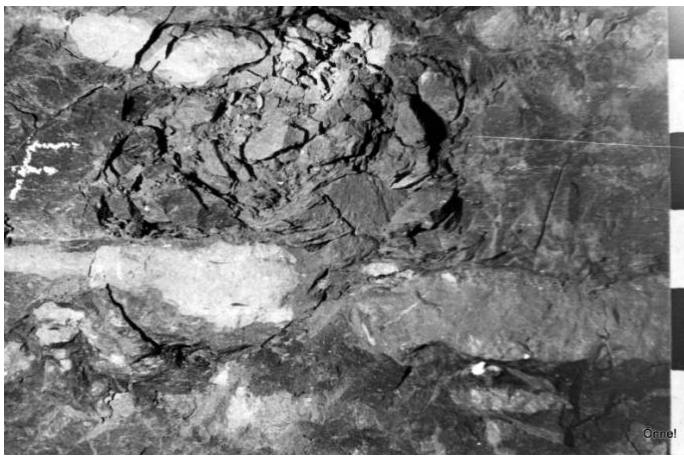


Joonis 18-1. Lõhkeaugu ümber toimuv protsess [13]

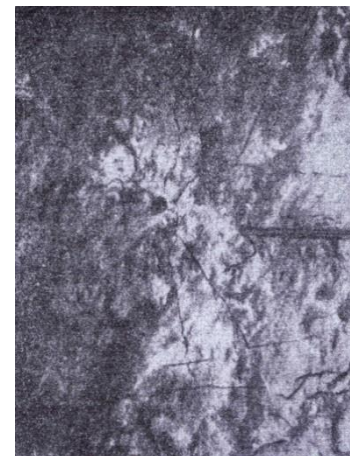
Lööklaine levides ülehelikiirusega (1,1-1,3 helikiirusest kivimis) kutsub kivimis esile deformatsioonid ja pinged, mis on suuremad kivimi tugevusest ja purustab (peenestab) materjali lõhkeaugu lähispiirkonnas. Survetsoonis toimunud purustused on nähtavad

joonistel (Joonis 18-2, Joonis 18-3). Selles piirkonnas realiseerub suur osa plahvatuse energiast. Ära kasutatud energia suurus sõltub kivimi füüsikalise-mehaanilistest omadustest: eelkõige kivimi akustilisest jäikusest (impedantsist) ja on suuruses 40-60% [13]. Reinsalu 1968 tehtud uuringus [11] hindab lõhkelaengu plahvatamisel põlevkivis plahvatuse energia realiseerumist survetsoonis 70%-le.

Survetsoonis toimuva purustusprotsessi kestvus on 3-8 msek ja survetsooni raadius 1-7 laengu diameetrit [15]. Uuringutes [11] on mõeldud (Joonis 18-2) survetsooni läbimõõt põlevkivis (akustiline jäikus $4,5 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{sek}$), ligikaudu 25cm. Eesti põlevkivimaardla C/D paekivi akustiline jäikus on ligikaudu $10 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{sek}$) ja survetsooni diameeter peaks olema ligikaudu 15cm.

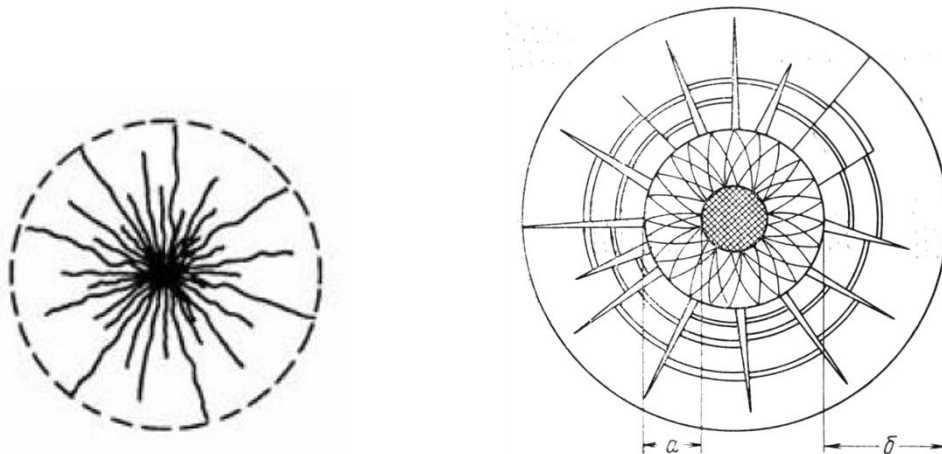


Joonis 18-2 Purustused survetsoonis massiivis. Mõõtelati jaotus (paremal servas) 5 cm. [11]



