

Miniranje kao postupak eksploatacije sirovine za proizvodnju cementa u kamenolomu Koromačno

Brnelić, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:875746>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**MINIRANJE KAO POSTUPAK EKSPLOATACIJE SIROVINE ZA
PROIZVODNJU CEMENTA U KAMENOLOMU KOROMAČNO**

Diplomski rad

Karlo Brnelić

R-213

Zagreb, siječanj, 2020.

Miniranje kao postupak eksploatacije sirovine za proizvodnju cementa u kamenolomu
Koromačno

Karlo Brnelić

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Eksploatacijsko polje „Koromačno“ u vlasništvu je tvrtke Holcim (Hrvatska) d.o.o. koja je dio švicarsko francuske grupacije LafargeHolcim specijalizirane za proizvodnju građevinskog materijala. U ovom radu biti će prikazana proizvodnja klinkera kao osnove za proizvodnju cementa u proizvodnom pogonu u naselju Koromačno. Fokus je stavljen na eksploataciju mineralne sirovine miniranjem i izradom odgovarajućeg elaborata. Bit će prikazano terensko mjerenje seizmičkog utjecaja koje ćemo usporediti s teorijskim proračunima različitih autora. U radu je prikazan detaljan postupak pripreme i oplemenjivanja mineralne sirovine kroz različite faze proizvodnje cementa uz prikaze modula omjera glavnih oksida sa svrhom kontrole kvalitete gotovog proizvoda.

Ključne riječi: miniranje, seizmički utjecaj, brzina oscilacija, cement, Holcim

Završni rad sadrži: 52 stranice, 5 tablica, 26 slika i 14 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad je pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, Docent RGNF

Dr. sc. Mario Dobrilović, Izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Vječislav Bohanek, Docent RGNF

Datum obrane: 17.siječanj.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Blasting as a procedure of ore exploitation for cement production in the Koromačno quarry

Karlo Brnelić

Thesis completed at: University of Zagreb Faculty of Mining,
Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

"Koromačno" exploitation field is owned by Holcim (Croatia) d.o.o which is part of the Swiss-French LafargeHolcim group specialized in construction material production. In this thesis the production of clinker as a basis for cement production in the Koromačno town production plant will be shown. The focus is put on exploitation of mineral ore by blasting and making the appropriate survey. A field measurement of seismic effect will be shown which we will compare with theoretical calculations by different authors. In the thesis we show a detailed procedure of preparation and enrichment of mineral ore through different phases of cement production while giving the ratio moduli of the main oxides with the purpose of controlling the quality of the final product.

Keywords: blasting, seismic effect, oscillation velocity, cement, Holcim

Thesis contains: 52 pages, 5 tables, 26 figures and 14 references.

Original in: Croatian

Thesis is deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Reviewers: Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD

Date of defense: January 17, 2020., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
University of Zagreb

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Općenito o eksploatacijskom polju.....	2
2.1 Geološke značajke	2
2.2 Trenutno stanje rudarskih radova	6
3. Planiranje polja	8
4. Bušenje	14
5. Miniranje	16
6. Zaštita na radu	19
6.1 Zaštitna oprema	20
6.2 Zaštita kod miniranja	20
7. Seizmički utjecaj miniranja	23
7.1 Seizmički valovi	23
7.2 Terenska mjerenja.....	31
8. Proizvodnja cementa.....	40
8.1. Proizvodnja cementa u postrojenju Koromačno.....	40
8.2. Proizvodnja specifičnih vrsta cementa	46
9. Zaključak	50
10. Literatura	51

Popis slika

Slika 2-1 Geološka karta eksploatacijskog polja „Koromačno “ s pripadajućim tumačem ..	3
Slika 2-2 Situacija ležišta „Koromačno“ s rasporedom litoloških članova	5
Slika 2-3 Grašo i Magro na etaži	6
Slika 2-4 Skica završne konture kopa.....	7
Slika 3-1 Plan bušenja s usporenjima minskih bušotina	10
Slika 3-2 Skica punjenja minske bušotina	13
Slika 4-2 Uređaj za prikupljanje uzoraka	15
Slika 5-1 Udarne patrona - Emulex 1 eksploziv	17
Slika 5-2 ANFO eksploziv i provjera visine punjenja.....	18
Slika 5-3 Sklonište za palitelja mina i mjerenje otpora	18
Slika 7-1 Seizmički valovi.....	25
Slika 7-2 Teoretski seizmogram	26
Slika 7-3 Dijagram za određivanje pomaka	28
Slika 7-4 Postavljeni geofon na mjestu opažanja broj 2.....	32
Slika 7-5 Dijagram graničnih vrijednosti brzine vibracija u ovisnosti o frekvenciji vala ...	34
Slika 7-6 Izvještaj seizmičkog mjerenja 28.06.2018.	36
Slika 7-7 Izvještaj seizmičkog mjerenja 12.07.2019.	37
Slika 7-8 Dijagram predviđenih brzina oscilacija tla	38
Slika 8-1 Drobilica	41
Slika 8-2 Transportna traka s deponijom.....	41
Slika 8-3 Dozator.....	42
Slika 8-4 Mlin sirovine	42
Slika 8-5 Izmjenjivači topline.....	43
Slika 8-6 Rotaciona peć	44
Slika 8-7 Silos klinkera	45
Slika 8-8 Procesni dijagram toka	49

Popis tablica

Tablica 3-1 Plan bušenja.....	9
Tablica 3-2 Planirana potrošnja eksploziva.....	12
Tablica 7-1 Stupnjevi potresa - Medvedev.....	31
Tablica 7-2 Tehničke i mjerne značajke seizmografa Instantel	32
Tablica 7-3 Razredi objekata s dozvoljenim brzinama oscilacija	33

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
α_g	generalni kut nagiba kosine	°
α_e	kut nagiba etaže	°
I_1	dužina projekcije bušotine zbog nagiba same bušotine	m
H	razlika između kote vrha i kote dna bušotine	m
α	kut nagiba bušotine	°
I_2	dužina projekcije bušotine zbog smjernog kuta bušotine	m
β	smjerni kut bušotine	°
l	stvarna dužina bušotine	m
w	izbojnica	m
a	razmak bušotina	m
d	promjer bušotina	m
l_p	dubina probušnja	m
$Q_{s(ANFO)}$	specifična potrošnja ANFO eksloziva po metru bušotine	kg/m'
ρ_{ANFO}	gustoća ANFO eksploziva	kg/m ³
$Q_{s(patn)}$	specifični utrošak patroniranog eksploziva	kg/m'
Q_{patn}	količina patroniranog eksploziva	kg
$l_{\check{c}}$	dužina čepa	m
h_{eks}	visina stupca eksploziva	m
Q_{rin}	količina rinfuzo eksploziva	kg
Q_{uk}	ukupna količina eksploziva	kg
V	volumen odloma	m ³
m	masa odminiranog materijala	kg
ρ	gustoća materijala	kg/m ³
R_r	maksimalni radijus odbacivanja materijala	m
p	pokazatelj djelovanja eksplozije	-
v	brzina oscilacija	cm/s
ρ_s	svedena količina eksploziva	kg ^{1/3} /m
n	koeficijent prigušivanja seizmičkih valova	-
k	koeficijent načina miniranja	-
Q_{doz}	dozvoljena količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja	kg
SD	svedena udaljenost	m/kg ^{1/2}

1. Uvod

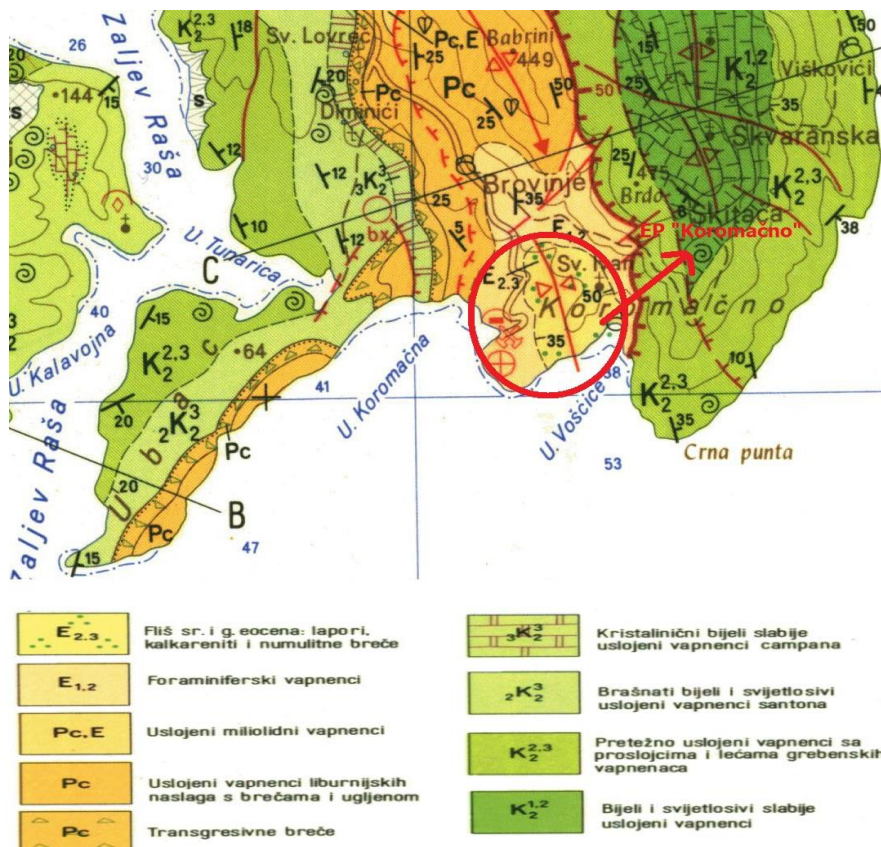
Eksploatacijsko polje „Koromačno“ u vlasništvu je tvrtke Holcim (Hrvatska) d.o.o. koja je dio švicarsko-francuske grupacije LafargeHolcim, grupe profilirane za proizvodnju građevinskog materijala. Grupacija se bavi proizvodnjom cementa, betona i mineralnih agregata vrhunske kvalitete proizvedenih prema najnovijim svjetskim standardima. Postrojenje u Koromačnu specijalizirano je za proizvodnju silikatnog cementa iz vlastitog kamenoloma u samoj blizini tvornice. S obzirom na geološku građu terena potrebno je detaljno isplanirati minsko polje s pripadajućim bušotinama, odrediti plan uzorkovanja te analizu uzoraka kako bi se dobila najbolja moguća mineralna sirovina koja zadovoljava standarde kvalitete za proizvodnju cementa. U diplomskom radu bit će prikazan generalni proces proizvodnje cementa s detaljnim osvrtom na eksploataciju mineralne sirovine miniranjem uz sve pripremne i sigurnosne protokole prema važećoj zakonodavnoj regulativi te dodatnim pravilima same LafargeHolcim grupacije. Rezultati seizmičkih mjerenja bit će potvrđeni s teorijskim načelima nastajanja seizmičkih valova i usporedbom dobivenih rezultata sa stvarnim mjerenjima na terenu.

2. Općenito o eksploatacijskom polju

Eksploatacijsko polje „Koromačno“ smješteno je na jugoistoku Istarskog poluotoka nedaleko istoimenog naselja Koromačno.

2.1 Geološke značajke

Šire područje eksploatacijskog polja “Koromačno” (Slika 2-1) izgrađuju karbonatne stijene gornjokredne starosti te sedimenti paleocena i eocena (liburnijske naslage, foraminiferski vapnenci i fliš). Mineralnu sirovinu za proizvodnju cementa čine foraminiferski vapnenci donjo do srednje eocenske starosti ($E_{1,2}$) te klastične naslage – fliš srednje do gornje eocenske starosti ($E_{2,3}$), među koje spadaju glinoviti vapnenci, razni varijeteti lapora te numulitne i vapnenačke breče. Foraminiferski vapnenci donjeg do srednjeg eocena ($E_{1,2}$) izgrađuju veliki dio paleogenske sinklinale, koja se nalazi i unutar eksploatacijskog polja “Koromačno”. Sjeverno i sjeveroistočno su u kontaktu s liburnijskim naslagama. Na istoku su u anormalnom kontaktu s mladim krednim vapnencima, a na jugu i jugozapadu ulaze u more. Prijelaz iz liburnijskih naslaga u foraminiferske vapnence je postupan. Također je kontinuiran prijelaz unutar foraminiferskih vapnenaca (između miliolidnih, alveolinskih te numulitnih vapnenaca). Foraminiferske vapnence uglavnom izgrađuju smeđe-sivi i smeđi kalkareniti u kojima mjestimično prevladavaju kalciruditski elementi. Sadrže obično između 96 – 97% kalcijeva karbonata (CaCO_3). Vapnene čestice su veličine od 0,09 – 0,14 mm, nepravilnog okruglastog oblika, vezane kalcitnim vezivom. Lapor i su istaloženi konkordantno u odnosu na foraminiferske vapnence. Granica između lapora i vapnenaca nije oštra, već nalazimo prijelazne slojeve, tzv. gomoljaste lapore plavičasto-zelenkaste boje, koja potječe od glaukomima. Oksidacijom na zraku, boja im prelazi u rđavo-sivu. Slojevi gomoljastih lapora debeli su otprilike 2 m, a prema gore postaju sve laporovitiji, dok ne pređu u plavičaste lapore. Vapnenačka komponenta u plavičastim laporima varira po pružanju i po debljini slojeva. Različiti tipovi lapora eocenske starosti, koji čine kvalitetnu mineralnu sirovinu za proizvodnju cementa, izgrađuju jezgru paleogenske sinklinale. S istočne strane lapori i biokalareniti u rasjednom su kontaktu s foraminiferskim vapnencima. Sa zapadne strane pod fliške naslage normalno tonu foraminiferski vapnenci sa smjerom pada prema istoku. U krovini lapora dolazi sitnozrni vapneni pješčenjak, koji štiti lapore od jačeg utjecaja erozije (D. Vrkljan i M. Klanfar, 2010).



