

Projekt »Ekološki usmjeren otkopavanje sirovina« financiran od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske

PLANIRANJE I POČETNA ISKUSTVA PODZEMNOG OTKOPAVANJA ARHITEKTONSKO-GRAĐEVNOG KAMENA U ISTRI

Ivan COTMAN¹⁾ i Slavko VUJEC²⁾

¹⁾ »Kamen« d.d., Trg slobode 2, HR-52000 Pazin, Hrvatska

²⁾ Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Arhitektonsko-građevni kamen, Podzemno otkopavanje, Komorno stupna metoda otkopavanja, Dimenzioniranje stupova i komora, Numeričko modeliranje

Nakon provedenih istraživanja i projektiranja započelo je podzemno otkopavanje arhitektonsko-građevnog kamena u Istri. Na taj način se uz ekonomske razloge u znatnoj mjeri rješavaju i sve utjecajni ekološki zahtjevi. Prezentirani su rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem. Tehnički i ekonomski rezultati pokusnog podzemnog otkopavanja su ohrabrujući. Iznose se rezultati novih proračuna i korigiranih dimenzija komora i stupova.

Key-words: Dimension stone, Underground exploitation, Room and pillar mining method, Room and pillar design, Numerical modeling

After investigation and designing started underground exploitation of dimension stone in Istria (Croatia). On this way parallel with economical reasons, the most part of very aggressive environmental requirements will be solved.

The results of numerical modeling, for design purposes, are present. New numerical models and results, with corrected dimensions of rooms and pillars, are described. Obtained, technical and economical, results of experimental underground exploitation are encouraging.

Uvod

Eksploatacija arhitektonsko-građevnog ili prirodnog kamena na području Istre datira još iz dalekih rimskih vremena i traje sve do danas. Tradiciju ove eksploatacije u Istri nastavlja tvrtka KAMEN iz Pazina. Ova specifična grana rudarenja doživjela je u zadnjih nekoliko desetaka godina intenzivan razvoj.

Uvođenjem specijalnih alata s vidia i dijamantnim zubima na radne organe strojeva za dobivanje, povećala se brzina rezanja a s time i vađenja te obrade kamenih blokova. Ovakav razvoj tehnike i tehnologije doveo je i do toga da su se postojeća ležišta počela brže eksploatirati. Površinski i podzemni kopovi se šire i produbljuju, kako bi se moglo zadovoljiti povećane zahtjeve tržišta za blokovima.

Razvoj sredstava za eksploataciju omogućio je intenzivniju eksploataciju eruptivnih stijena. Međutim, potražnja i prodaja blokova eruptivnog kamena zadnjih se godina polako smanjuje i ponovo se povećavaju zahtjevi za mramorima, vapnencima, pješčenjacima i sl.

S bogaćenjem društva u pojedinim državama i željom za izgradnjom novih monumentalnih građevina i očuvanjem i restauracijom povijesnih spomenika, crkava i trgova, rastu zahtjevi za velikim količinama arhitektonsko-građevnog kamena, tako da kamenolomi povećavaju iz dana u dan kapacitete.

Povećanje kapaciteta kod slojevitih vapnenaca, gdje su debljine slojeva pogodne za dobivanje svega nekoliko metara, znači širenje postojećih kamenoloma i otvaranje novih, čime dolazi do sukoba s lokalnim stanovništvom i zaštitarima prirode.

Uz zahtjeve struke i tržišta nužne za razvoj rudnika društvo sve oštrije postavlja zahtjeve koji se odnose na očuvanje sredine u kojoj živimo. Otvaranje kamenoloma se, svakako, ne »uklapa« u ove zahtjeve. Zadnjih godina postajemo svjedoci koliko je teško dobiti koncesiju za eksploataciju na novom, ili za proširenje postojećeg otkopnog polja. Ukoliko se ona i dobije, zahtjevi kojima se mora udovoljiti toliko su strogi da često dovode u

pitanje i isplativost cijelog projekta. Prema tome, otvaranje novih »rana« u postojećim krajolicima postajati će sve teže i teže.