Joonis 18-3 Radiaallõhede tekkimine [2]

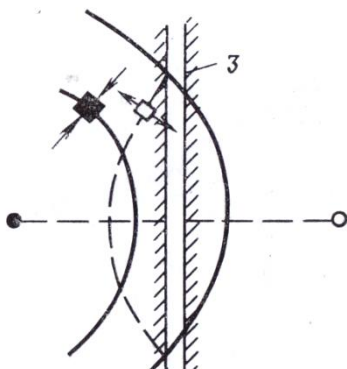
Survetsooni piiril lööklaine muutub elastseks laineks, mis jätkab liikumist kivimis heli kiirusega [3]. Surutud tsoonist edasi on pragulisuse tsoon (Joonis 18-3, Joonis 18-4). Pragulisuse tsoonis ei ole kivim peenestatud, vaid esinevad üksikud (harilikult 6-8 tk) radiaalsed praod, mis on tekkinud tõmbepingete tulemusel materjalis. Tõmbepingete põhjustajaks on plahvatusel eralduvad gaasid, mis sunnivad kivimit laienema ja kutsuvad esile radiaalsuunaga risti suunatud tangentsiaalpinged, mis ületavad kivimi tõmbetugevuse. Pragude pikkus on 20-50 laengu diameetrit ja ligikaudu võrdeline lõhkeaugu läbimõõduga [2]. Eesti põlevkivikaevandustes on pragude pikkus 1-2 meetrit ja põlevkivilasundi kihilise ehituse tõttu mitte nii selgelt märgatav. Pragulise tsooni moodustumine toimub ligikaudu 100 msek jooksul. Kahe purunemise faasi eristamiseks piisab 25 millisekundist. Pärast lõhkegaaside surve langust lõhkelaengust survejõudude mõjul eemaldunud kivim hakkab liikuma tagasi. Tekkivad radiaalsuunalised tõmbepinged, mis purustavad kivimit tekitades ringikujulisi pragusid laengu ümber.