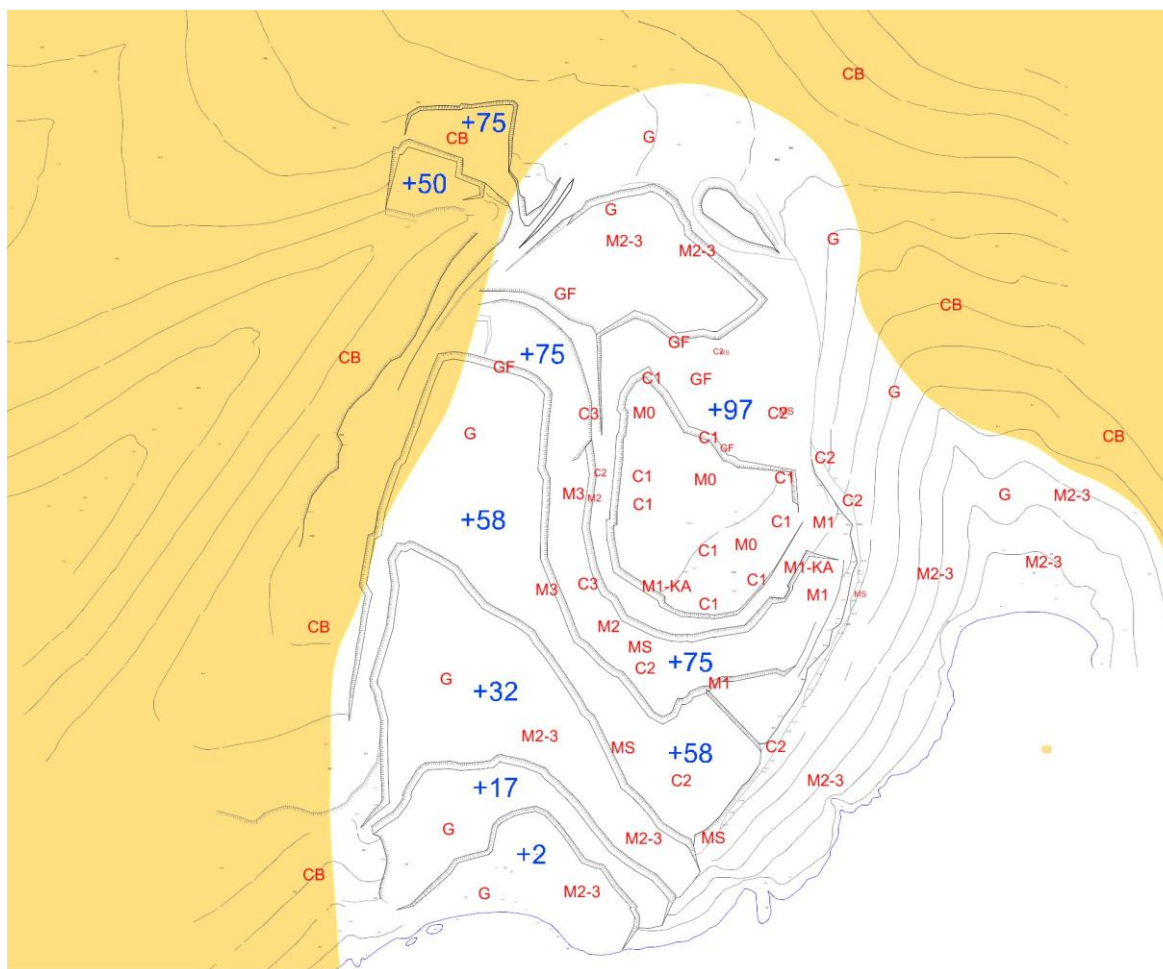
Slika 2-1 Geološka karta eksploatacijskog polja „Koromačno“ s pripadajućim tumačem (D. Vrkljan i M. Klanfar, 2010)

Ležište mineralne sirovine za proizvodnju cementa sedimentnog je tipa. Mineralnu sirovinu izgrađuju foraminiferski vapnenci, glinoviti vapnenci, različiti varijeteti lapora te numulitne i vapnenačke breče. Unutar eksploatacijskog polja “Koromačno” razlikujemo *autohtone* i *alohtone* sedimente (Slika 2-2).

Autohtoni sedimenti su glinoviti vapnenci i različiti tipovi lapora. Oni zapunjavaju depresiju (paleogensku sinklinale). Odlikuju se postojanošću i rasprostranjeni su unutar cijele sinklinale. Kontakti između različitih tipova lapora su kontinuirani i često nejasni. Podinske naslage ležišta čine foraminiferski vapnenci eocenske starosti (E_{1,2}) (oznake CB), koji izgrađuju dno sinklinale. Na njima su konkordantno taloženi glinoviti vapnenci (oznake G - grašo), debljine 50 – 70 m u središnjem dijelu sinklinale. Glinoviti vapnenci postupno prelaze u lapore sivo-plave boje (oznake M_{2,3} - magro). Prosječna debljina ovih lapora iznosi između 60 i 90 metara. Slijede siliciklastični lapori (silificirani lapor, MS). Odlikuju se povećanim udjelom siliciklastične komponente. Prosječne debljine su oko 10 metara. U slijedu autohtonih sedimenata, iznad siliciklastičnih lapora nalaze se sivo-plavi lapori (oznake M1-M). Prosječna debljina naslaga ovih lapora iznosi 10 – 25 m. Gornji sloj

autohtonih sitnozrnih sedimentata predstavljaju lapori oznake M0. Rasprostranjeni su samo u centralnom, vršnom dijelu eksploatacijskog polja. Slojevi su debljine do 20 metara.

Alohtone sedimente ležišta “Koromačno” čine vapnenačke i numilitne breče (C3, C2 i C1) te kalkareniti unutar lapora (M1-K). Unutar lapora oznake M_{2,3} nalazi se debritno tijelo vapnenačke breče (oznake C3). Breča je izgrađena od fragmenata uglavnom foraminiferskih vapnenaca, veličine do nekoliko centimetara. Ova breča isklinjava u centralnom dijelu eksploatacijskog polja u smjeru istoka, sjevera i juga, a kartirana je na istočnoj otkopnoj fronti iznad četvrte i pete etaže, na nadmorskoj visini između 65 m i 80 m. Prosječna debljina ove vapnenačke breče iznosi između 5 m i 10 m. Vapnenački debrit izgrađen od fragmenata uglavnom foraminiferskih vapnenaca krupnoće oko 10 cm (C2) prekriva cijeli centralni dio eksploatacijskog polja. Prosječne debljine je preko 25 metara i najrasprostranjenija je vapnenačka breča eksploatacijskog polja. Najmlađe debritno tijelo predstavljaju naslage izgrađene od kalkarenita (M1-K), rasprostranjene u centralnom, vršnom dijelu sinklinale. Debljina kalkiranim iznosi do 15 m. Gornji dio vapnenačkih naslaga izgrađuje sitnozrna vapnenačka i numulitna breča (C1), rasprostranjena po cijelom centralnom dijelu eksploatacijskog polja, izgrađena uglavnom od numulita i fragmenata foraminiferskog vapnenca veličine do nekoliko centimetara. Prosječna debljina naslaga tipa C1 iznosi do 20 metara. Naslage kalkarenita i numulitne breče zahvaćene su eksploatacijom na samom vrhu eksploatacijskog polja te ih nalazimo pri vrhu otkopnih fronti iznad pete etaže i u otkopnoj fronti šeste etaže (D. Vrkljan i M. Klanfar, 2010).



Slika 2-2 Situacija ležišta „Koromačno“ s rasporedom litoloških članova (D. Vrkljan i M. Klanfar, 2010)

Kvaliteta mineralne sirovine za proizvodnju cementa određena je kemijskim odnosom između kalcijeva oksida (CaO), silicijeva dioksida (SiO_2), aluminijeva oksida (Al_2O_3) i željezova oksida (Fe_2O_3). Rezerve se sastoje od četiri vrste sirovine odnosno litološki članovi su podijeljeni prema kemijskom sastavu i koncentracijama oksida u četiri skupine:

- grasso/grašo – tvrđa komponenta koja je predstavljena laporovitim vapnencem do vapnenim laporom (G) s vrlo visokim stupnjem zasićenja kalcijevim karbonatom (CaCO_3) (Slika 2-3)
- magro – mekša komponenta koja je predstavljena laporima (M3,2, M1, M, M0) s niskim stupnjem zasićenja kalcijevim karbonatom (Slika 2-3)
- silificirani lapor – lapor s visokim sadržajem silicijeva dioksida (MS), upotrebljiv uz dodatak boksita kao korektiva u kombinaciji s ostalim sirovinama

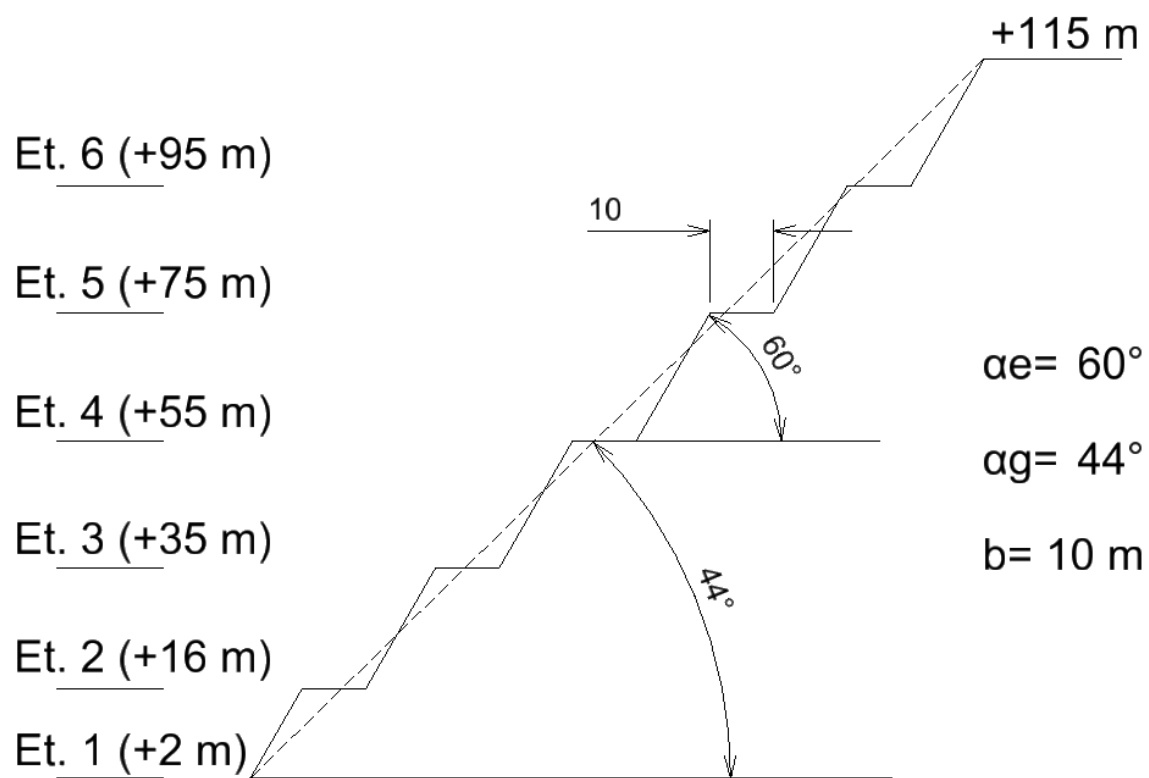
- vapnenci – predstavljeni eocenskim forminarskim vapnencima (CB) u podini laporovith naslaga i vapnenim brečama (C1, C2, C3) u krovini laporovith naslaga sa iznimno visokim stupanjem zasićenja kalcijevim karbonatom



Slika 2-3 Grašo i Magro na etaži

2.2 Trenutno stanje rudarskih radova

Kamenolom ima površinu od 1,14 km² te je s južne strane omeđen Jadranskim morem dok je sa sjeverne strane omeđen vršnim točkama eksploatacijskog polja. Sukladno Glavnom rudarskom projektu odnosno dopunskom projektu iz 2006. godine predviđeno je otkopavanje na šest etaža s početnom nadmorskom visinom od +2m, a krajnjom od +113m. Smjer napredovanja otkopnih fronti generalno je u smjeru sjevera sa širinom do 300 m. Pažljivim planiranjem i projektiranjem transportni putevi izgrađeni su do svih etaža te se vrlo lako može obavljati proces transporta mineralne sirovine do postrojenja za drobljenje. Radne kosine imaju kut nagiba približno 70° što odgovara potrebnim pravilnicima i faktoru sigurnosti svake pojedine etaže. Završne konture kopa imat će šest razvijenih etaža sa sljedećim karakteristikama nagiba; generalni kut nagiba kosine $\alpha_g = 44,4^\circ$, dok će kut nagiba pojedine etaže iznositi $\alpha_e = 60^\circ$ (Slika 2-4).



Slika 2-4 Skica završne konture kopa

3. Planiranje polja

Miniranje s dubokim minskim bušotinama osnovna je metoda eksploatacije mineralne sirovine. Prije samog miniranja potrebno je provesti niz pripremni radnji kako bi se dobila što veća količina odminiranog materijala uz minimalne troškove po jedinici volumena ili mase za postizanje zadovoljavajućeg granulometrijskog sastava. U miniranju s dubokim minskim bušotina spadaju generalno sve etaže više od 5 m s različitim promjerima bušotina koje mogu biti koso, vertikalno i horizontalno postavljene u jedan ili više redova. Prilikom planiranja miniranja potrebno je napraviti prospekciju terena koja mora sadržavati vrstu stijene, pregled fizikalno-mehaničkih karakteristika, minirljivost same stijene, raspucalost i orijentaciju slojeva i diskontinuiteta. Također je potrebno biti upoznat s korištenim eksplozivima i inicijalnim sredstvima, parametrima bušenja, prostornoj i vremenskoj shemi otpucavanja minskog polja. Stoga se prilikom svakog miniranja u kamenolomu Koromačno izrađuje poseban elaborat koji objedinjuje sve pripremne radnje za svako pojedino masovno miniranje.

Prva pripremna radnja sastoji se od označavanja bušotina na etaži. Nakon što se odredi prva bušotina potrebno je izmjeriti udaljenost odabrane bušotine i etaže. Izmjerena udaljenost naziva se izbojnica odnosno linija najmanjeg otpora. Zatim se pomoću metra određuje raster ostalih bušotina. U konkretnom slučaju udaljenost između pojedinih bušotina iznositi će 3,5 m, dok je promjer bušotine 92 mm. Geodetskom izmjerom odredi se točan položaj svake bušotine (koordinate) odnosno geografska duljina, geografska dužina i nadmorska visina. Preciznim pozicioniranjem bušotina dobiva se jasna slika napredovanja fronte otkopa na računalu, preciznije se određuje plan uzorkovanja za kemijsku analizu mineralne sirovine te se efikasnije i točnije proračunavaju parametri minskog polja.

Glavni dio elaborata o miniranju je pripadajući plan bušenja sa proračunatom količinom eksplozivnog punjenja. Plan bušenja sastoji se od imenovanih bušotina, grafičkog prikaza svih bušotina te sljedećih mjera za svaku bušotinu: kota vrha, kota dna, nagib te smjerni kut (Slika 3-1). Dubina u Tablici 2-1 predstavlja vertikalnu udaljenost između kote vrha bušotine i kote dna bušotine (Oznaka H). Oznaka I_1 je duljina projekcije bušotine zbog nagiba same bušotine, I_2 je u ovom slučaju jednak dubini s obzirom da smjerni kut iznosi 90° . Matematički zapisano:

$$I_1 = \frac{H}{\sin \alpha} \quad (3-1)$$

$$I_2 = \frac{H}{\sin \beta} \quad (3-2)$$

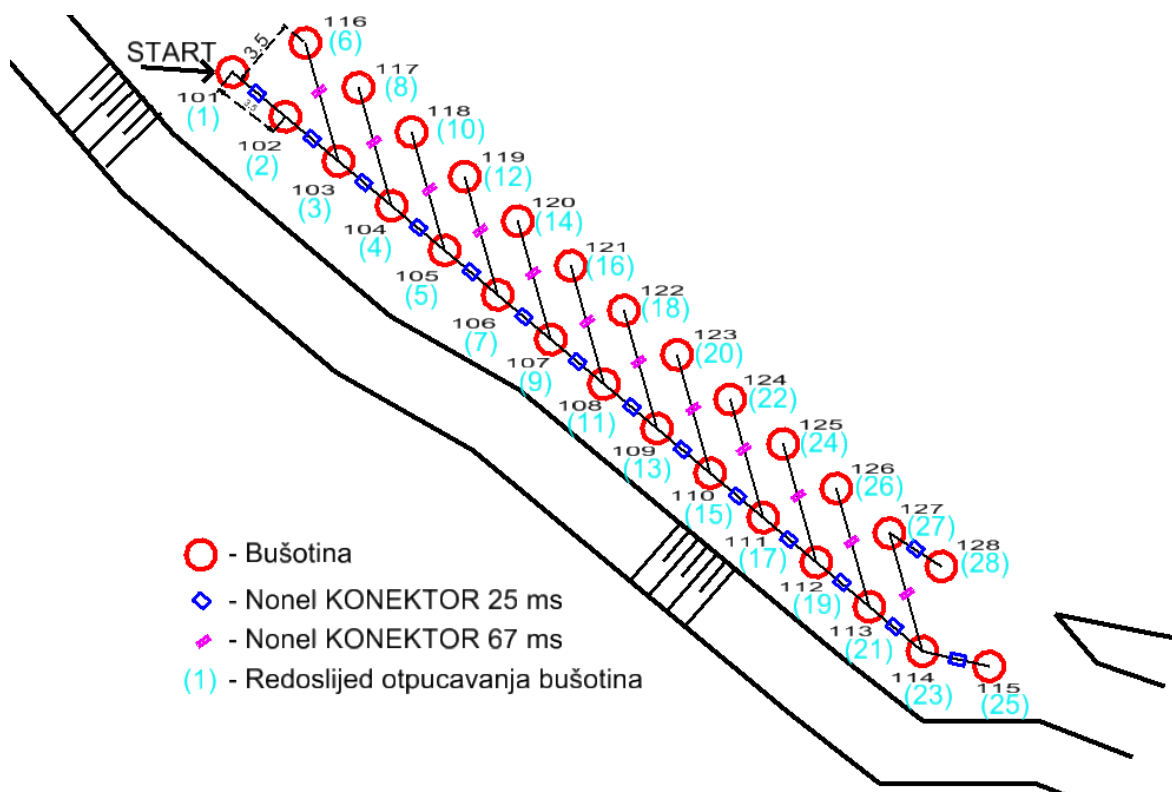
Stvarna dužina bušotine (l) je

$$l = l_1 + (l_2 - H) \quad (3-3)$$

Sumiranjem dužina svih bušotina dobije se ukupna dužina bušenja koja iznosi 641,0 m.