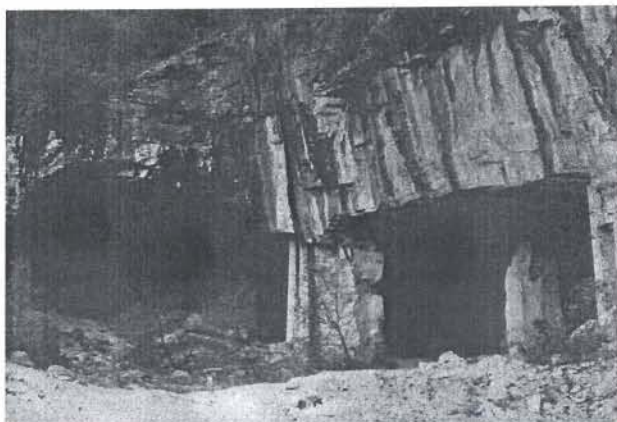
Da bi se udovoljilo ovim zahtjevima proizvođači arhitektonsko građevnog kamena krenuli su tražiti rješenja u nekoliko smjerova i to:

- postojeća ležišta tehnički reorganizirati i pokušati maksimalno iskoristiti sirovinu tako da se tehnologijom prerade povećava iskorištenje iz postojećih ležišta
- što temeljitije provođenje propisane rekultivacije
- uzimati koncesije novih kamenoloma u zemljama u razvoju i na drugim kontinentima
- razvijati značajnije tehnologiju podzemnog otkopavanja.

Eksploatacija u postojećim ležištima postaje sve »čistija«, jalovina se preraduje za druge potrebe (cestogradnja, industrija građevnih materijala i sl.). Produbljanje površinskih kopova, gdje je to tehnički izvedivo, donosi probleme sa stabilnošću stijenskih masa i klizanjem kosina.

Otkopani prostori počinju se zatrpavati zemljom i privoditi industrijskim kulturama. Taj je proces spor po svojoj naravi, za njega treba izdvojiti značajna sredstva, međutim, na njemu treba inzistirati i dugoročno daje dobre rezultate. To je samo jedan oblik rekultivacije otkopanih prostora. Iskorištavanje otkopanih prostora u druge namjene, sportsko-rekreacijske, graditeljske i sl., zahtijeva angažman lokalnih vlasti uz suradnju arhitekata planera, što je u pravilu vezano za komplicirane birokratske procedure. Trajno inzistiranje na rekultivaciji otkopanih prostora oslobodit će rudare najčešće neistinitog naziva »devastatori prirode i okoliša« (Vučić, 1996a).

Na drugim kontinentima, države koje su dale koncesije na otvaranje kamenoloma, vrlo su brzo »odgovorile« na nove kamenolome koje su počeli razvijati europski proizvođači, tako da su se počele poostravati



Sl. 1. Podzemni kamenolom Sveti Stjepan

Fig. 1. Underground quarry Sveti Stjepan

mjere kontrole i uvjeti otvaranja kamenoloma. U Brazilu, na primjer, državna agencija CREA (Consiglio regional e ambiental) vrlo striktno kontrolira svaku eksploataciju i o svakoj eksploataciji se vodi posebna briga. Kazne za prijestupnike su vrlo velike, a može se i izgubiti koncesija. Prema tome, u bližoj se budućnosti može očekivati da će se i u ovim zemljama vlade pobrinuti da se ne uništava priroda i okoliš nekontroliranim otkopavanjima.

Prelaz na podzemno otkopavanje arhitektonsko-gradevnog kamena

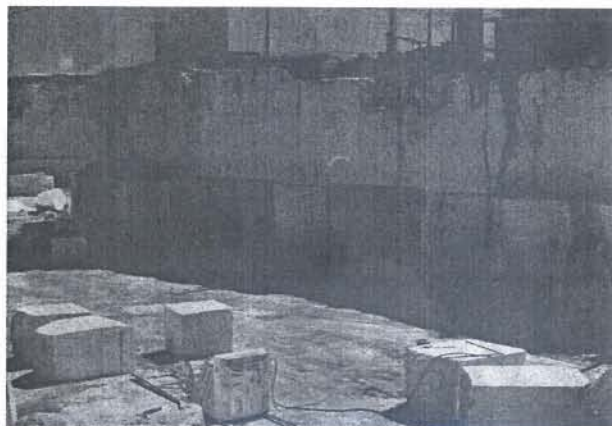
U posljednje vrijeme, upravo zbog ekoloških razloga, ukoliko je ekonomski opravdano, u postojećim površinskim kopovima počinju se otvarati podzemni kamenolomi.

Podzemna otkopavanja razvijana su još u doba Egipćana, Grka, Rimljana pa sve do naših dana.