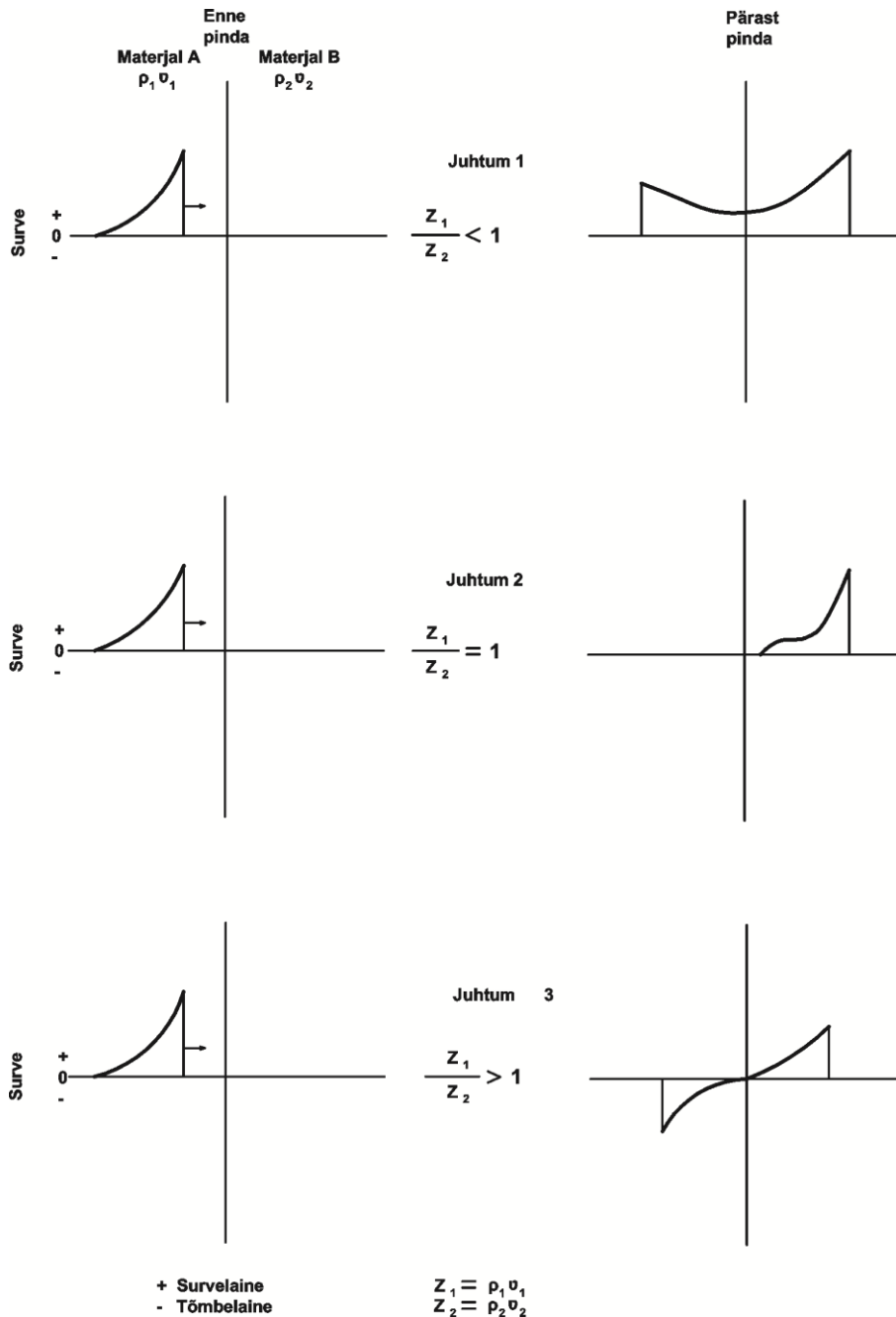
Joonis 18-4 Pragude süsteem lõhkeaugu ümbruses.

Lõhkeaugust edasi on läbiraputatud tsoon (nimetatakse ka mittereguleeritavaks tsooniks), kus toimub kivimi osaline purunemine looduslike pragude toel. Esimesena lõhatavate lõhkeaukude ümbruses on kivimi purunemine täielikum kui järgmiste ümbruses. Järgmised plahvatused toimuvad juba läbiraputatud kivimis ja purustus (peenese tekkimine) peaks olema väiksem. Naaberlõhkeaukude plahvatuste ajaline vahe peaks olema vähemalt 100 msekundit.

Lõhkelaengu plahvatusel tekib surveaine, mille leviku kiirus sõltub materjalist. Kui surveaine läheb ühest keskkonnast teise, võib tekib surveaine peegeldus (Joonis 18-6). Keskkonna akustiline jäikus on märgitud tähisega Z (Joonis 18-6). Kui surveaine kohtub tihedamat keskkonda (näiteks põlevkivist paasi minekul) läbib osa energiast surveainena eralduspiiri, osa peegeldub surveainena tagasi. Kui surveaine kohtub hõredamat keskkonda, läbib osa energiast surveainena eralduspiiri ja osa peegeldub tagasi tõmbepinge lainena [6]. See tähendab, et juhul kui lõhkelaeng on vaba pinna lähedal „koorib“ see vaba pinda, tekitades täiendavalt peenest. Peenese tekkimisel on oluline roll pragudel. Kui kivimis oleva prao laius on rohkem kui 1mm, tuleb seda käsitleda kui vaba pinda, millelt peegelduv laine tekitab kivimis tõmbepingeid, mis täiendavalt peenestavad kivimit enne kui kivim jõuab „paugu“ mõjul liikuma hakata (Joonis 18-5).