Tablica 3-1 Plan bušenja

BUŠOTI NA	KOTA VRHA BUŠOTI NE	KOTA DNA BUŠO TINE	NAGIB BUŠOTI NE	SMJERNI KUT	DUBINA	I-1 BUŠOTINE	I-2 BUŠOTINE	STVARNA DUŽINA
BR.	m	m	stupnjevi	stupnjevi	m	m	m	m
101	75,0	54,00	70,00	90,00	21,00	22,35	21,00	22,3
102	75,1	54,00	70,00	90,00	21,10	22,45	21,10	22,5
103	75,3	54,00	70,00	90,00	21,30	22,67	21,30	22,7
104	75,4	54,00	70,00	90,00	21,40	22,77	21,40	22,8
105	75,4	54,00	70,00	90,00	21,40	22,77	21,40	22,8
106	75,4	54,00	70,00	90,00	21,40	22,77	21,40	22,8
107	75,5	54,00	70,00	90,00	21,50	22,88	21,50	22,9
108	75,6	54,00	70,00	90,00	21,60	22,99	21,60	23,0
109	75,5	54,00	70,00	90,00	21,50	22,88	21,50	22,9
110	75,4	54,00	70,00	90,00	21,40	22,77	21,40	22,8
111	75,7	54,00	70,00	90,00	21,70	23,09	21,70	23,1
112	75,8	54,00	70,00	90,00	21,80	23,20	21,80	23,2
113	76,0	54,00	70,00	90,00	22,00	23,41	22,00	23,4
114	75,9	54,00	70,00	90,00	21,90	23,31	21,90	23,3
115	75,9	54,00	70,00	90,00	21,90	23,31	21,90	23,3
116	75,0	54,00	70,00	90,00	21,00	22,35	21,00	22,3
117	75,2	54,00	70,00	90,00	21,20	22,56	21,20	22,6
118	75,3	54,00	70,00	90,00	21,30	22,67	21,30	22,7
119	75,3	54,00	70,00	90,00	21,30	22,67	21,30	22,7
120	75,3	54,00	70,00	90,00	21,30	22,67	21,30	22,7
121	75,4	54,00	70,00	90,00	21,40	22,77	21,40	22,8
122	75,5	54,00	70,00	90,00	21,50	22,88	21,50	22,9
123	75,5	54,00	70,00	90,00	21,50	22,88	21,50	22,9
124	75,5	54,00	70,00	90,00	21,50	22,88	21,50	22,9
125	75,6	54,00	70,00	90,00	21,60	22,99	21,60	23,0
126	75,7	54,00	70,00	90,00	21,70	23,09	21,70	23,1
127	75,9	54,00	70,00	90,00	21,90	23,31	21,90	23,3
128	76,0	54,00	70,00	90,00	22,00	23,41	22,00	23,4
SUMA								641



Slika 3-1 Plan bušenja s usporenjima minskih bušotina

Redovnim miniranjem, probnim miniranjem i iskustvom sa specifične lokacije izrađen je proračun planirane potrošnje eksploziva. Zadovoljavajuće i najefikasnije miniranje s obzirom na potrošnju eksploziva i granulometrijski sastav odminirane stijene prikazan je u Tablici 3-2. Proračun je generaliziran i primjenjuje se za sva miniranja u kamenolomu, a mora sadržavati sljedeće:

- podaci preuzeti iz plana bušenja (broj bušotine, kota vrha, kota dna, nagib, smjerni kut, dubina bušotine l_1 , dubina bušotine l_2 , stvarna dužina)
- geometrija minskog polja: izbojnica ($w = 3,5$ m), razmak bušotina ($a = 3,5$ m), nagib bušotina ($\alpha = 70^\circ$), promjer bušotina ($d = 0,092$ m)
- duljina izbojnice w određena je metodom pokusnog miniranja s linearnim povećanjem izbojnice, dok su potrebne količine eksploziva proračunate iz probnog miniranja u skladu s glavnim rudarskim projektom
- dubina probušenja ispod etažne ravnine (l_p):

$$l_p = 0,3 * w = 0,3 * 3,5 = 1,05 \text{ m} \rightarrow \text{usvaja se } 1 \text{ m} \quad (3-4)$$

- specifična potrošnje ANFO eksploziva po metru bušotine ($Q_{s(ANFO)}$):

$$Q_{s(ANFO)} = \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 * \pi * 1 \right) * \rho_{ANFO} = \left(\left(\frac{0,092}{2} \right)^2 * \pi * 1 \right) * 874,70 = 5,81 \frac{kg}{m'} \quad (3-5)$$

ρ_{ANFO} – gustoća ANFO eksploziva

- specifični utrošak patroniranog eksploziva (Emulex-1) koji služi za iniciranje ANFO eksploziva određenog na temelju iskustva (iznosi $Q_{s(pat)}=6$ kg/m'). Ukupna količina patroniranog eksploziva (Q_{pat}) je promjenjiva, a kreće se od 5 kg po bušotini do 40 kg, te ovisi o lokaciji minskog polja i količini vode u bušotini.
- dužina čepa ($l_{\check{c}}$):

$$l_{\check{c}} = 0,8 * w = 0,8 * 3,5 = 2,8 m \rightarrow usvaja se 3 m \quad (3-6)$$

- visina stupca eksploziva (h_{eks}):

$$h_{eks} = \text{stvarna dužina bušotine} - l_{\check{c}} \quad (3-7)$$

- količina patroniranog eksploziva (Q_{pat}) koje je definirana na 12,5 kg po bušotini
- količina rinfuzo eksploziva (Q_{rin}):

$$Q_{rin} = \left(h_{eks} - \frac{Q_{pat}}{Q_{s(pat)}} \right) * Q_{s(ANFO)} \quad (3-8)$$

- ukupna količina eksploziva (Q_{uk}):

$$Q_{uk} = Q_{pat} + Q_{rin} \quad (3-9)$$

- volumen odloma (V):

$$V = (\text{stvarna dužina bušotine} - 1,5) * w * a \quad (3-10)$$

- specifična potrošnja eksploziva (Q_{spec}):

$$Q_{spec} = \frac{Q_{uk}}{V} \quad (3-11)$$

- masa odminiranog materijala (m):

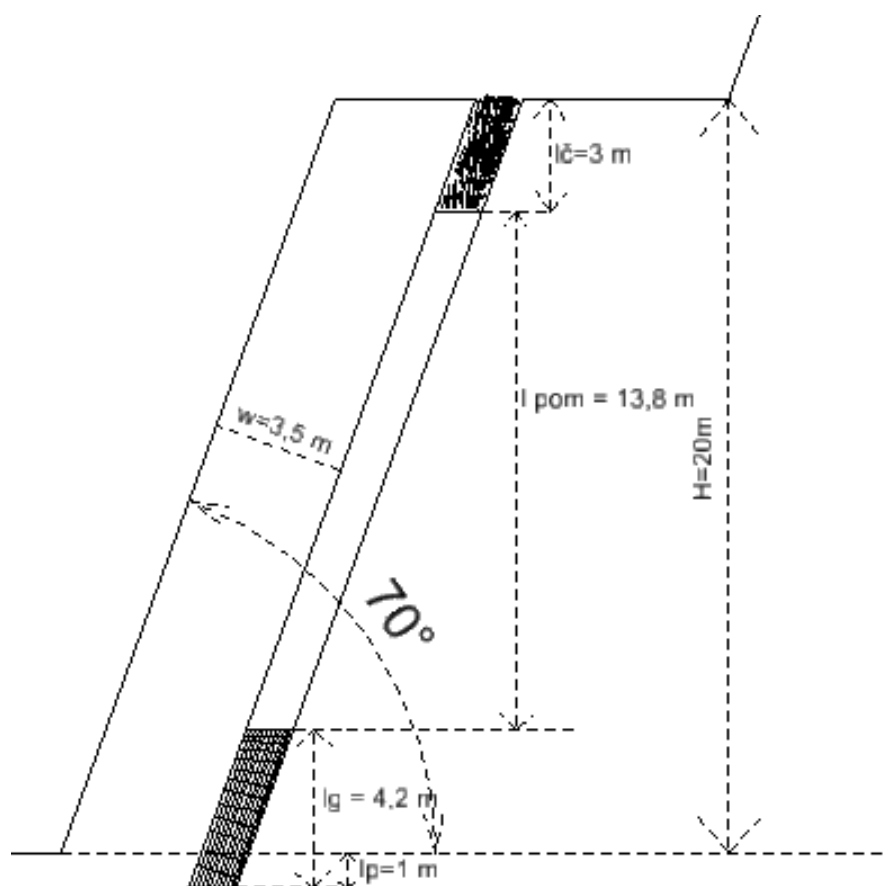
$$m = V * \rho \quad (3-12)$$

pri čemu je $\rho = 2600$ kg/m³.

Tablica 3-2 Planirana potrošnja eksploziva

BUŠOTINA	STVARNA DUŽINA	DUŽINA ČEPA	VISINA STUPCA EKSP.	NORMATIV PATRON. EKSP.	NORMATIV RINFUZO EKSP.	KOLIČINA PATRONIRANOG EKSP.	KOLIČINA RINFUZO EKSP.	PLANIRANA UKUPNA KOLIČINA EKSP.	IZBOJNICA W	RAZMAK IZMEĐU BUŠOTINA A	VOLUMEN ODLOMA	SPEC. POTROŠNJA EKPL.	VOLUMEN ODLOMA
BR.	m	m	m	kg/m'	kg/m'	kg	kg	kg	m	m	m3	kg/m3	t
101	22,3	3,00	19,35	6,00	5,81	12,00	100,79	112,79	3,50	3,50	255,38	0,44	
102	22,5	3,00	19,45	6,00	5,81	12,00	101,41	113,41	3,50	3,50	256,69	0,44	
103	22,7	3,00	19,67	6,00	5,81	12,00	102,65	114,65	3,50	3,50	259,30	0,44	
104	22,8	3,00	19,77	6,00	5,81	12,00	103,26	115,26	3,50	3,50	260,60	0,44	
105	22,8	3,00	19,77	6,00	5,81	12,00	103,26	115,26	3,50	3,50	260,60	0,44	
106	22,8	3,00	19,77	6,00	5,81	12,00	103,26	115,26	3,50	3,50	260,60	0,44	
107	22,9	3,00	19,88	6,00	5,81	12,00	103,88	115,88	3,50	3,50	261,90	0,44	
108	23,0	3,00	19,99	6,00	5,81	12,00	104,50	116,50	3,50	3,50	263,21	0,44	
109	22,9	3,00	19,88	6,00	5,81	12,00	103,88	115,88	3,50	3,50	261,90	0,44	
110	22,8	3,00	19,77	6,00	5,81	12,00	103,26	115,26	3,50	3,50	260,60	0,44	
111	23,1	3,00	20,09	6,00	5,81	12,00	105,12	117,12	3,50	3,50	264,51	0,44	
112	23,2	3,00	20,20	6,00	5,81	12,00	105,74	117,74	3,50	3,50	265,81	0,44	
113	23,4	3,00	20,41	6,00	5,81	12,00	106,97	118,97	3,50	3,50	268,42	0,44	
114	23,3	3,00	20,31	6,00	5,81	12,00	106,35	118,35	3,50	3,50	267,12	0,44	
115	23,3	3,00	20,31	6,00	5,81	12,00	106,35	118,35	3,50	3,50	267,12	0,44	
116	22,3	3,00	19,35	6,00	5,81	12,00	100,79	112,79	3,50	3,50	255,38	0,44	
117	22,6	3,00	19,56	6,00	5,81	12,00	102,03	114,03	3,50	3,50	257,99	0,44	
118	22,7	3,00	19,67	6,00	5,81	12,00	102,65	114,65	3,50	3,50	259,30	0,44	
119	22,7	3,00	19,67	6,00	5,81	12,00	102,65	114,65	3,50	3,50	259,30	0,44	
120	22,7	3,00	19,67	6,00	5,81	12,00	102,65	114,65	3,50	3,50	259,30	0,44	
121	22,8	3,00	19,77	6,00	5,81	12,00	103,26	115,26	3,50	3,50	260,60	0,44	
122	22,9	3,00	19,88	6,00	5,81	12,00	103,88	115,88	3,50	3,50	261,90	0,44	
123	22,9	3,00	19,88	6,00	5,81	12,00	103,88	115,88	3,50	3,50	261,90	0,44	
124	22,9	3,00	19,88	6,00	5,81	12,00	103,88	115,88	3,50	3,50	261,90	0,44	
125	23,0	3,00	19,99	6,00	5,81	12,00	104,50	116,50	3,50	3,50	263,21	0,44	
126	23,1	3,00	20,09	6,00	5,81	12,00	105,12	117,12	3,50	3,50	264,51	0,44	
127	23,3	3,00	20,31	6,00	5,81	12,00	106,35	118,35	3,50	3,50	267,12	0,44	
128	23,4	3,00	20,41	6,00	5,81	12,00	106,97	118,97	3,50	3,50	268,42	0,44	
Σ	641	84,00	556,74			336,00	2909,31	3245,31			7334,58		19069,91

Na temelju proračunatih vrijednosti naručuju se potrebne količine eksploziva i detonatora u nešto većoj količini od proračunate zbog problema koji se mogu pojaviti prilikom miniranja. Na slici 3-2 vidi se presjek minske bušotine sa glavnim i pomoćnim punjenjem te detonatorom. Na slici 3-1 vidljiva je shema otpucavanja sa odgovarajućim usporenjima neelektričnog sustava iniciranja i redoslijedom otpucavanja pojedine bušotine.



Slika 3-2 Skica punjenja minske bušotina

4. Bušenje

Bušenje minskih bušotina izvodi se udarno rotacijskom bušačom garniturom s unutarnjim čekićem proizvođača Atlas Copco Roc F6 (Slika 4-1). Brzina bušenja ovisi o materijalu u kojem se buši pa za tvrdi materijal (grasso) brzina iznosi $v = 1,8$ m/min, dok je brzina za mekši materijal (magro) $v = 2,5$ m/min. Bušilica ima ugrađen dodatak za automatsko prikupljanje uzoraka koji se uzimaju iz ispuha iz bušotine (Slika 4-2). Operater na bušilici zadaje vremenski interval u kojem bušilica automatski uzorkuje bušotinu. Uzorak se pakira u plastične vrećice te se otprema u laboratorij na kemijsku analizu gdje se određuje stupanj zasićenja vapnencem (engl. *lime saturation factor*) te silikatni i aluminatni modul kako bi se odredile odgovarajuće količine korektiva. Zadaća operatera je i vođenje bušačeg dnevnika u kojeg se upisuju svi problemi i neočekivane situacije koje su se događale prilikom izvođenja radova. Primjeri situacija koje je potrebno bilježiti su nalazišta kaverni, devijacije putanje, pojava vode te problemi s krunom. Detaljan bušači dnevnik osnova je sljedećeg procesa punjenja minskih bušotina. Svrha dnevnika je također sprječavanje problema povezanih sa gubitkom eksploziva u bušotini. Nakon bušenja potrebno je zaštititi otvor kako bi se spriječilo uticanje vode i opadanje materijala u bušotinu.