Uzimajući u obzir sve elemente koji danas utječu na dobivanje koncesije ili odobrenja za eksploataciju, podzemno otkopavanje postaje sve interesantnije. Paralelno s povećanim interesom za podzemni način eksploatacije razvija se industrija opreme za takvo dobivanje kao i tehničko-tehnološki pristupi projektiranju ovih metoda eksploatacije. Proizvođači strojeva razvijaju nove strojeve za podzemnu eksploataciju koja postaje sve sofisticiranija i sve efikasnija. Odnos površinske i podzemne eksploatacije sve se više smanjuje, i prema nekim izvorima u Italiji se već oko 25% proizvodnje mramora dobiva podzemnom eksploatacijom (Piga et al., 1994). Broj podzemnih kamenoloma na području Carrare je oko 50 od ukupno 220 kamenoloma.

Na području Republike Hrvatske zasada postoji samo jedan aktivan podzemni kamenolom arhitektonsko-gradevnog kamena, Kanfanar u Istri. Nekada je u Istri pokraj Istarskih Toplica tvrtka KAMEN d.d. iz Pazina (sl. 1) vapnenac eksploatirala u podzemnom kamenolomu »Sv. Stjepan«. Danas taj kamenolom nije u eksploataciji, već ga treba sačuvati kao povijesnu rudarsku znamenitost Istre, pogotovo zato što se u njegovoj neposrednoj blizini nalazi jedan od najstarijih podzemnih kopova boksita na Svijetu (Marušić et al., 1995).

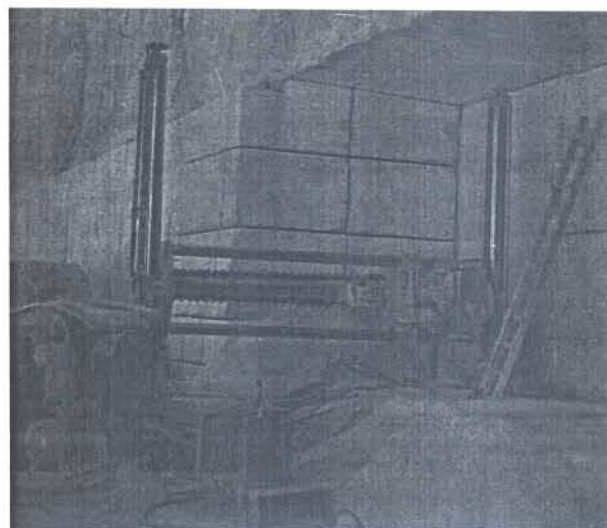
Radovi na uvođenju podzemne eksploatacije arhitektonsko-gradevnog kamena vapnenca započeli su u Istri 1995. u kamenolomima krednog vapnenca poznatog pod tržišnim imenom Kanfanar. Ležište Kanfanar nalazi se neposredno u blizini istoimenog sela uz cestu Pazin-



Sl. 2. Fotografija podzemnog kamenoloma Kanfanar 2

Fig. 2. Underground quarry Kanfanar 2

Rovinj. Ležište je predstavljeno slojevitim vapnencima, približno horizontalnog zalijeganja i pojedine debljine slojeva od 80 cm do 180 cm. Ukupna debljina eksploabilnih naslaga iznosi oko 685 cm, što se predviđa u potpunosti otkopavati podzemnim metodama eksploatacije. Debljina nadsloja ili otkrivke se kreće od nekoliko do 20 metara.



Sl. 3. Lančana sjekačica firme FANTINI, Tivoli, Italija

Fig. 3. Chain saw machine FANTINI, Tivoli, Italia

Probna podzemna eksploatacija u kamenolomu »Kanfanar 2«

Tijekom 1995., 1996. i 1997. obavljena je probna podzemna eksploatacija vapnenca u kamenolomu Kanfanar 2, na lokaciji na kojoj nije bilo moguće obavljati površinsku eksploataciju (iznad su poslovne zgrade) (sl. 2). Materijal koji se vadio je dobro poznati vapnenac pod imenom »Kanfanar« ili u Italiji pod imenom »Giallo d'Istria«. Opis početka radova na probnoj eksploataciji te karakteristike vapnenca i pratećih naslaga su objavljeni (Cotman, 1996 a, b). Eksploatacija se odvijala pomoću lančane sjekačice firme FANTINI, Tivoli, Italija (sl. 3).