Joonis 18-5 Pingelained praod piirkonnas



Joonis 18-6 Pingelaine levimine ühest keskkonnast teise

Kuna plahvatuse mõju kandub edasi lainena, siis toimuvad ka laine peegeldused ja murdumised kui keskkonna tihedus muutub. Peegelduvad pingelained mängivad rolli kaljustes kivimites, millede akustiline jäikus on suurem kui $15.10 \cdot 6 \text{ kg/m}^2\text{sek}$ [13]. See arvvaartus ei tähista mingit absoluutset piiri. Eesti põlevkivimaardla paekihtide akustiline jäikus on mõningal määral sellest väiksem, kuid uurimustes [4] on tuvastatud, et energiat kandev laine osaliselt peegeldub paekihtide pinnalt ja tekitab põlevkivi peenese põlevkivi ja

pae kihtide kokkupuutepinnal (Joonis 18-2 ja Joonis 18-7). Kui laeng lõhata paekihis põlevkivi peenest kihtide kontaktpinnal ei tekiks.



Joonis 18-7 Põlevkivi peenese tekkimine kihtide kokkupuutepinnal

Massiivis on kivimid ruumilises pingeolukorras [14, 12]. Kaeveõõne kontuurimisel lõhkamisega tekitatakse vaba pind ja massiivist tulev survepingelaine peegeldub osaliselt massiivi tagasi tõmbepinge lainena ja täiendavalt „koorib“ kaeveõõne pinda tekitades peenest [4]. Eesti põlevkivikaevandused ei ole eriti sügavad ja pinged massiivis on väikesed. Igal juhul tasuks probleemi uurida.

Tükikivi tootmisel lõhketöödega on probleemiks kivimi kahjustamine mikropragude näol. Kahjustamist saab vähendada vähem brisantsel lõhkeaine kasutamisel. Lõhkeaine brisantsus peaks olema niisugune, et ei tekiks ülehelikiirusega levivat lööklainet, mis on peenese tekitajaks lõhkelaengu ümbruses. Teiseks võimaluseks on vahekihi moodustamine lõhkeaine ja lõhkeaugu seina vahele. Sellist meetodit kasutatakse Põhjamaades karjäärides tüükikivi tootmisel.

Mitme lähestikku asuva lõhkelaengu üheaegsel lõhkamisel kivimis tekib kumulatiivne efekt, mis kutsub esile täiendavaid purunemisi ja peenese tekke. Kui lõhata laengud ükshaaval, siis punktis A purunemist ei teki. Kui aga punkti A jõuavad üheaegselt kaks pingelainet, siis võib tekkinud pinge ületada kivimi tugevuse. Tegemist on pingelainete indifferentsiga. Seda peaks arvestama puur-lõhketööde passide koostamisel. Kui soovime vähendada klassi 0...30 mm väljatulekut ei tohiks lähilaenguid lõhata üheaegselt.

Sageli kasutatakse lühiviitlõhkamist. Sellega vähendatakse lõhketööde seismilist efekti, kuid sellel on ka oluline mõju kivimite purunemisele lõhkamisel [16]. Põhiliseks mõjuriks on ajaline intervall naaberlaengute lõhkamisel. Sellest olenevalt võib efekt olla määratud kolme faktoriga: lähilaengute pingelainete indifferents (väike intervall), täiendavate vabade pindade moodustumine (keskmine intervall), lähilaengute lõhkamisel tekkinud kivimitükkide põrkumine (suur intervall).

Sooritatud katselõhkamiste analüüs

Meie käsutuses olid andmed 16 katselõhkamise kohta, kus katsetuste protokollides on fikseeritud lõhkeaine kulu, lõhatud mäemassi kogus, lõhkeaukude arv, mäemassis sisalduva klassi 0...30 mm saagis ja selle kütvus ning katselõhkamise kirjeldus. Protokollides on antud ka lõhkeaine erikulu, mis arvatavasti vastab lõhkamise passile. Kuna väljatoodava mäemassi maht ei ole kunagi võrdne passis eeldatavaga arvutati tegelik lõhkeaine erikulu valemiga

$$q = \frac{Qk}{M} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Q – lõhkeaine kulu, kg

M – mäemassi kogus, t

k – mäemassi mahumass, t/m³ (Ojamaa geoloogilistel andmetel 1,7 t/m³) [17]

Katselõhkamiste andmed on esitatud Tabel 18-1.