Slika 4-1 Bušilica na etaži



Slika 4-2 Uređaj za prikupljanje uzoraka

5. Miniranje

Datum i točno vrijeme svakog masovnog miniranja potrebno je prijaviti nadležnoj policijskoj postaji te obavijestiti lokalno stanovništvo. Miniranja se najčešće izvode u jutarnjem periodu za vrijeme dobrih atmosferskih prilika. Ne prakticira se iniciranje polja kada postoji mogućnost kiše i grmljavine također i jakog vjetrova. Prije početka punjenja minskih bušotina kontrolira se otpremnica tvrtke zadužene za prijevoz eksploziva i uspoređuje se količina eksploziva i usporivača koji su izdani sa količinom eksploziva i usporivača koji su proračunati za miniranje. Na otpremnici je jasno vidljiva vrsta robe, količina i serijski brojevi pojedinog pakiranja. Nakon što su količine potvrđene dozvoljava se ulaz robe u kamenolom.

Rudarski radovi prilikom miniranja sastoje se od provjere stanja i dubine bušotina, punjenja bušotina eksplozivom i čepljenja, povezivanja polja, iniciranja minskog polja, pregleda odminirane stijenske mase te uništavanja nedetoniranog eksploziva.

Prije početka punjenja minskih bušotina provjerava se bušači dnevnik kako bi se posebno označile bušotine u kojima su detektirane kaverne. Također se pomoću zrcala vizualno pregledava sama bušotina kako bi se utvrdilo da li je došlo do eventualnih pomaka, urušavanja ili začepjenja. Prisutnost vode određuje se pomoću kamenčića koji se baca u bušotinu te se na temelju zvuka može utvrditi prisutnost vode u bušotini. Količina eksploziva koja se stavlja u bušotinu mora odgovarati projektiranoj količini za pojedino miniranje. Udarne patrone sastoje se od emulzijskog eksploziva Emulex 1 koji je pakiran u patrone dimenzija 700 mm čiji je promjer 55 mm, a koja se spušta na dno bušotine zajedno s neelektričnim sustavom iniciranja (Slika 5-1). Ako je u bušotini detektirana veća količina vode, emulzijskim eksplozivom u patronama puni se bušotina dok zadnja ubačena patrona ne izviri iz vode. Osim vode u bušotini, problem koji se može pojaviti prilikom punjenja bušotina patroniranim eksplozivom je zaglavljenje patrone zbog smanjenja promjera bušotine. Tada je potrebno pomoću utega koji na sebi ima šiljak i udice probušiti zaglavljenju patronu i podići ju na površinu. U bušotinu je moguće staviti dodatnu udarnu patronu kako bi iniciranje bušotine bilo izvjesno. Nakon što se u bušotini dosegne suho područje, u bušotinu se usipava ANFO eksploziv koji se nalazi u pakiranjima od 25 kg. Prilikom usipavanja eksploziva u bušotinu potrebno je paziti da količine odgovaraju projektiranim vrijednostima. Potrebno je izmjeriti visine ANFO eksploziva u svakoj bušotini, što se čini pomoću drvenog štapa, te na vrijeme reagirati ukoliko se pojavi gubitak u nekoj od kaverni

jer prevelika količina eksploziva unutar bušotine može dovesti do neželjenih posljedica prilikom miniranja. Ako je poznata lokacija kaverne, u bušotinu se spušta udarna patrona te se nasipava ANFO eksploziv do 1,0 m ispod kaverne, a zatim se u istu bušotinu spušta druga udarna patrona koja se zaustavlja 1,0 m iznad kaverne te se na površini veže kamenom kako bi se spriječilo upadanje. Nakon udarne patrone slijedi nasipavanje ANFO eksploziva do potrebne razine i čepljenje bušotine. Čepovi za minske bušotine najčešće se sastoje od nabušenog materijala koji se pažljivo nabija s drvenim štapom kako se ne bi oštetila cjevčica neelektričnog sustava iniciranja. Na površini se spoje sve cjevčice neelektričnog sustava pomoću konektora, prateći usporenja i redoslijed otpucavanja, kako bi se stvorila slobodna površina i razbio seizmički udarni val koji je posljedica svakog miniranja. Inciranje polja vrši se električnim sustavom tako da se u neelektrični konektor postavi električni detonator. Na električni detonator postavljaju se vodiči, koji završavaju na sigurnoj udaljenosti, u skloništu za palitelja mina iz kojeg se inicira minsko polje. Prije samog iniciranja slijedi niz zvučnih signala koji će biti opisani u poglavlju niže. Također se ohm-metrom provjerava otpor strujnog kruga nakon čega se pomoću stroja za paljenje inicira minsko polje (Slika 5-3). Po završetku miniranja potrebno je ispuniti dokument o eksplozivu koji nije iskorišten i koji se transportira iz kamenoloma. Također se u sustav Ministarstva unutarnjih poslova upisuju potrošene količine eksploziva i detonatora kao i odgovorna osoba koja je obavila miniranje, a mora imati položen stručni ispit i minersku dozvolu.



Slika 5-1 Udarne patrona - Emulex 1 eksploziv



Slika 5-2 ANFO eksploziv i provjera visine punjenja



Slika 5-3 Sklonište za palitelja mina i mjerenje otpora

6. Zaštita na radu

Proces proizvodnje i održavanja svakodnevno donosi visokorizične aktivnosti, a potencijal za nastanak ozljeda na radu je velik. Stoga su zdravlje i sigurnost apsolutni prioritet unutar LafargeHolcim grupe. Hrvatska je tvornica usklađena sa zakonskom regulativom iz područja zaštite na radu, a dodatno i s brojnim standardima LafargeHolcim grupe kojima se nastoji sva radna mjesta učiniti sigurnima za rad.

Na temelju analize svih nesreća unutar grupacije uvedeno je 13 elemenata za sprječavanje najtežih stradanja u pojedinim područjima proizvodnje, a to su:

- rad na visini,
- izolacija i zaključavanje,
- vozila i sigurnost u prometu,
- sigurnost kod električne struje,
- ograđivanje strojeva,
- rad u zatvorenom prostoru,
- obrada u toplom stanju,
- kopanje i iskopavanje,
- dizanje i podupiranje tereta,
- rad pored vode,
- sigurnost kod željezničkog prometa,
- kamenolomi i otvorene deponije i
- izlaganje vrućim materijalima, površinama i plinovima.

Povrh svega postoji i pet glavnih pravila za zdravlje i sigurnost kojih se treba pridržavati svaki zaposlenik ili vanjski suradnik koji sudjeluje u proizvodnji. Pravila su:

- procjenjujem i kontroliram rizike prije početka svakog zadatka,
- provodim samo aktivnosti za koje sam ovlašten,
- nikad ne zanemarujem niti zloupotrebljavam naprave i sustave namijenjene zaštitu zdravlja i sigurnosti te uvijek koristim propisanu osobnu zaštitnu opremu,
- ne radim pod utjecajem alkohola ili droga,
- prijavljujem sve incidente.

6.1 Zaštitna oprema

Svako radno mjesto unutar tvrtke ima propisanu zaštitnu opremu i dopuštena ponašanja. Rudarski dio spada u rizičniju skupinu s mogućnošću nastajanja raznih ozljeda. Od gore navedenih elemenata rudarski odsjek obuhvaća pet elemenata: izolacija i zaključavanje, vozila i sigurnost u prometu, ograđivanje strojeva, kopanje i iskopavanje, kamenolomi i otvorene deponije. Stoga je propisana obavezna zaštitna oprema koju svaki radnik mora koristiti. Osnovna oprema sastoji se od zaštitne kacige s vezicama, reflektirajuće majice, reflektirajućeg prsluka, hlača s reflektirajućom trakom pri dnu nogavice te cipela sa željeznom kapicom. Po potrebi je moguće osim osnovne opreme, ovisno o lokaciji rada, koristiti čepiće za uši, slušalice za uši, zaštitne naočale, rukavice i majice dugih rukava.

6.2 Zaštita kod miniranja

Miniranje spada u jedno od najopasnijih radnji na kamenolomu stoga je važno pratiti sigurnosne protokole i uputstva kako bi se spriječile nesreće. Prilikom minerskih radova potrebno je osigurati zaštitu od nekontroliranog aktiviranja eksploziva, zaštitu od seizmičkog utjecaja, zaštitu od razbacivanja odminiranog materijala, zaštitu od zračnog udarnog vala, zaštitu od buke i prašine te zaštitu prilikom uništavanja nedetoniranog eksploziva i inicijalnog sredstva. Masovna miniranja trebala bi se u pravilu izbjegavati za vrijeme sumraka i slabe vidljivosti te za vrijeme kiše i grmljavinskog nevremena.

Zaštita od nekontroliranog aktiviranja eksploziva nužna je prilikom skladištenja, manipuliranja, transporta, punjenja minskih bušotina te nakon paljenja minskog polja. Svodi se na pažljivo rukovanje eksplozivnim tvarima i onemogućavanje djelovanja otvorenog plamena u blizini eksploziva. Također, za vrijeme punjenja minskih bušotina patrone eksploziva ne smiju se gnječiti i naguravati u bušotine, a čepljenje bušotina potrebno je izvoditi pažljivo s drvenim zaobljenim letvama pazeći da se ne ošteti cjevčica neelektričnog sustava iniciranja. Potrebo je postaviti stražu i barikade za sprječavanje ulaska neovlaštenih osoba u minsko polje, a sve na sigurnoj udaljenosti od zone maksimalnog razbacivanja materijala. Po završetku miniranja palitelj mina dužan je obaviti pregled odminiranog materijala te kada se uvjeri da nema nedetoniranog eksploziva dopušta prilaz području radova.

Zaštita od seizmičkog utjecaja temelji se na izvođenju i punjenju bušotina prema točnim projektnim veličinama. Smanjenje djelovanja seizmičkog vala u stijenama uspješno se može postići smanjenom količinom eksploziva koja detonira po stupnju paljenja, povećanjem intervala otpucavanja između bušotina, smanjenjem dubine bušotina i probušenja, miniranjem prema slobodnoj površini. Važno je nastojati da vrijeme detonacije minskog polja bude čim kraće, idealno unutar jedne sekunde.

Zaštita od razbacivanja odminiranog materijala postiže se pravilnim izvođenjem konstrukcije eksplozivnog punjenja u pojedinoj bušotini, čepljenjem minske bušotine odgovarajućim materijalom te udaljavanjem ljudi i mehanizacija na sigurnu udaljenost izvan radijusa ugrožene zone. Na daljinu odbacivanja miniranog materijala utječu veličina izbojnice, razmak između bušotina, kut odbacivanja miniranog materijala i konfiguracija terena na kojem se izvodi otpucavanje. Maksimalni radijus odbacivanja materijala računa se po formuli (6-1) (J. Krsnik, 1989), dok je zona rastresanja materijala petnaest puta dulja od izbojnice i iznosi 60 m na platou te uz kosinu etaže.

$$R_r = 255 * p^{0,75} * \sqrt[3]{w} = 255 * 1^{0,75} * \sqrt[3]{3,5} = 387 \text{ m} \quad (6-1)$$

R_r – maksimalni radijus (m)

p – pokazatelj djelovanja eksplozije

w – linija najmanjeg otpora - izbojnica (m)

$$p = \frac{R}{w} = \frac{3,5}{3,5} = 1 \quad (6-2)$$

R – radijus odloma (m)

w – linija najmanjeg otpora (m)

Zaštita od zračnog udarnog vala na kamenolomu je primjenjiva samo ako se miniranje izvodi blizu upravnih zgrada i skladišnih prostora. Stakleni prozori, vrata i ostale staklene plohe potrebno je ostaviti otvorene kako bi se spriječilo oštećenje istih. Pri detonaciji eksplozivnog naboja uslijed naglog povećanja tlaka plinova dolazi do nastajanja zračnog udarnog vala koji se sastoji od faze kompresije (predtlak) i faze podtlaka. U fazi kompresije zrak se kreće u smjeru širenja zračnog udarnog vala, dok je u fazi podtlaka gibanje u suprotnom smjeru. Intenzitet zračnog udarnog vala ovisi o nizu faktora: količini i vrsti eksploziva, položaju eksplozivnog naboja u bušotini, udaljenosti od minskog polja, načinu iniciranja, obliku i konfiguraciji terena, vremenskim uvjetima prilikom izvođenja miniranja, izbojnici, duljini i

kvaliteti čepa, razmaku između minskih bušotina, shemi otpucavanja i točnosti milisekundnih usporivača. Primjerice, zračni udarni val je manji ako je izbojnica veća, ali se povećava seizmički utjecaj. Na smanjenje zračnog udara utjecaj ima povećanje dužine čepa minske bušotine te veći razmak između minskih bušotina.

Uklanjanje nedetoniranog eksploziva prioritet je za nastavljane daljnjih radova na kamenolomu. Uočeni nedetonirani eksploziv obavezno se označava i ograđuje kako bi se spriječio ulazak u opasnu zonu. Sekundarnim miniranjem uništava se nedetonirani eksploziv uz poštivanje svih procedura i pravilnika vezanih za obavljanje miniranja popraćeno propisanim zvučnim signalima.

Obavijest o paljenju mina izdaje se pomoću uređaja za reproduciranje signala opasnosti tzv. sirene s jasno definiranim zvučnim signalima i trajanjima istih.

- prvi signal – jednom dugo, kada su minske bušotine napunjene eksplozivom i začepljene. Nakon ovog signala prestaje rad strojeva oko mjesta miniranja, a straže uklanjaju ljude s ugroženih područja.
- drugi signal – dva puta dugo, kada su mine pripremljene za paljenje.
- treći signal – tri puta dugo, najmanje jednu minutu poslije drugog signala, a objavljuje početak paljenja mina
- četvrti signal – jednom kratko, objavljuje završetak miniranja i smije se dati samo onda kada odgovorni palitelj mina utvrdi da na radilištu nema nikakve opasnosti.

Nakon iniciranja polja palitelj mina ostaje u skloništu propisano vrijeme nakon kojega pregledava minsko polje i radilište te daje odobrenje za završetak miniranja.

7. Seizmički utjecaj miniranja

Prema istraživanju Giorgija Berte raspodjela energije koja je prenesena na stijenu je sljedeća:

- lom in situ < 1 %
- odbacivanje stijenske mase < 1 %
- deformacija stijenske mase iza bušotine < 1 %
- lomljenje stijene u neposrednoj blizini bušotine 1,5 - 2 %
- pomicanje stijenske mase 4 %
- razlom 15 %
- zračni udarni val 38 - 39 %
- seizmički utjecaj 40 %

Iz gore navedenih podataka vidljivo je da većina energije koja se oslobodi spada u štetne utjecaje miniranja (zračni udarni val i seizmički utjecaj), stoga treba pažljivo projektirati te ograničiti maksimalno dozvoljenu količinu eksplozivnog punjenja po stupnju otpucavanja.

Iniciranjem minskog polja nastaju različiti tipovi seizmičkih valova čiji intenzitet ovisi o količini i vrsti eksplozivnog punjenja, udaljenosti od mjesta minskog polja te o sredini kroz koju se valovi šire. Prigušenje je smanjenje energije pojedinog vala i ono se prema (J. Krsnik, 1989) javlja zbog:

- frekvencije pojedinog seizmičkog vala
- poroziteta i raspucalosti stijene
- sastava i strukture stijene
- sadržaja vode i temperature u stijeni
- adsorpcije i apsorpcije stijene
- rasipanja i disipacije energije

7.1 Seizmički valovi

Postoje dvije grupe seizmičkih valova. Prva skupina seizmičkih valova su valovi koji se šire unutar stijenske mase kroz unutrašnjost Zemlje u svim smjerovima iz jednog izvora (P i S valovi). Druga skupina seizmičkih valova su površinski valovi koji nastaju interakcijom

unutrašnjih valova (P i S) sa Zemljinom površinom ili zbog razlike gustoće pojedinih materijala te im je širenje približno paralelno s Zemljinom površinom (Rayleigh-ovi i Love-ovi valovi). Najveći kontrast između gustoća događa se na granici između stijenske mase i površine Zemlje (atmosfera). Prisutnost slobodne površine ili više njih doprinosi fenomenu kotrljanja tla.