Tijekom probne eksploatacije u ovom kamenolomu eksploatirala su se samo tri sloja, koja je tu bilo moguće otkopavati, i to: III., IV. i V/VI. Visina otkrivke kretala se od 3 do 6 metara. Ovako tanka i vertikalnim diskon-

Tablica 1 Ostvareni rezultati probne podzemne eksploatacije
 Table 1 Realised results of experimental underground exploitation

Ukupna proizvodnja	Total production	4265	m ³ brutto
Ukupna proizvodnja blokova	Total production of blocks	2425	m ³
Ukupno ispiljena površina	Total area cutted with chain saw		
	Horizontalna Horizontal	4235	m ²
	Vertikalna Vertical	3472	m ²
Efektivni sati rada sjekačice	Effective working hours of chain saw	2022	sati hours
Prosječna brzina piljenja	Average cutting velocity	3.78	m ² /sat m ² /hour
Ukupni volumen ostavljenih stupova	Total volume of the pillars	474	m ³
Odnos površina komora i stupova	Relation between room and pillar area	10.4 m ² komora/m ² stupa	m ² room/m ² pillar
Ukupno odrađenih radnih sati	Total working hours	14147	sati hours
Produktivnost	Productivity	1.37	m ³ /nadnici m ³ /manshift

tinuitetima izlomljena krovina u stvarnosti se ponaša kao sistem ploča, a ne kao stijenska masa kod dubljih rudnika, tako da su sve izvedene računice bile orijentacijske prirode, ali dovoljne za početak izvođenja radova. Radovi su izvođeni u prvom intervalu od ožujka do srpnja 1995. kada je sjekačica FANTINI tipa G70 poslana na trag u Rim na preuređenje prema kriterijima koje smo utvrdili prilikom pokusnog rada. Sjekačica je u pogonima Fantinija preuređena i promijenjene su joj slijedeće osnovne karakteristike:

- »mač« za rezanje produžen je s 2,4 metra na 2,8 metara, što je bitno povećalo dužinu napretka kao i dužinu svakog bloka koja je time postala komercijalna,
- produžene su joj kolone na visinu 4,2 metra, što dozvoljava da u otkopanu prostoriju ulaze utovarivači CAT 988.

S ovim preuređenjem ovaj stroj više nije samo pripremi stroj za otvaranje nego postaje i stroj za dobivanje blokova, što je bitna promjena. U prosincu 1996. nastavlja se eksploatacija sve do svibnja 1997. kada je predviđeni dio za otkopavanje u potpunosti otkopan. Ostvareni rezultati probne eksploatacije prikazani su u tablici 1.

Kao što se vidi ostvareni parametri prilikom probne proizvodnje bili su dobri, ili čak povoljniji nego su se očekivali. Dobivene rezultate pokušalo se komparirati s hipotetičkim koje bi dobili da se ista površina mogla otkopavati površinskim metodama.

Pretpostavljajući isto iskorištenje koje smo dobili podzemnim radovima (57%), a koje je čak i veće od rezultata koje dobivamo površinskim metodama (zato jer je probno polje podzemne eksploatacije bilo iznimno zdravo), izračunali smo da bi tim načinom dobili približno 1270 m³ blokova više nego što smo dobili podzemnom eksploatacijom. Uzimajući ovo u obzir, možemo reći da su gubici korisne sirovine (blokova) primjenom podzemne eksploatacije na ovoj lokaciji iznosili oko 9,5% (manje dobivenih blokova). Dalja računica oko primjenjivosti podzemne eksploatacije svodi se na: visinu otkrivke koja leži iznad korisnih slojeva, cijenu koštanja uklanjanja i odlaganja otkrivke te cijenu koštanja bloka. Općenito se može reći vrlo pojed-

nostavljeno, da je podzemna eksploatacija ekonomski opravdana u slučaju ako je:

$$(T_{\text{pod.ekspl.}} + T_{\text{pod.jal.}}) < (T_{\text{pov.ekspl.}} + T_{\text{pov.otkrv.}} + T_{\text{pov.jal.}} + T_{\text{rek.}})$$