Tabel 18-1 Katselõhkamised

Proovi nr.	Kuupäev	Kirjeldus	LA, kg	LA erikulu passis, kg	Laengute arv	Lõhatud materjal, t	0...30, %	LA erikulu arvutatud, kg	0...30, % korrigeeritud	Kütvus MJ/kg
29	9.07.2012	algmurre	20,4	0,655	23	58	30,1	0,598		
44-1	22.08.2012	algmurre	20,4	0,655	23	49	30,6	0,708		11,422
44-2	23.08.2012	6*280	21,6	0,521	21	69,7	29,3	0,527	25,9	11,321
38	1.08.2012	soonur	20,4	0,614	23	67,8	35,6	0,512	31,6	12,295
39	7.08.2012	soonur	17,4	0,493	16	66,1	34,5	0,448	30,5	12,003
41	14.08.2012	soonur	16,8	0,467	17	69,4	33	0,412	29	12,076
42	18.08.2012	soonur	15,6	0,436	13	68,8	30,5	0,385	26,5	
40	11.08.2012	soonur	17,4	0,391	16	47,2	32,3	0,627	28,3	
45	24.08.2012	3*280 AV	24		25	68,1	30,5	0,599	29,1	11,901
46	3.09.2012	3*280AV	22,8		23	64,8	34,9	0,598	33,5	11,297
47	4.09.2012	3*280 AV	22,8		23	70,9	28,8	0,547	27,4	10,951
48	5.09.2012	3*280 AV	21,6		23	68,4	27,3	0,537	25,9	10,951
34	26.07.2012	3*280	22,3	549	23	64,7	25,1	0,586	23,7	11,227
49	7.09.2012	3*280AV	22,8		25	46,5	32	0,834	30,6	10,862
30	11.07.2012	läbindus				43,8	28,5	0,000	29,1	
32	19.07.2012	3*280		0,563	23	70,3	29,5	0,000	28,1	

Analüüsi eesmärgiks on selgitada klassi 0...30 mm päritolu ja selle tekkimist soodustavad tegurid.

Katsete väikese arv ja väga mitme mõjuri (lõhkeaine erikulu, soonimine, lõhkeaukude arv ja asetus, erinevad kambriblokid) olemasolul ei võimalda kasutada faktoriaalanalüüsi. Seega on ainult võimalik üsna ebakindel eksperthinnang.

Klass 0...30 mm tekkib soonimisel ja algmurdeaukude puurimisel. Arvutus näitab, et 0,15m kõrguse soone puhul kui lõhketööde nihe on 2m, moodustab soonest väljatulev materjal ligikaudu 4% kogu lõhatud materjali massist ja kolme 0,28m läbimõõduga algmurdeaugu puhul 1,4%. Klassi 0...30 mm saagis on põhjustatud lõhkamisest (Tabel 18-1). Klassi 0...30 mm saagise veerg on saadud mehaaniliselt tekitatud peenese mahaarvamisel üldisest peenese väljatulekust.

Edasisel analüüsil jätame kõrvale katselõhkamised numbrid 29,30,32 kuna mõõdeti klassi 0...40 mm väljatulekut. Katselõhkamisel 44-1 ei olnud materjali kaalumise protokollil andmetel kontrolli all; katselõhkamine 49 ebaõnnestus (edasinihe ainult 1,15m); katselõhkamine 44-2 on ainus omataoline(6 algmurdeauku).

Täpsemaks analüüsiks sobib 10 katselõhkamist. Nendest 5 on soonitud eega ja 5 puhul on kasutatud kolme 280 mm diameetriga algmurdeauku.

	Soonur	3*280 mm	6*280 mm
Keskmine lõhkeaine erikulu, kg/m ³	0,48	0,57	0,52
Keskmine klassi 0...30 saaagis, %	33,2	30,7	29,3
Keskmine klassi 0...30 saagis korrigeer. %, 29,2		27,9	25,9