Primarni valovi (P, longitudinalni, kompresijski) prepoznatljivi su po tome što je kretanje čestica paralelno sa smjerom širenja vala te se na uređajima za detekciju seizmičkih valova uočavaju prvi. Brzina vala u zemljinoj unutrašnjosti kreće se između 5-7 km/s, u vodi 1,5 km/s, a u zraku 0,3 km/s. Širenje deformacije sastoji se od pomaka između čestica izmjenama kompresije i proširenja.

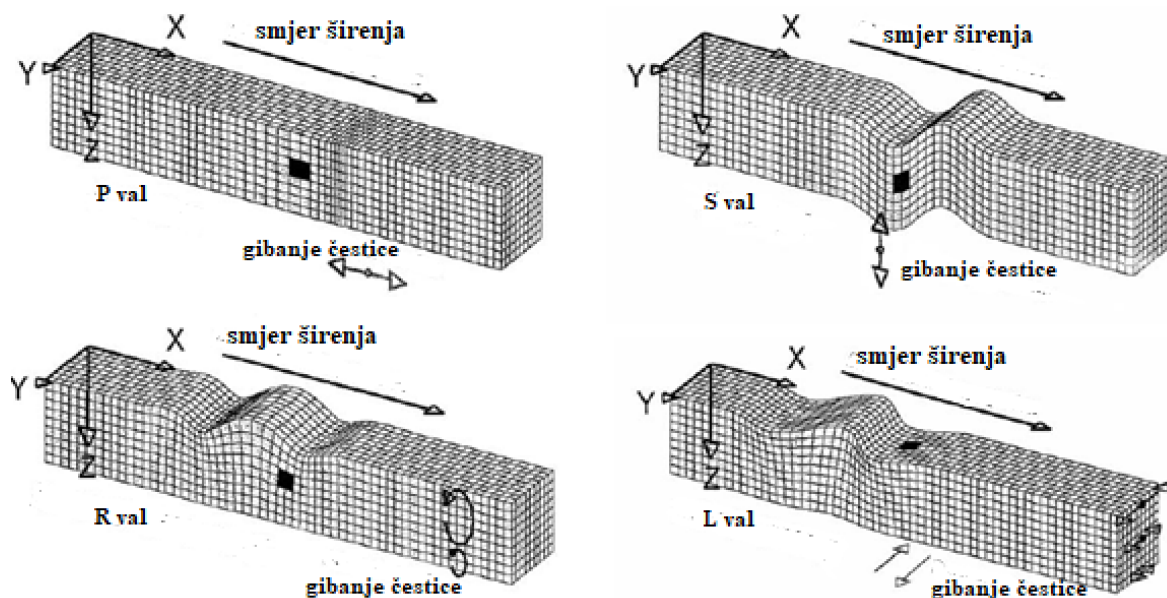
Sekundarni valovi (S, transverzalni, smični) prepoznatljivi su po kretanju čestica okomito na smjer širenja vala. Brzina širenja kreće se u rasponu od 3 do 4 km/s te su značajno sporiji od primarnih valova. Sekundarni valovi uzrokuju posmična naprezanja unutar materijala. Važno svojstvo ovih valova je da se ne šire kroz fluide (voda i zrak). Širenje deformacija događa se zbog izmjene transverzalnih pokreta. Transverzalno pomicanje čestica može biti u bilo kojem smjeru, najčešće zbog uslojenosti tla u vertikalnom ili horizontalnom smjeru. Matematički gledano, prema autorima (Birch, W.J. i White, T.J., 2013), prikladno je razdvojiti sekundarni val u dvije komponente, horizontalnu i vertikalnu. Ako je materijal kroz koji se val širi izotropan, horizontalna i vertikalna komponenta putuju zajedno te je to zapravo jedan val. Ukoliko je materijal anizotropan, ranije navedene komponente se razdvajaju i putuju različitim brzinama.

Rayleigh-ovi (R) valovi spadaju u površinske valove koji nastaju pri promjeni gustoće medija kroz koji se val širi. Kretanje čestica odvija se u eliptičnim putanjama u okomitoj ravnini u odnosu na površinu i paralelno sa smjerom širenja valova. Na površini i pri malim dubinama materijal se kreće retrogradno u malim elipsama i ekscentricitetom koji ovisi o dubini. Pri većoj dubini dolazi do promjene te se val kreće progradno odnosno smanjuje se amplituda vala (Wyssession, M. i Stein, S., 2005). Brzine kretanja valova kreću se od 2 do 4,2 km/s

Love-ovi (L) valovi su smični valovi koji uzrokuju poprečne vibracije u vodoravnom smjeru bez vertikalne komponente odnosno val ima poprečno horizontalno gibanje čestica okomito na smjer širenja vala. Tipična brzina ovih valova je između 2 i 4,4 km/s. Širenje deformacija

sastoji se od izmjene transverzalnih pokreta u horizontalnom smjeru okomitom na širenje vala. Amplituda se također smanjuje s dubinom.

Važno je naglasiti da prilikom prolaska vala kroz materijal može doći do elastičnih deformacija, ako je snaga vala manja od elastične čvrstoće materijala, ili do plastičnih deformacija (trajne posljedice), ako val premaši čvrstoću materijala. Na slici 7-1 prikazane su sve vrste valova s pripadajućim smjerom širenja.



Slika 7-1 Seizmički valovi

(<https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>)

Vibracije su posljedica prolaska seizmičkih valova kroz stijensku masu. Pojednostavljeno gledano, vibracije su harmonična gibanja u sinusiudalnoj putanji. Jednadžba najjednostavnijeg sinusiudalnog vala jest:

$$x(t) = A * \sin(\omega t + \varphi), \quad (7-1)$$

gdje oznaka A predstavlja amplitudu pomaka, ω kutnu frekvenciju, t vrijeme i φ fazni kut. Zbog praktične primjene, fazni kut u smislu vibracije nema nikakav značaj te su stoga vibracije karakterizirane dvama parametrima, amplitudom i frekvencijom. Iniciranjem minskog polja generira se više vrsta seizmičkih valova koji se šire kroz stijensku masu (P,S,R,L valovi). Na mjestu opažanja, što može biti geofon ili određena građevina, valovi se pojavljuju s određenim zakašnjenjem i različitom amplitudom. Na slici 7-2 prikazan je teoretski seizmogram širenja seizmičkih valova.



Slika 7-2 Teoretski seizmogram

Iz slike je vidljivo da valovi koji putuju kroz stijensku masu imaju veće brzine od površinskih. Primarni valovi su najbrži i često imaju veće frekvencije i najmanju amplitudu pomaka. Sekundarni valovi se na seizmogramu pojavljuju nakon primarnih valova. Za njih je karakteristično da imaju zanemarivo niže frekvencije i veće pomake u odnosu na primarne valove. Posljednji valovi koji se iščitavaju na seizmogramu su površinski valovi. Karakteristično je da imaju najmanje frekvencije i najveće pomake te kao takvi predstavljaju najveći problem za građevinske objekte.

Prema engl. *European Shotfirer Standard Education for Enhanced Mobility (ESSEEM)* gibanje tla uslijed djelovanja potresnog vala ovisi o:

- eksplozivnom punjenju – primjerice manja punjenja stvorit će veće frekvencije i manje pomake dok je za veća punjenja suprotno
- geologiji terena – ukoliko je područje oko mjesta miniranja kamenito s plitkim pokrovom tla, vibracije će imati uglavnom obilježja većih frekvencija i manjih pokreta. S druge strane, ako se radi o debelom pokrovu tla (primjerice aluvijalna dolina) vibracije će imati karakteristike nižih frekvencija i većih pomaka
- vrsti eksploziva.

Osim brzine rasprostiranja seizmičkih valova potrebno je promatrati brzinu gibanja čestica, odnosno maksimalnu vrijednost pomaka čestica tla uslijed vibracija. U današnje vrijeme prakticira se koristiti vršnu vrijednost pomaka čestica tla kako bi se izrazio intenzitet vibracije uslijed miniranja. Brzina pomaka čestica najčešće se mjeri u centimetrima ili milimetrima po sekundi (cm/s, mm/s). Prema engl. *European Shotfirer Standard Education for Enhanced Mobility (ESSEEM)* za sinusoidalne kretnje vrijedi sljedeća relacija:

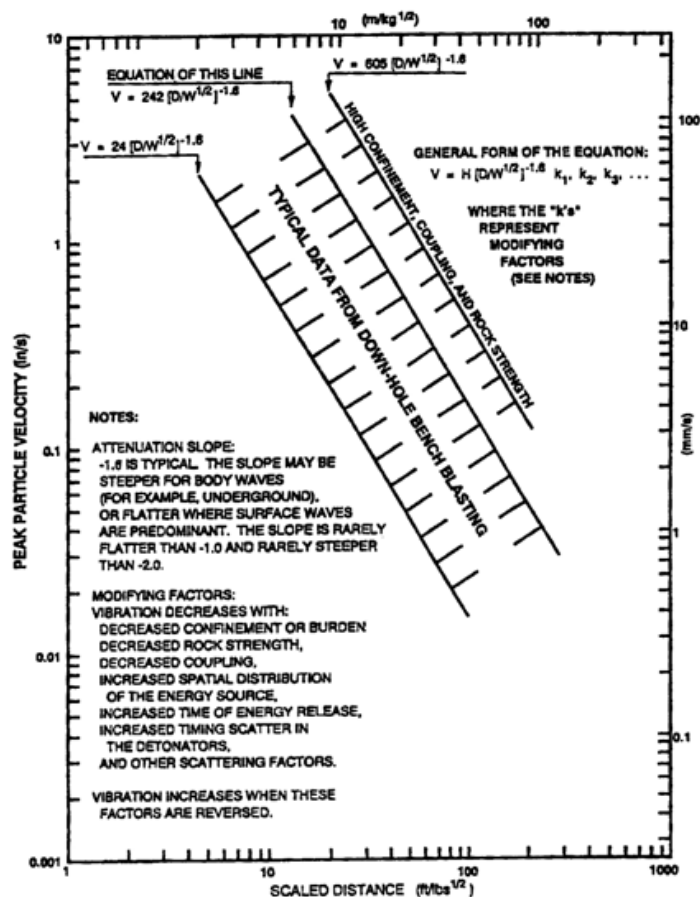
$$V = 6,28 * f * A, \quad (7-2)$$

gdje oznaka V predstavlja vršnu vrijednost brzine pomaka čestice, f frekvenciju u Hertzima te A pomak.

Mjerenje brzina oscilacija izvodi se seizmografima. Seizmograf je uređaj koji se sastoji od geofona i uređaja za zapisivanje potresa, a postavljaju se u Zemljinu površinu na određenoj udaljenosti od minskog polja. Geofon ima tri međusobno okomita elektromagnetska svitka koji mjere tri međusobno okomite komponente potresnog vala (transverzalnu, longitudinalnu i vertikalnu komponentu).

Postoji velik broj proračuna koji služe za predviđanje brzina oscilacija uslijed miniranja te je za potrebe istih potrebno definirati nove varijable. Prije svega potrebno je uvesti svedenu udaljenost koja predstavlja spajanje varijabli udaljenosti i energije eksploziva, a definirana je kao stvarna udaljenost od mjesta iniciranja podijeljena s drugim korijenom količine eksploziva koji detonira po stupnju paljenja.

Prema engl. *8th Edition Blasters' Handbook* postoji grafička metoda za određivanje očekivanih vibracija na temelju svedene udaljenosti. Na slici 7-3 prikazan je dijagram na kojem se na horizontalnoj osi odredi točno izračunata svedena udaljenost te se ona projicira vertikalno prema dolje do križanja s linijom predviđenih potresa. Od mjesta križanja povuče se horizontalna linija do vertikalne osi te se očita vrijednost predviđenih maksimalnih i minimalnih brzina oscilacije.



Slika 7-3 Dijagram za određivanje pomaka

Sadowski je predložio sljedeću relaciju gdje je brzina oscilacija u ovisnosti s količinom eksplozivnog punjenja i udaljenosti mjesta opažanja od minskog polja:

$$v = k * \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^n \quad (7-3)$$

gdje je:

k – koeficijent načina miniranja

n – koeficijent prigušivanja seizmičkih valova na putu širenja

Q – količina eksplozivnog punjenja koja je aktivirana istovremeno (kg)

R – udaljenost mjesta opažanja od minskog polja (m).

Koeficijent načina miniranja i koeficijent prigušivanja seizmičkih valova ovisi o uvjetima u kojima se nalazi objekt proračuna, geometriji miniranja te vrsti eksploziva. Kako bi se pravilno koristio gore navedeni izraz potrebno je obaviti testno miniranje za određivanje

koeficijenta. Na dva mjesta opažanja prate se brzine oscilacije, udaljenost od mjesta iniciranja te količina eksploziva koja detonira po jednom stupnju paljenja.

Svedena količina eksploziva je:

$$\rho_s = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \quad (7-4)$$

gdje je:

Q – količina eksplozivnog punjenja koja je aktivirana istovremeno (kg)

R – udaljenost mjesta opažanja od morskog polja (m)

Koeficijent prigušivanja seizmičkih valova na putu širenja (n):

$$n = \frac{\log \frac{v_1}{v_2}}{\log \frac{R_2}{R_1}} \quad (7-5)$$

gdje je:

v_1 – brzina oscilacije tla na prvom mjestu opažanja (cm/s)

v_2 – brzina oscilacije tla na drugom mjestu opažanja (cm/s)

R_1 – udaljenost prvog mjesta opažanja od morskog polja (cm)

R_2 – udaljenost drugog mjesta opažanja od morskog polja (cm).

Koeficijent načina miniranja (k):

$$k = \frac{v_1}{\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R_1}\right)^n} \quad (7-6)$$

Dozvoljena količina eksplozivnog punjenja po stupnju paljenja (Q_{doz}):

$$Q_{doz} = \left(R * \sqrt[n]{\frac{v_{doz}}{k}} \right)^3 \quad (7-7)$$

gdje je:

R – udaljenost mjesta opažanja od morskog polja (cm)

v_{doz} – dozvoljena brzina oscilacija (cm/s)

Na temelju izračunatih brzina oscilacija tla određuje se radijus ugrožene zone prilikom otpucavanja određene količine eksplozivnog punjenja. Na osnovu izmjerenih brzina

oscilacija tla proračunava se intenzitet potresa koji je izazvan te se procjenjuje njegovo djelovanje na okolne objekte. Trenutno je u Hrvatskoj na snazi norma HRN DIN 4150 (Vibracije u građevinama) koja propisuje dozvoljene brzine pomaka u ovisnosti o frekvenciji vala. S obzirom da niže frekvencije imaju veće pomake i dulje vremensko trajanje prolaska vala u objektima stvaraju pobudu koja ovisi o intenzitetu samog vala. Pri kritičnoj brzini oscilacija u građevinskim konstrukcijama nastaju trajne deformacije uslijed naprezanja koje su veće od čvrstoće konstrukcije. Na temelju različitih brzina Medvedev je izradio tablicu sa stupnjevima potresa sa pripadajućom brzinom oscilacije i djelovanjem potresa na ljude i građevine (Tablica 7-1). Brzina oscilacije stijene, objekta, ili dijela objekta na mjestu mjerenja prihvaćena je veličina za ocjenu mogućnosti nastanka oštećenja na njima. Oštećenja se mogu svrstati u više kategorija, od onih estetske prirode, poput oštećenja na fasadama, žbukama, spojevima i sl., do bitnih oštećenja nosivih elemenata objekta. Prilikom miniranja potrebno je osigurati da ne dođe do oštećenja bilo koje razine, budući da i ona estetske naravi pretpostavljaju sanaciju, što kroz troškove stvara psihološki otpor stanovništva i nepovjerenje u sigurno izvođenje miniranja (S. Stanković, 2011). U idućem odjeljku bit će objašnjena norma za određivanje brzine oscilacija na stvarnom primjeru mjerenja seizmičkog utjecaja koje je obavljeno prilikom masovnog miniranja u kamenolomu Koromačno.