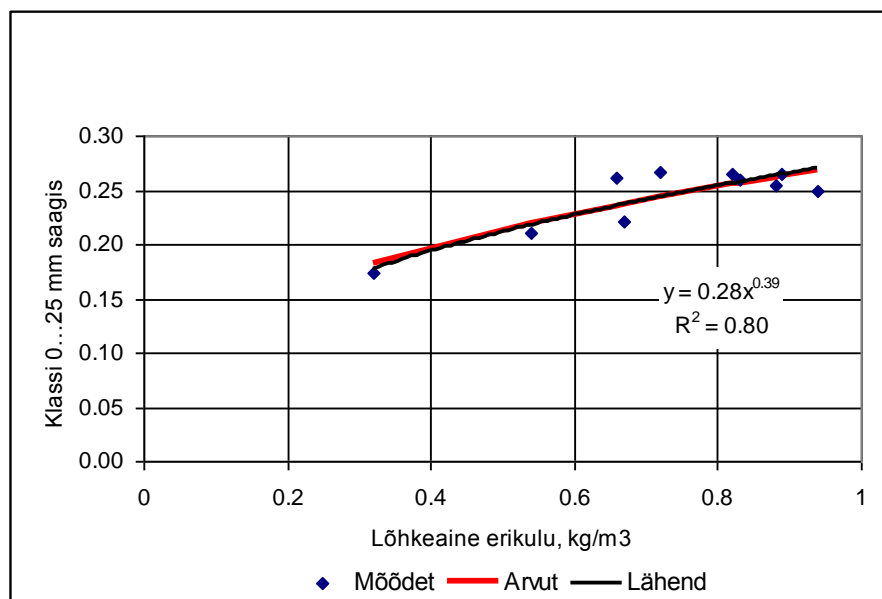
Siit nähtub, et soonuri kasutamisel lõhkeaine erikulu on ligikaudu 100g/m³ väiksem võrreldes

3*280 mm algmurdega. Samal ajal on soonuri kasutamisel tekkiva peenese väljatulek suurem. Kui elimineerime mehaaniliselt tekitatud peenese on soonuri kasutamisel klassi 0...30 mm saagis võrreldes algmurdeaukudega ikkagi 1,3 protsendipunkti suurem ja seda märkimisväärselt väiksema lõhkeaine erikulu juures. Võib oletada, et mõjub teoorias kirjeldatud vaba pinna „koorimise“ efekt pingelaine peegeldumisel. Katselõhkamistel on vaba pinda ligikaudu 7*2=14m²; 3 algmurdeaugu puhul on tinglik vaba pind ligikaudu 5m². Ilmneb, et tekitatud vaba pind on 7m laiuse ee puhul 3 korda suurem. Siit nähtub, et lõhkeaine erikulu peabki algmurde aukude kasutamisel olema suurem.

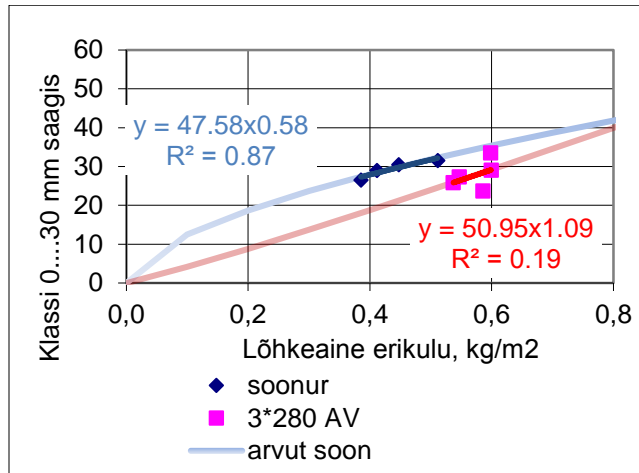
Mingeid põhjanevaid kvantitatiivseid järeldusi ei lõhkeaine erikulu ega peenese väljatuleku kohta siit esialgu teha ei ole võimalik.

Vaatleme kuidas klassi 0...30 mm saagis sõltub lõhkeaine erikulust (Joonis 18-8). Saagise sõltuvust peaks vaatlema muude võrdsete tingimuste korral. Seega tuleb katselõhkamiste tulemused jagada kahte gruppi: soonuriga katselõhkamised ja 3 algmurde auguga lõhkamised. Lõhkeaukude arvu erinevuse mõju ei tohiks olla väga suur.

Mõlema katselõhkamiste grupi puhul lõhkeaine erikulu vähenemisel 100g/m³ klassi 0...30 mm saagikus väheneb umbes 2,5 protsendipunkti (Joonis 18-8). Kuna puudub teoreetiline alus ei tohi tulemust laialdaselt ekstrapoleerida. Võrdluseks on toodud E. Reinsalu poolt 1966-1968 a. Ahtme kaevanduses tehtud põhjaliku katsetöö tulemus (Joonis 18-9) klassi 0...25 mm saagikuse kohta lõhketöödel. Nähtub, et lõhkeaine erikulu vähenemisel 100g/m² vähenes peenese saagikus umbes 1,5 protsendipunkti.



Joonis 18-8 Klassi 0...30 mm saagis (Ojamaal)



Joonis 18-9 Klassi 0...25 mm saagis (Ahtmes)

Püüame hinnata peenese kogust, mis tekitab lõhkeaukude ümbrusest purustustsoonist. Erinevate autorite hinnangul ja E. Reinsalu poolt tehtud fotodelt (Joonis 18-2 ja Joonis 18-7) võib hinnata lööklaine poolt tekitatud purustustsooni läbimõõduks põlevkivis 0,25m. Lõhketööde sammu puhul 2m üks lõhkeauk tekitab ligikaudu 0,1m³ peenest. 20 lõhkeauguga lõhketööde passi puhul on purustustsoonist tuleva peenise mass ligikaudu 3 t kogu lõhatud kaevise massi 65 t juures. Seega moodustab lõhkeauke ümbritsevast purustustsoonist tulev peenes ligikaudu 5%. Kuna üldine klassi 0...30 mm väljatulek ilma mehaanilisel teel tekitatud peeneseta on ligikaudu 28%. Tekkib küsimus, kust tekib puuduv 23 protsendipunkti. Kuna erinevate uurijate andmetel realiseerub lõhkeaugu ümbruses surveaine purustustsoonis 50-70% kogu energiast andes $5/28 \cdot 100\% = 18\%$ kogu tekkinud peenesest peab ülejäänud energia mingil efektiivsemal moel tootma ülejäänud 82% tekkinud peenesest. Nähtavasti toimub see tõmbepingete mõjul ja energeetilisest seisukohast vaadates ei saa tekkiv materjal olla väga peen kuna kivimi tolmustamiseks ei jätku enam energiat.

Kokkuvõte

Tehtud katselõhkamised annavad mõningase pildi klassi 0...30mm väljatuleku kohta. Kahjuks jääb tehtud katselõhkamiste arv väikeseks, et teha kindlaid järeldusi. Tehtud katselõhkamised on olnud suunatud soonimise ja algmurde puuraukude mõju väljaselgitamisele klassi 0...30mm väljatulekule. Samal ajal on ilmselt olemas ka teisi võimalusi peenese vähendamisele lõhkamisel [18]. Kui klassi 0...30mm väljatuleku vähendamine on oluline on vaja teha piisavas mahus katselõhkamisi, et kohtrollida erinevaid mõjureid peenese väljatulekule.

Toome mõningad seisukohad, mis tekkisid käesoleva analüüsi käigus:

1. Ee soonimine lõhkamisel ei ole otstarbekas. See vähendab lõhkeaine erikulu, kuid

- tekib ka täiendav peenes kivimi soonimisel.
2. Kõigi katselõhkamiste passide puhul tuleb järkjärgult vähendada lõhkeaine erikulu kuni võimaliku miinimumini. Lõhkeaine erikulu ja peenese väljatuleku vahel on olemas kindel sõltuvus.
 3. Peenese väljatuleku vähendamiseks on oluline asetada lõhkelaengud võimalikult kaugemale vabadest pindadest.
 4. Otstarbekas on vähendada lõhkeaukude arvu ees ja samas suurendada osade lõhkeaukude läbimõõtu. Iga lõhkeauk on täiendav peenese allikas.
 5. Kuna teooria ütleb, et iga vaba pind on peenese tootja tuleb algmurde augud puurida paekihti. Sellega peenese kütvus väheneb, kuid säästame põlevkivi purustamisest.
 6. Samal põhjusel peaks lõhkeaugud võimaluse korral paigutama paekihti. Pae akustiline jäikus on suurem võrreldes põlevkiviga ja intensiivse purustustsooni läbimõõd lõhkeaugu ümber väheneb. Paest väljuv surveaine peegeldub osaliselt tõmbepingel lainena tagasi purustades paasi, kuid säästes põlevkivi.
 7. Tuleb vältida lähestikku asetsevate lõhkelaengute üheaegset lõhkamist. Tänu pingelainete indifferentsile tekib kumulatiivne efekt, mis toodab k purunemisel peenest.
 8. Võimaluse korral peaks kasutama tuimemat lõhkeainet brisantse purustamise vähendamiseks lõhkeaugu lähispiirkonnaks. Lõhkeaine brisantsuse vähendamiseks lisatakse lõhkeainesse inertset materjali või vahustatakse lõhkeaine.
 9. Brisantse purustuse vähendamiseks lõhkeaugu lähispiirkonnas võiks katsetada lõhkeaine eraldamist lõhkeaugu pinnast.
 10. Kuna peenese vähendamise nõue on vastuolus nõudega saada väikese lõhkeaine kuluga laadimiseks sobiva tükisuurusega materjal tuleb arvestada täiendava tööjõu ja lõhkeaine kuluga