Tablica 7-1 Stupnjevi potresa - Medvedev

Stupanj potresa	Brzina oscilacija cm/sec	Karakteristika potresa
1.	< 0.2	Oscilacije mogu registrirati samo instrumenti
2.	0.2 - 0.4	Oscilacije se mogu osjetiti samo u potpunoj tišini
3.	0.4 - 0.8	Oscilacije mogu osjetiti osobe koje su obaviještene o miniranju
4.	0.8 - 1.5	Oscilacije osjećaju mnogi ljudi i pojavljuje se zveckanje
5.	1.5 - 3.0	Počinje osipanje žbuke; nastaju oštećenja na starijim zgradama
6.	3.0 - 6.0	Pojavljaju se veće pukotine u žbuci, oštećenja zgrada su lako uočljiva
7.	6.0 - 12	Pojavljaju se oštećenja na solidnijim zgradama; otpadaju komadi žbuke; nastaju tanke pukotine u zidovima i dimnjacima; počinje klizanje vodom zasićenog pjeskovitog tla; otpadanje nestabilnih blokova na strmim nagibima
8.	12 - 24	Nastaju znatna oštećenja zgrada; pojavljaju se velike pukotine u zidovima i konstrukcijama; dimnjaci se ruše; odvaljuje se žbuka; počinje obrušavanje kosina uz rub tetkonskih pukotina; u slabo vezanim stijenama nastaju trajne deformacije
9.	24 - 48	Zgrade se ruše; pojavljaju se velike pukotine u zidovima i stijenama; odronjavanje čvrstih kosina; obrušavanje rubnih dijelova slabo vezanih stijena i tla sa sistemom pukotina nepovoljno orijentirani
10.	48 - 96	Nastaju velika razaranja i rušenja zgrada; pojavljuju se pukotine u čvrstim stijenama; zarušavanje rubnih dijelova u slabovezanim srednje čvrstim stijenama; zarušavanje jamskih hodnika
11.-12.	>96	Znatna obrušavanja kosina u čvrstim stijenama

7.2 Terenska mjerenja

U sklopu ovog rada obavljena su dva seizmička mjerenja prilikom miniranja u kamenolomu Koromačno. Korištena oprema je geofon i prijemnik Instatel. Miniranja na kojima je obavljen nadzor izvedena su 28.06.2018 i 12.07.2019. Prvo mjesto opažanja nalazilo se pokraj autobusne stanice u centru naselja Koromačno. Drugo mjesto opažanja (Slika 7-4)

nalazilo se u blizini upravne zgrade, skladišta i mehaničarske radionice rudarskog odjela na udaljenosti od 350 metara do minskog polja.



Slika 7-4 Postavljeni geofon na mjestu opažanja broj 2

U tablici 7-2 prikazane su tehničke i mjerne značajke seizmografa koji je korišten pri terenskom mjerenju.

Tablica 7-2 Tehničke i mjerne značajke seizmografa Instantel

(<http://www.instantel.com/pdf/714b0063.pdf>)

Instantel BlastMate Series III	
Četvorokanalni	
Seizmički kanali x 3	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Maks.raspon	254 mm/s
Rezolucija	0,0159 mm/s
Akceleracija i pomak	proračun računalnom obradom
Pomak	0,00023-3,5 cm
Buka i zračni udar x 1	1024-16,384 uzoraka/s/kanal
Raspon	88-148 dB (linearni), 50-110 dB («A»)
Rezolucija	0,25 Pa (linearni), 0,1 dB («A»)
Obrada podataka	programski paket Instantel BlastWare III

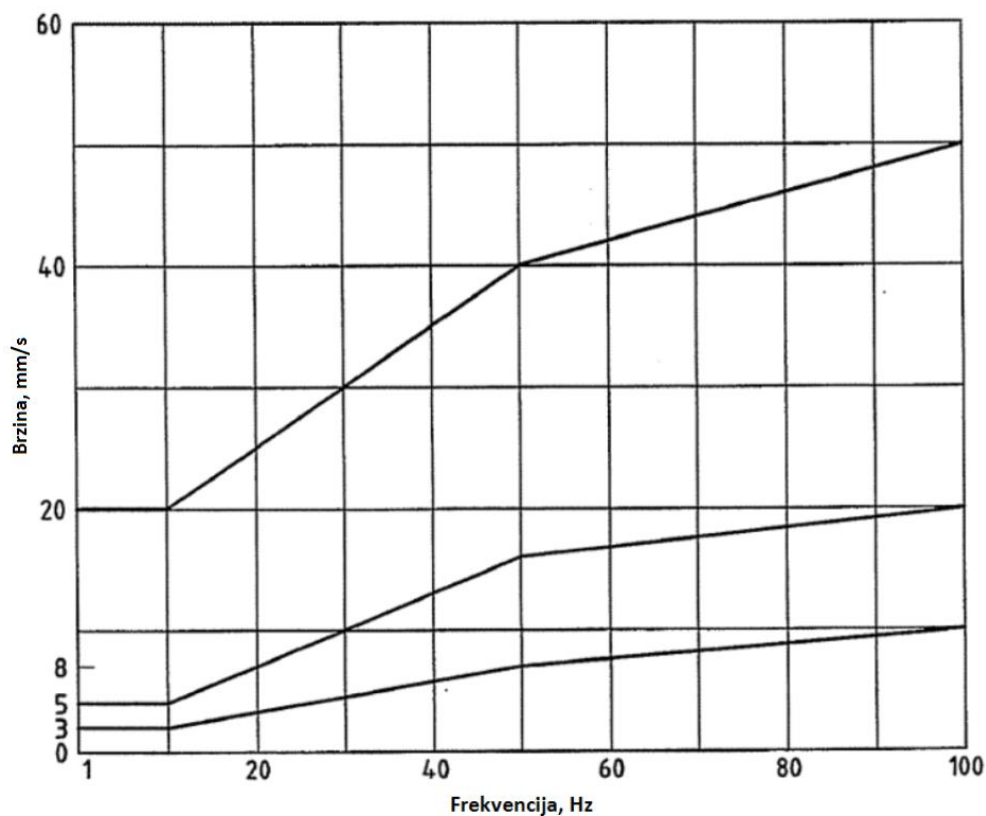
U svrhu dobivanja preciznijih i vjerodostojnijih rezultata, seizmograf je potrebno koristiti sukladno uputama proizvođača. Primjerice, potrebno je postaviti uređaj na približno horizontalnu podlogu koja ne smije biti nasipani materijal niti čvrsta stijena, zabiti ga u tlo dovoljnom silom da se spriječi ispadanje te postaviti strelicu na geofonu u smjeru minskog polja. Nakon što je uređaj propisno postavljen pristupa se podešavanju parametara koji će biti mjereni (raspon frekvencije seizmičkog vala, interval vremena, raspon pomaka).

Rezultati mjerenja obrađeni su sukladno normi HRN DIN 4150, službenoj normi u Republici Hrvatskoj, a odnosi se na štetne vibracije na građevinama koje mogu nastati posredstvom miniranja. Norma svrstava građevine u kategorije i propisuje za njih dopuštene brzine oscilacija koje se mijenjaju ovisno o frekvenciji seizmičkog vala. U tablici 7-3 prikazane su vrijednosti maksimalne brzine oscilacija koje ovise o frekvenciji za tri razreda objekata. Prvi razred objekata čine komercijalne zgrade i industrijske hale sličnih struktura. U drugi razred ubrajaju se stambene zgrade za privatnu uporabu dok se u trećem razredu nalaze objekti koji zbog svoje posebne osjetljivosti na vibracije ne spadaju u prvi i drugi razred, a potrebno ih je vrijedno čuvati (zaštićeni spomenici). Na slici 7-5 prikazan je dijagram graničnih vibracija tla po razredima objekata.

Tablica 7-3 Razredi objekata s dozvoljenim brzinama oscilacija

(prema HRN DIN 4150:2011)

Razred objekta	Vrsta građevine	Dozvoljene vrijednosti brzine oscilacija mm/s			
		Temelj			Najviši kat objekta
		< 10 Hz	10-15 Hz	50-100 Hz	Sve frekvencije
1	Dvorane, seizmički građeni objekti	20	20-40	40-50	40
2	Stambene građevine	5	5-15	15-20	15
3	Spomenični objekti	3	3-8	8-10	8



Slika 7-5 Dijagram graničnih vrijednosti brzine vibracija u ovisnosti o frekvenciji vala (HRN DIN 4150:2011)

Prije obavljanja mjerenja potrebno je pregledati teren i zabilježiti objekte koji se nalaze u blizini eksploatacijskog polja. U blizini sjeverne granice polja nalazi se objekt koji je zaštićen od strane Regionalnog zavoda za zaštitu spomenika kulture što ga svrstava u treći razred za koji su propisane najstrože vrijednosti oscilacija. Nadalje, zapadno od eksploatacijskog polja nalazi se naseljeno mjesto sa mnogo stambenih objekata u kojem boravi velik broj ljudi. Također, u sklopu tvornice nalaze se industrijski objekti koji su od velike važnosti za proizvodnju i preradu mineralne sirovine. Stoga se prilikom svakog miniranja potrebno pridržavati svih projektiranih parametara i dozvoljene količine eksploziva po stupnju paljenja kako bi se spriječilo nastajanje mogućih oštećenja.

Na slici 7-6 prikazan je izvještaj mjerenja seizmičkog utjecaja s mjesta opažanja broj jedan s datumom 28.06.2018. Mjereni podaci prikazuju maksimalnu vrijednost brzina oscilacija za svaku vrstu vala (transverzalni, vertikalni i longitudinalni) sa odgovarajućom frekvencijom, maksimalnu akceleraciju i pomak tla. Zadnji podatak odnosi se na maksimalnu vrijednost brzine oscilacije tla (engl. *Peak Vector Sum*) koji je dobiven vektorskim zbrojem tri seizmička vala u istom trenutku. Također, na grafu je vidljivo da ni

u kojem trenutku nisu premašene dozvoljene granice oscilacija (maksimalna vrijednost iznosi 2,397 mm/s zabilježene nakon 0,134 s od iniciranja polja) te je većina frekvencija u intervalu od 20 do 40 Hz stoga možemo zaključiti da je miniranje propisno projektirano i obavljeno.

Slika 7-7 prikazuje seizmički izvještaj s drugog mjesta opažanja unutar eksploatacijskog polja s datumom miniranja 12.07.2019. Na izvještaju dominiraju niže frekvencije potresnih valova te maksimalna brzina oscilacija od 2,486 mm/s zabilježena 0,256 s od trenutka iniciranja polja. Također, iz navedenih podataka zaključujemo da je miniranje obavljeno po pravilima struke bez mogućnosti oštećenja.

Date/Time Long at 10:15:06 June 28, 2018
 Trigger Source Geo: 1.000 mm/s
 Range Geo: 254.0 mm/s
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps
 Operator/Setup: Operator/factory.mmb

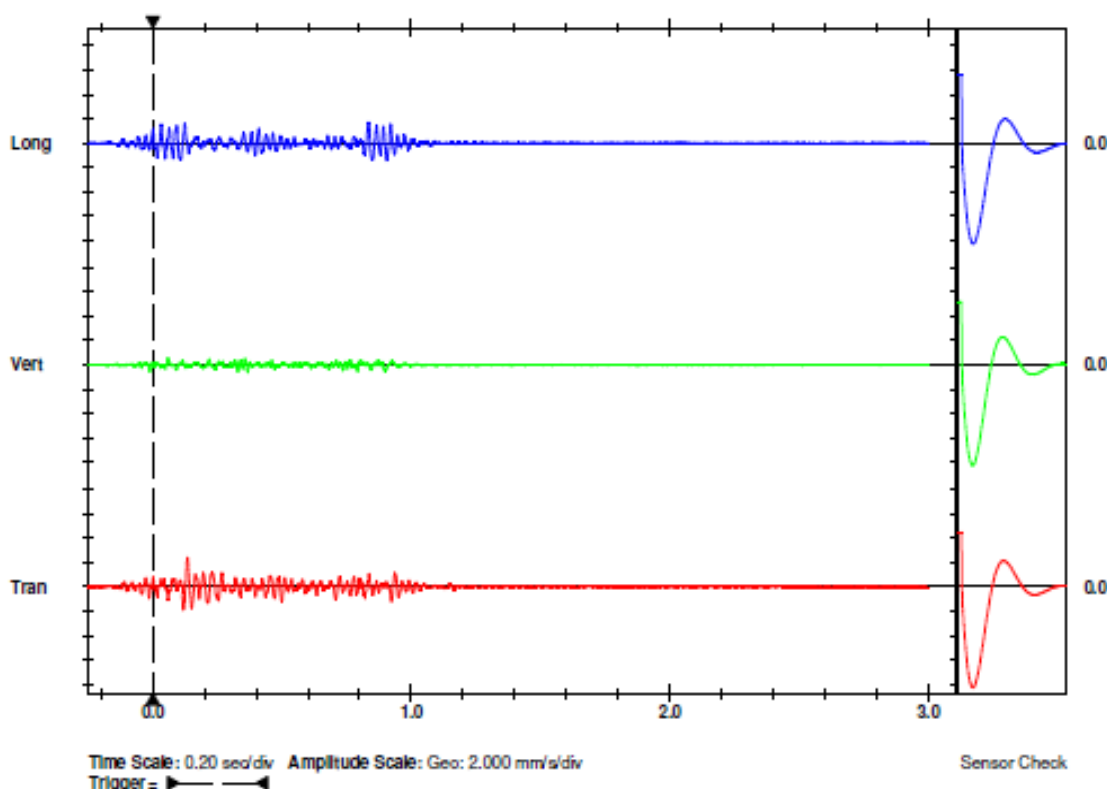
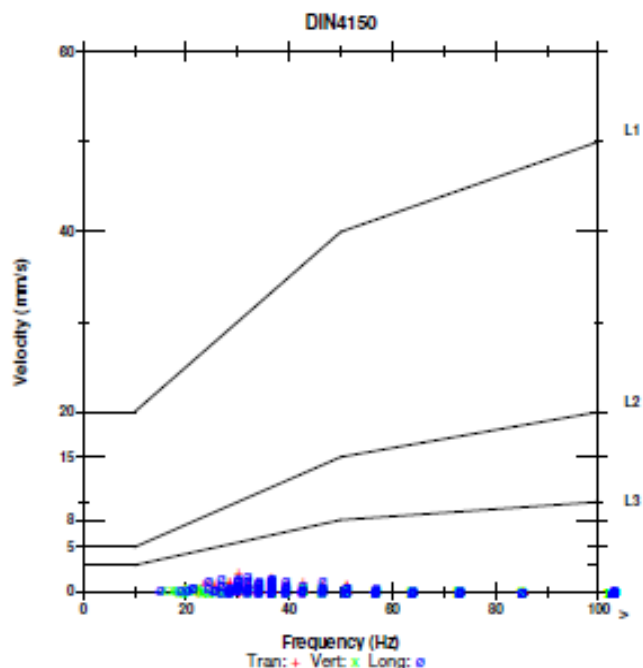
Serial Number UM11448 V 10-87 Micromate DIN
 Battery Level 3.7 Volts
 Unit Calibration April 26, 2018 by RGN Zagreb
 File Name _TEMP.EVT

Notes

Location: Koroma no
 Client: Hokim d.o.o.
 User Name:
 General:

	Tran	Vert	Long	
PPV	2.396	0.831	1.687	mm/s
ZC Freq	30	51	32	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.134	0.367	0.835	sec
Peak Acceleration	0.082	0.028	0.088	g
Peak Displacement	0.011	0.003	0.008	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.7	7.1	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.6	4.2	

Peak Vector Sum 2.397 mm/s at 0.134 sec



Printed: July 26, 2018 (V 10.74)

Form © 1995-2015 Xmark Corporation

Slika 7-6 Izvještaj seizmičkog mjerenja 28.06.2018.