Töö on seotud uuringuga ETP AR12007 nr. 3.2.0501.11-0025 „Põlevkivi kadudeta ja keskkonnasäästlik kaevandamine“ – mi.ttu.ee/etp , B36 Kivimi raimamine ja rikastamine valikmeetoditega - mi.ttu.ee/rikastamine

Viited

1. Anepaio, A. (2012). Kaevandamisega kaasnev tolm. Kaevandamine ja keskkond (153 - 156). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut
2. Dessurealt, S. 415-Rock Excavation, University of Arizona, 2003.

3. Feldgun, V. R.; Karinski, Y. S.; Yankelevsky, D. Z. The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure. TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY. Volume: 44 lk. 42-55 2014
4. Hoek, E. [Practical Rock Engineering](#), 2007.
5. Mäeinstituudi projektid. <http://mi.ttu.ee/projektid/> Mäeinstituut 2014
6. Mäeinstituudi uuring – [Ojamaa kaevanduse kaubapõlevkivi kvaliteedijuhtimise audit – mi.ttu.ee/teadus](#) 2014
7. Pastarus, J.-R.; Systra, Y.; Valgma, I.; Kolotogina, L.; Anepaio, A.; Vannus, A.; Nurme, M. (2013). Surface mining technology in the zones of tectonic disturbances, Estonian oil shale deposit. Oil Shale, 30(2S), 326 - 335.
8. Pastarus, J.-R.; Reinsalu, E.; Saarnak, M. (2014). Modelling of oil shale concentration processes in Estonian mines. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1 - 13.
9. Reinsalu, E.; Anepaio, A.; Lüütre, E.; Roots, R.; Saarnak, M.; Väizene, V.; Karu, V. (2014). Nõrkade kihiliste kivimite tugevusomadused. Mäenduse strateegiline planeerimine (36 - 65). Rakvere, Eesti: Eesti mäeselts
10. Reinsalu, Enno. Maapõue tektooniline rikutus mäemehe vaatevinklist. Bülletään / Eesti Geoloogia Selts, 48 - 53. 2002
11. Reinsalu, E. Study of heterogeneous rock blast-breaking process for increase trade oil shale quality in Estonian mines, Leningrad Mining Institute Doctoral diss, in russian.
12. Ring, M.; Noška, M.; Soosalu, H.; Iskül, R.; Valgma, I. Mine blasts in Estonia - a multidisciplinary study using seismology and mining engineering. Tallinn: Institute of Seismology, University of Helsinki, 2012
13. Rževski, V. Osnovõ fiziki gornõh porod. Moskva, Nedra, 1984.
14. Soosalu, H.; Valgma, I. Kuidas puudutab seismoloogia kaevandamist? Mäenduse maine (80 - 87). Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 2009
15. Talobre, J. La mecanique des roches appliquee aux travaux publics. Paris, 1954.
16. Tomberg, T.; Toomik, A. (1998). Lõhkamise seismiline mõju põlevkivi kaevandamisel. 60 aastat mäeinseneride õpetamist Eestis : aastapäevakonverentsi ettekannete teesid ja artiklid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut, 1998, 33 - 38.
17. Tomberg, T. Lõhketööd, Tallinn, 1998.
18. Wu, Zhijun; Fan, Lifeng. The numerical manifold method for elastic wave propagation in rock with time-dependent absorbing boundary conditions. ENGINEERING ANALYSIS WITH BOUNDARY ELEMENTS Volume: 46 lk. 41-50. 2014