Date/Time Long at 09:57:23 July 12, 2019
 Trigger Source Geo: 1.000 mm/s
 Range Geo: 254.0 mm/s
 Record Time 3.273 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps
 Operator/Setup: Operator/koromacno.mmb

Serial Number UM11448 V 10-87 Micromate DIN
 Battery Level 3.6 Volts
 Unit Calibration April 12, 2019 by RGN Zagreb
 File Name TEMP.EVT
 Scaled Distance 47.7 (270.0 m, 32.0 kg)

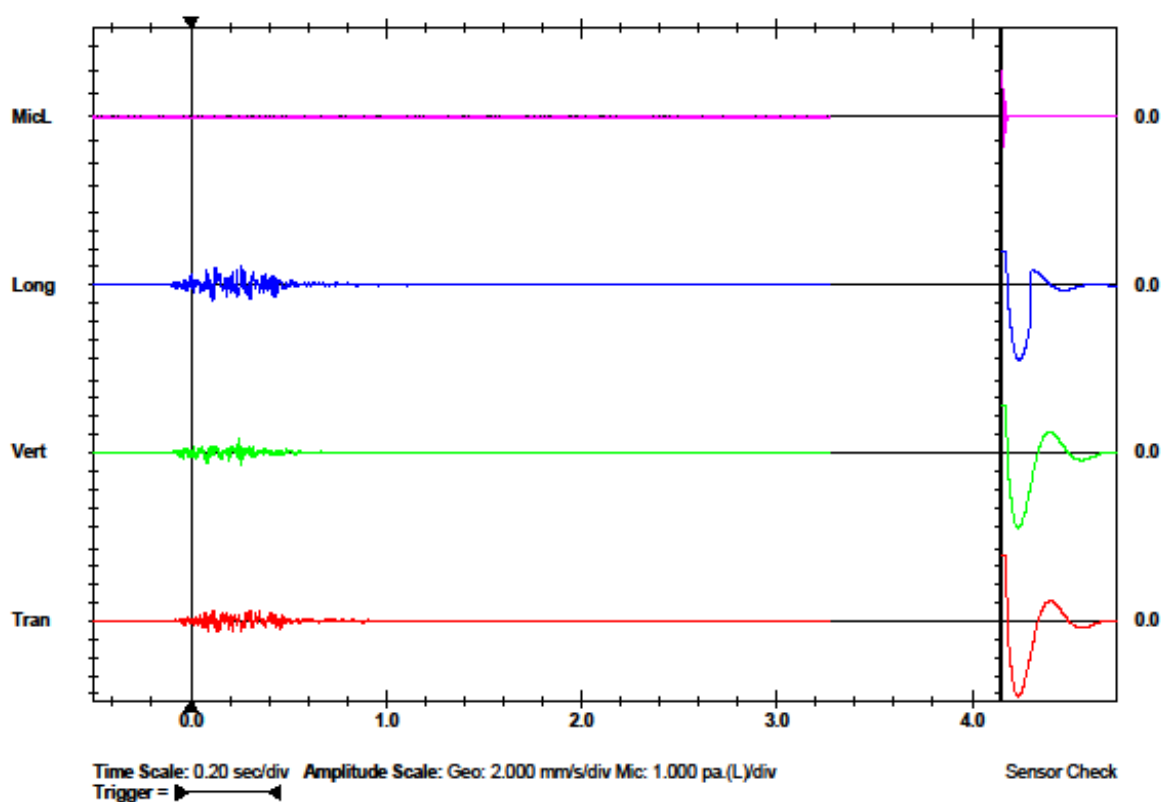
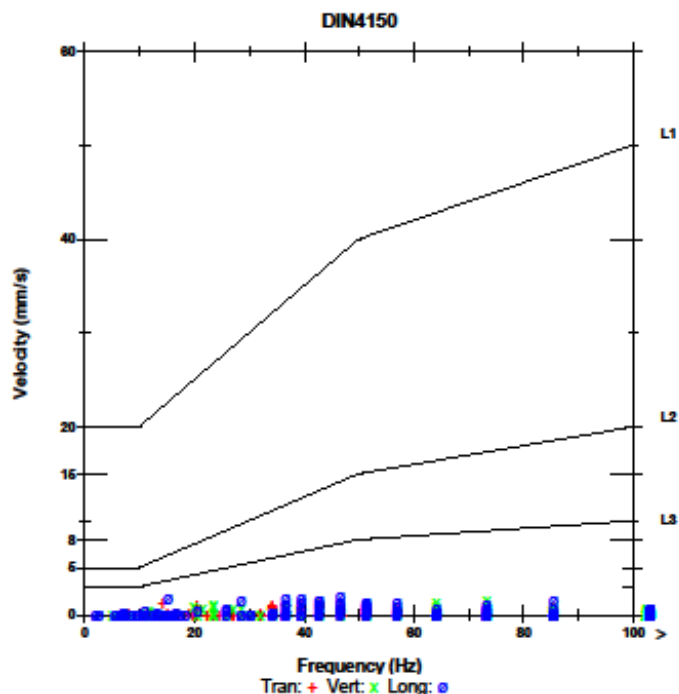
Notes

Location: Koromacno
 Client: Holdim d.o.o.
 User k: Holdim d.o.o.
 General:

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L)
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mw)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.222	1.584	2.081	mm/s
ZC Freq	14	73	47	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.304	0.249	0.257	sec
Peak Acceleration	0.081	0.077	0.118	g
Peak Displacement	0.010	0.007	0.014	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Check	
Frequency	7.5	7.5	10.1	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.7	5.2	

Peak Vector Sum 2.486 mm/s at 0.256 sec
 N/A: Not Applicable



Na temelju rezultata sa terenskih mjerenja, također će biti prikazani i teorijski proračuni za predviđanje maksimalnih brzina oscilacije i maksimalnog pomaka. Sukladno engl. *18th Edition Blasters' Handbook* pristupa se proračunu svedene udaljenost koja objedinjuje dva glavna parametra miniranja udaljenost i energiju eksploziva.

Svedena udaljenost dobiva se pomoću sljedećeg izraza:

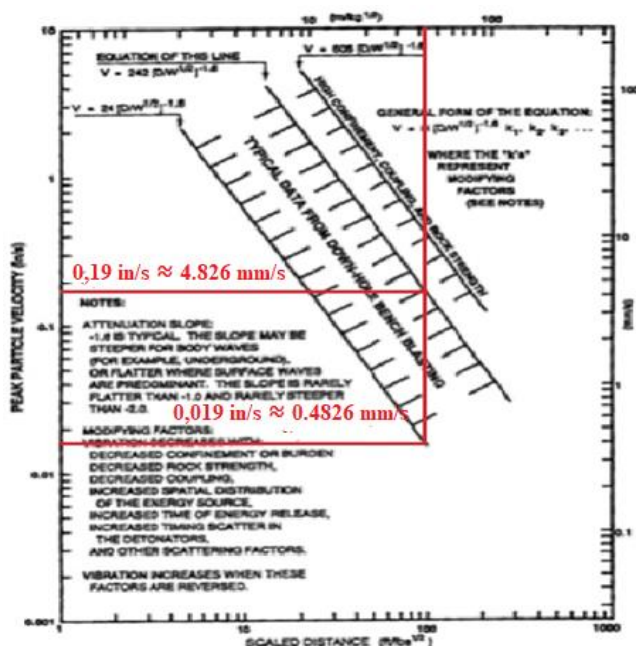
$$SD = \frac{R}{\sqrt{Q}} = \frac{350}{\sqrt{118,97}} = 32,09 \text{ m/kg}^{1/2} \quad (7-8)$$

gdje je:

R – udaljenost lokacije od minskog polja (m)

Q – maksimalna količina eksploziva koja detonira trenutno (kg).

Na slici 7-8 prikazan je iscrtan dijagram sa rasponom predviđenih brzina oscilacija na temelju vrijednosti svedene udaljenosti. Gornja granica oscilacija iznosi 0,19 in/s $\approx$ 4.826 mm/s, dok je donja granica oscilacija iznosi 0,019 in/s $\approx$ 0.4826 mm/s. Usporedimo li rezultate s terenskim mjerenjima možemo zaključiti da se stvarna izmjerena vrijednost od 2,486 mm/s nalazi u intervalu koji je određen grafičkom metodom. Na temelju stvarne izmjerene brzine oscilacije (2,486 mm/s = 0,2486 cm/s), prema Medvedevu, bit će izazvan drugi stupanj potresa čije će se oscilacije moći osjetiti samo u potpunoj tišini.



Slika 7-8 Dijagram predviđenih brzina oscilacija tla

Za određivanje brzina oscilacija prema Sadowskovom proračunu potrebno je izračunati koeficijente načina miniranja i koeficijent prigušivanja seizmičkih valova na putu širenja. Traženi koeficijenti određuju se probnim miniranjima te bilježenjem brzina oscilacija na dva različita mjesta. Godine 1999. prema elaboratu o miniranju za eksploatacijsko polje Koromočano izračunate su vrijednosti tih koeficijenata:

- koeficijent načina miniranja $k = 252,30587$
- koeficijent prigušivanja seizmičkih valova $n = 1,41337$.

Teorijski predviđene brzine oscilacija na temelju ovih koeficijenata su:

$$v = k * \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n = 252,30587 * \left(\frac{\sqrt[3]{118,97}}{350} \right)^{1,41337} = 0,60814 \text{ cm/s} \quad (7-9)$$

gdje je:

v – brzina oscilacija (cm/s)

k – koeficijent načina miniranja

n – koeficijent prigušivanja seizmičkih valova na putu širenja

Q – količina eksplozivnog punjenja koja je aktivirana istovremeno (kg)

R – udaljenost mjesta opažanja od minskog polja (m).

Usporedbom teorijski proračunatih rezultata s terenskim mjerenjima vidljivo je neznatno odstupanje u vrijednostima. S obzirom na odmak od 20 godina od posljednje izmjerenih koeficijenata izvjesno je da je došlo do promjene unutar određenih parametara. Određivanjem novih koeficijenata novim probnim poljem moglo bi se približiti današnjim vrijednostima stvarnih brzina oscilacija.

8. Proizvodnja cementa

Cement su sva hidraulična veziva tj. veziva koja stvrdnjavaju i vežu u dodiru s vodom. Kao mineralno vezivo, cement se najčešće koristi u građevinarstvu. Služi za povezivanje agregata prilikom proizvodnje morta i betona. Prema mineralnom sastavu cementi se dijele na silikatne i aluminatne cimente. Aluminatni cementi kao glavni mineral sadrže kalcijeve aluminate dok silikatni cementi sadrže silikate. Prema sastavu, silikatni cementi dijele se u nekoliko podgrupa koje su niže navedene:

- čisti Portland cement
- Portland cement s dodacima
- bijeli cement
- metalurški cement
- miješani cement
- pucolanski cement

Cemente prema namjeni možemo podijeliti na opće ili specijalne cimente. U opće cimente spada većina silikatnih cemenata dok u cimente posebne namjene spadaju sulfatno otporni cementi, aluminatni cementi, cementi niske toplinske hidratacije te bijeli cement.

8.1. Proizvodnja cementa u postrojenju Koromačno

Tijekom proizvodnje cementa nužno je proći nekoliko faza. Odmirana sirovina dumperima se transportira do postrojenja za oplemenjivanje gdje započinje proces proizvodnje klinkera. U pogonu postavljena je udarno rotacijska drobilica - čekićara (Slika 8-1). Materijal se iz kamenoloma usitnjava mehaničkom energijom čekića drobilice koje su spojene na bubanj koji rotira vrlo velikom brzinom. Ispred drobilice instaliran je dozator koji sprječava da prevelika količina materijala uđe u proces drobljenja te lančane zavjese koje onemogućavaju odbijanje materijala izvan bubnja. Materijal se šprica vodenim mlaznicama kako bi se spriječilo nastajanje prašine. Drobljeni kamen se usitnjava od veličine odmiranog materijala na veličinu od 0 do 80 mm.



Slika 8-1 Drobnica

Drobljeni materijal dalje se transportira transportnom trakom do deponije gdje se na različitim mjestima skladište magro i grašo. Tako skladišteni materijal je spreman za proces mljevenja i sušenja u mlinu sirovine (Slika 8-2).



Slika 8-2 Transportna traka s deponijom

U posebnom omjeru koji je dobiven na temelju kemijske analize dozira se količina magra i graša na način da ukupni stupanj zasićenja kalcijevim karbonatom (CaCO_3) iznosi 96 - 99 % (Slika 8-3). U sirovinu se dodaju korektivni materijali za postizanje željenih vrijednosti kemijskog sastava i omjera ključnih oksida. Tako se dodatkom željezne rude korigira aluminatni modul (AM , vidi formulu 8-3), dok kvarcni pijesak služi za korekciju silikatnog modula (SM , vidi formulu 8-2). Materijal se zatim dovodi u vertikalni mlin gdje se melje i suši. Masivni valjci smješteni su iznad rotacionog stola i na taj način se gruba frakcija materijala usitnjava do mjere (<100 mikrona) da struja zraka odnosi materijal u silos homogenizacije (Slika 8-4). Protokom količine zraka određuje se veličina čestica koja izlazi iz mlina. Vrećasti filteri sastoje se od filtarskih elemenata izrađenih od tekstilnih materijala koji uklanjaju čestice materijala iz plinove peći. Ispušni plinovi iz peći više se puta koriste u proizvodnji prije ispuštanja u atmosferu. Primjerice, koriste se za sušenje i predgrijavanje sirovinskih materijala te se na taj način povećava energetska učinkovitost tvornice.



Slika 8-3 Dozator



Slika 8-4 Mlin sirovine

Samljeveni materijal dodatno se miješa kako bi se dobila homogena smjesa traženih karakteristika i kemijskog sastava prije ulaska u peć (Slika 8-5). Prije ulaska u peć sirovina prolazi kroz izmjenjivače topline. Na vrhu temperatura je oko 380 °C dok je na izlasku iz zadnjeg para ciklona, neposredno prije ulaska u peć oko 830 °C. Ovom izvedbom povećana je energetska učinkovitost. Naime, materijal je već djelomično kalciniran prije ulaska u rotacionu peć koja je iznutra obložena ciglom otpornom na visoke temperature. Peć ima duljinu 64,4 m i promjer 4,0 m, pod kutom nagiba od 1,57° te je projektirana tako da se maksimalno iskoristi i preda energija izgaranja goriva (Slika 8-6). U rotacionoj peći temperature dostižu 1500 °C te se formiraju umjetni minerali alit, belit, aluminat i ferit koji formiraju klinker. Kemijske reakcije koje se pritom događaju su kalcinacija, evaporacija elatila, sinteiranje, taljenje, raspadanje te formiranje minerala. Kalcinacija je termalna obrada mineralne sirovine pri temperaturi koja ne dostiže temperaturu taljenja, a provodi se u svrhu evaporacije volatila, redukcije, oksidacije i raspadanja (npr. kalcinacijom kalcijeva karbonata ispušta se ugljikov dioksid a nastaje kalcijev oksid – živo vapno). Sintetiranje je postupak stvaranja privlačnih sila između čestica uslijed djelovanja visoke temperature koja također ne dostiže temperaturu taljenja. Plamenik peći sagorijeva energent koji se sastoji od mješavine energetskog ugljena i petrol koksa (tradicionalno gorivo), dok se od zamjenskih goriva koriste gorivi otpad, osušeni mulj s pročištača otpadnih voda, otpadna maziva ulja, emulzije, zauljena voda i mesno koštano brašno. Koriste se i stare gume, koje su ujedno jedino gorivo koje se dodaje na ulaznoj strani peći.



Slika 8-5 Izmjenjivači topline



Slika 8-6 Rotaciona peć

Cementni klinker hladi se čim brže zrakom koji se upuhuje ventilatorima velikog kapaciteta kako bi se zadržala kristalna struktura novonastalih minerala. Kalcijevi silikati, aluminati i aluminoferiti tvore četiri najzastupljenija minerala u klinkeru: alit, belit, aluminat i ferit. U klinkeru pronalazimo minerale kalcijev oksid, silicijev oksid, željezov oksid i aluminijev oksid. Zagrijani zrak koji hladi klinker ponovno se vraća u prethodne procese proizvodnje. Nakon hlađenja klinker se skladišti u silosu klinkera kapaciteta 50 000 t te se po potrebi dozira za mljevenje u cement (Slika 8-7).



Slika 8-7 Silos klinkera

Završna faza proizvodnje cementa sastoji se od mljevenja klinkera s određenim dodacima. Iz silosa se klinker transportira do valjkaste preše koja predstavlja prvi stupanj usitnjavanja gdje se dodaje troska, vapnenac i gips. Nakon toga, materijal odlazi u mlin cementa gdje se usitjenom materijalu dodaje filtarska prašina i leteći pepeo. Ovisno o proizvodnji određene vrste cementa doziraju se pojedine komponente u točno određenom omjeru i sastavu sukladno normi HRN EN 197-1 (Cement-1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene).

8.2. Proizvodnja specifičnih vrsta cementa

Niže navodimo vrste cementa i njihovih dodataka kako su definirane u (D. Vrkljan i M. Klanfar, 2010).

Čisti portland cement sastoji se od minerala klinkera i dodatka gipsa. Međusobni odnos glavnih minerala u klinkeru određuje svojstva cementa. Stoga se sastav sirovine podešava tako da se dobije klinker s određenim udjelom glavnih minerala i na taj način se reguliraju svojstva te proizvode cementi s izraženom ranom čvrstoćom, niskom toplinom hidratacije ili otpornošću na sulfate i kiseline.

Portland cement s dodacima proizvodi se mljevenjem običnog portland klinkera uz dodatak gipsa te dodatak do 35% troske, pucolana (leteći pepeo, silicijska prašina, pečeni škriljac) ili vapnenca. Ovaj cement je svojstvima sličan portland cementu ali dodatak troske ili pucolana snižava toplinu hidratacije pri vezanju betona i povećava otpornost na sulfate, dok dodatak vapnenca smanjuje propusnost betona. Ovakvi cementi se proizvode uz dodatak jedne komponente ili njihove mješavine.

Metalurški cement, pucolanski cement i miješani cement se proizvode mljevenjem portlandskog klinkera uz dodatak više od 35% troske, pucolana ili njihove mješavine. Ovi cementi imaju nisku toplinu hidratacije i izrazitu otpornost na kemijske utjecaje.

Bijeli cement je prema sastavu čisti portland cement, ali se klinker proizvodi iz vapnenaca visoke čistoće i kaolina (gline) bijele boje odnosno sirovine sa vrlo malim udjelom željezovih spojeva (Fe_2O_3) koji inače daju boju običnom portland cementu. Mljevenje ovog klinkera se vrši u mlinovima s porculanskim kuglama i oblogom, kako čestice trošenja mlina ne bi bojale cement. Uz čvrstoću, važno svojstvo je njegova bjelina koja povećava dekorativnost betonskih konstrukcija.

Također, prema istim autorima, kontrola kvalitete cementa temelji se na modulima koji izražavaju omjere glavnih oksida u klinkeru.

Hidraulični modul je omjer kalcijeva oksida CaO naspram ostalih glavnih oksida, a kreće se od 1,7 do 2,2.

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (8-1)$$

Silikatni modul definira omjer silicijeva oksida SiO_2 prema aluminijevom oksidu Al_2O_3 i željezovom oksidu, Fe_2O_3 i kreće se od 1,7 do 3,5.

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (8-2)$$

Aluminatni modul je omjer aluminijeva oksida Al_2O_3 i željezova oksida Fe_2O_3 i kreće se od 1,5 do 2,4.

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (8-3)$$

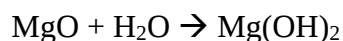
Stupanj zasićenja računa se prema formuli

$$SZ = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (8-4)$$

a mora biti između 96 i 99%. Također, to je najvažniji modul jer pokazuje udio kalcijeva oksida CaO koji će se, u normalnom procesu pečenja i hlađenja klinkera, vezati za ostale glavne okside tvoreći minerale klinkera. Idealna vrijednost stupnja zasićenja je 100%, međutim u procesu proizvodnje ona se postiže samo približno.

Dok udio glavnih oksida u sirovinskoj mješavini određuje formiranje minerala klinkera i slobodnog vapna CaO , sporedni sastojci mogu imati negativan utjecaj na svojstva cementa.

Magnezijev oksid MgO javlja se u kristalnom ili amorfnom obliku. Amorfni magnezijev oksid odmah hidratizira i nema posebnog štetnog djelovanja na svojstva očvrslag cementa. Nastaje pri naglom hlađenju klinkera i u cementu ga smije biti do 5%. Kristalni magnezijev oksid teško je topiv u vodi i sporo hidratizira. U količini do 1% ugrađuje se u kristalnu rešetku glavnih cementnih minerala, a ostatak hidratizira nakon očvršćavanja cementa.



Nastali hidroksid ima povećani volumen, što izaziva unutarnja naprezanja i pukotine u očvrslj masi. Ovaj efekt se manifestira kao nepostojanost volumena betona i stoga standardi ograničavaju ukupni sadržaj magnezijeva oksida u cementu na najviše 5%.

Kalcijev oksid CaO iako je normalni sastojak cementa, može imati štetno djelovanje. Sirovine za cement nije moguće idealno miješati i homogenizirati. Zato preostaje dio kalcijeva oksida koji se pri pečenju ne veže u cementne minerale i naziva se slobodno vapno. Ono nastaje na višoj temperaturi nego pri proizvodnji građevinskog vapna i stoga se naziva prepečenim. Hidratizira vrlo sporo i to u očvrsлом cementnom kamenu. Izaziva nepostojanost volumena betona, jednako kao i magnezijev oksid. Opasnost od volumena se izbjegava ako je udio slobodnog vapna u cementu manji od 2%.

Alkalije, natrijev oksid Na_2O i kalijev oksid K_2O u kontaktu sa vodom gotovo trenutno prelaze u hidrokside, natrijev hidroksid NaOH i kalijev hidroksid KOH . U dužem kontaktu sa zrakom, koji uvijek ima nešto vlage i ugljičnog dioksida CO_2 , najprije vežu vlagu, a zatim i ugljični dioksid te prelaze u karbonate. Natrijev i kalijev karbonat Na_2CO_3 i K_2CO_3 ubrzavaju vezanje cementa te mogu izazvati lažno vezanje, što je štetna pojava. U gotovom betonu, u kontaktu s agregatom, alkalije mogu izazvati alkalno-silikatnu reakciju. Osim toga, alkalije iz cementa spadaju u jake lužine, vodena otopina koja je komponenta cementne paste, oštećuje sve organske tvari pa tako može i nagristi kožu.

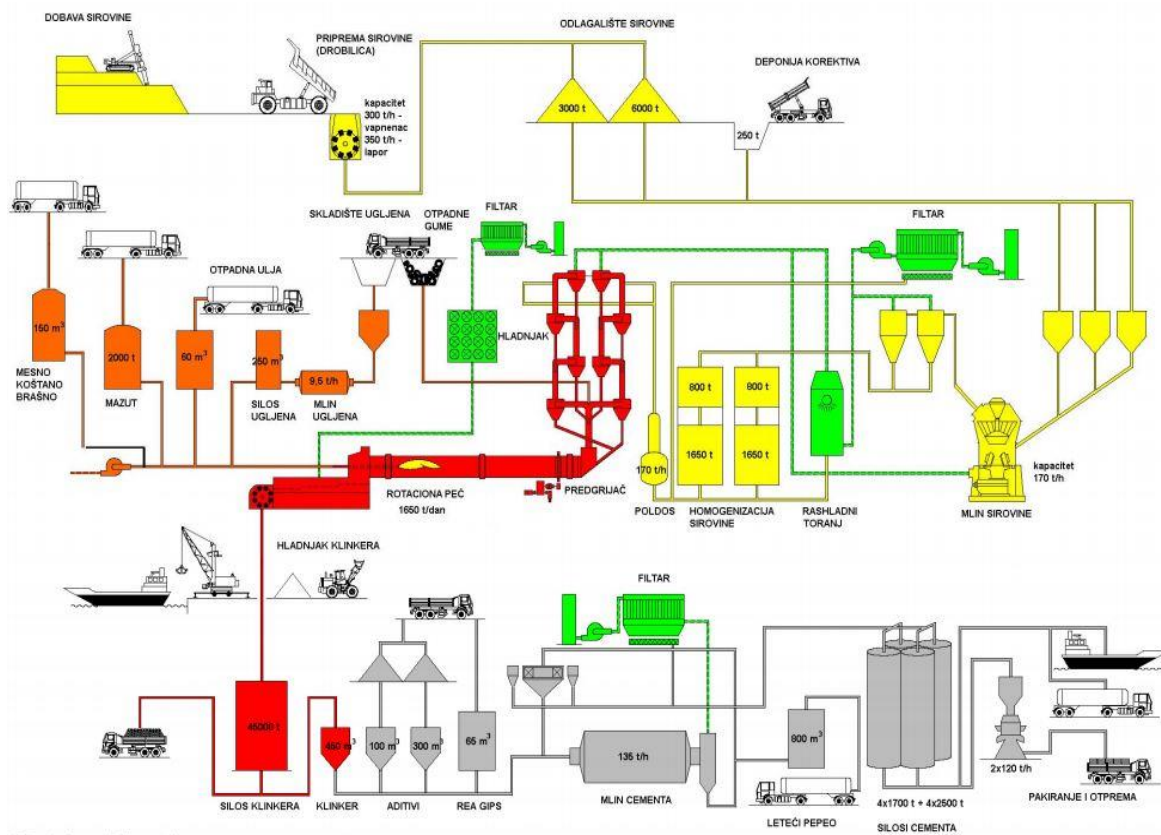
Alkalno-silikatna reakcija je najviše izražena vrsta alkalno-agregatne reakcije, koja se javlja između agregata betona i alkalija koje sadrži cement. Ako agregat sadrži silicijev dioksid SiO_2 u amorfnom obliku, u očvrsлом betonu može doći do ovakve reakcije, pri čemu novonastali spojevi imaju veći volumen nego spojevi koji su ušli u kemijsku reakciju. Na taj način nastaju unutarnja naprezanja, što dovodi do pukotina u betonu. Alkalno-silikatna reakcija nastaje ako cement sadrži više od 0,5% alkalija i ako je beton izložen vlazi. Ova reakcija može se spriječiti upotrebom niskoalkaličnog cementa (sirovine sa niskim udjelom alkalija) ili dodavanjem pucolana koji sadrži amorfnog silicijev dioksid. Fino mljeveni pucolani reagiraju s alkalijama dok je beton svjež, što nije štetno.

Druga vrsta alkalno-agregatne reakcije je alkalno-dolomitna. Manje je izražena, a javlja se ako agregat sadrži reaktivni dolomitni vapnenac i na temperaturama iznad $30\text{ }^\circ\text{C}$. Posljedice su jednake kao kod alkalno-silikatne reakcije.

Ostali oksidi poput fosfor(V)oksida P_2O_5 , titanijevog dioksida TiO_2 i barijeva oksida BaO mogu biti prisutni u manjim količinama. Iako se smatraju štetnim primjesama, nije zabilježeno štetno djelovanje ovih oksida na svojstva cementa.

Na slici 8-8 vidljiva je automatizacija proizvodnog procesa po segmentima. Na shemi je jasno prikazano stanje svakog procesa koji sudjeluje u proizvodnji klinkera. Operateri vrše

konstantni monitoring i podešavanje potrebnih parametara kako bi se zadovoljila kvaliteta proizvoda i proizvodnog procesa.



Slika 8–8 Procesni dijagram toka

([https://mzoe.gov.hr/UserDocsImages//Okoli%C5%A1na%20dozvola/OUZO-postoje%C4%87e//Tehnicko-tehnolosko_rjesenje_\(holcim\).pdf](https://mzoe.gov.hr/UserDocsImages//Okoli%C5%A1na%20dozvola/OUZO-postoje%C4%87e//Tehnicko-tehnolosko_rjesenje_(holcim).pdf))

9. Zaključak

LafargeHolcim grupacija jedan je od najvećih proizvođača u cementnoj industriji. Proizvodnji klinkera kao osnovi za proizvodnju cementa pristupa se odgovorno i pedantno kako bi se zadovoljila kvaliteta proizvoda prema svim standardima i propisima za zahtjeve tržišta. Kemijske analize izvode se tijekom samog bušenja minskih bušotina zbog određivanja odgovarajućih stupnjeva zasićenja kalcijevim karbonatom što doprinosi kvalitetnijoj i homogenijoj ulaznoj mineralnoj sirovini. Svako miniranje provodi se na temelju izrađenog elaborata koji sadržava točne podatke o svakoj bušotini, skicu bušotina s odgovarajućim stupnjem usporenja, pažljivo projektirane količine eksplozivnog punjenja. Iniciranje polja provodi se za vrijeme povoljnih atmosferskih prilika uz poštivanje svih zakonom propisanih postupaka vezanih za eksplozive. Štetni utjecaji miniranja poput razbacivanja odminiranog materijala, zračnog udarnog vala, seizmičkog utjecaja, nedetoniranog eksploziva svedeni su na minimum. Provedenim terenskim mjerenjima seizmički utjecaj miniranja u vidu brzine oscilacija tla zadovoljava sve propisane norme što potvrđuje da je projektiranje i iniciranje minskog polja obavljeno na vrhunskoj razini poštujući sva pravila struke.

10. Literatura

1. Berta, G. 1990. *Explosives: An engineering tool*, Italesplosivi-Milano
2. Birch., W.J. i White, T.J. 2013. *The development of a trivariate statistical blast vibration model that seeks to respect both the difference between types of seismic waves and their attenuation rates*
3. Braile, L. *Seismic Wave Demonstrations and Animations*.
URL: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm> (15.12.2019.)
4. Dopunski rudarski projekt o eksploatacijskom polju „Koromačno“ 2006, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb
5. EKONERG d.o.o. 2013. *Tehničko-tehnološko rješenje za postojeće postrojenje Holcim (Hrvatska) d.o.o., proizvodnja cementa Koromačno*
URL: [https://mzoe.gov.hr/UserDocsImages//Okoli%C5%A1na%20dozvola/OUZO-postoje%C4%87e//Tehnicko-tehnolosko_rjesenje_\(holcim\).pdf](https://mzoe.gov.hr/UserDocsImages//Okoli%C5%A1na%20dozvola/OUZO-postoje%C4%87e//Tehnicko-tehnolosko_rjesenje_(holcim).pdf) (8.1.2020.)
6. European Shotfirer Standard Education for Enhanced Mobility. 2010. *Work Package 6 Blasting theory*, Univerzita Pardubice
URL: <http://nff.no/wp-content/uploads/2016/03/06.01-Blasting-theory-page-1-376.pdf> (10.1.2020.)
7. HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2013. HRN DIN 4150:2011. Vibracije u građevinama
8. Instatel Micromate: *Specifications*. URL: <https://www.instantel.com/products/micromater> (15.12.2019.)
9. International society of explosives engineers, 2016. *The Blasters' Handbook 18th Edition*
10. Krsnik, J. 1989. *Miniranje*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
11. Singh, P.K., Sinha, A. 2012. *Rock fragmentation by blasting Fragblast*, 10 proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, New Delhi, India
12. Stanković, S. 2011. *Određivanje ovisnosti brzina oscilacija tla o parametrima miniranja*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb

13. Vrkljan, D., Klanfar, M. 2010. *Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina: Cementne sirovine*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb
14. Wyssession, M., Stein, S. 2005. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*