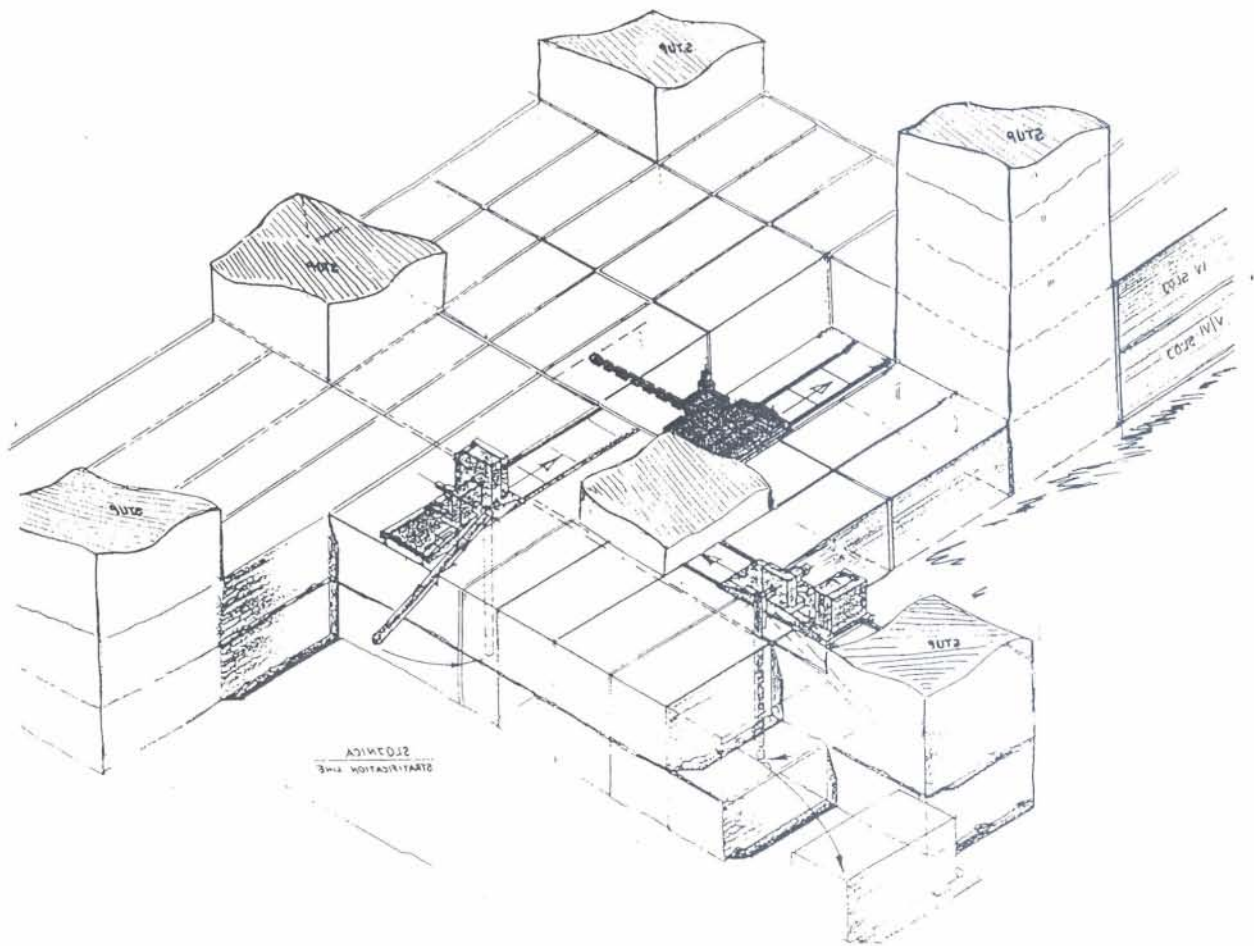
gdje su:

- $T_{\text{pod.ekspl.}}$ – troškovi podzemne eksploatacije
- $T_{\text{pod.jal.}}$ – troškovi podzemne jalovine kod obrade blokova
- $T_{\text{pov.ekspl.}}$ – troškovi površinske eksploatacije blokova
- $T_{\text{pov.otkrv.}}$ – troškovi površinske otkrivke
- $T_{\text{pov.jal.}}$ – troškovi jalovine kod obrade blokova
- $T_{\text{rek.}}$ – troškovi rekultivacije terena

Ova formula je vrlo pojednostavljena jer u praksi osim tehno-ekonomskih elemenata veliku ulogu igraju i društveno-politički elementi kao i vlasnički odnosi. Naime, vrlo često je u turističkim područjima društveno-politički stav takav da je sve podređeno turizmu i nema se sluha za industriju kamena. Po drugoj liniji vrlo često su upitni i vlasnički odnosi, iako naši vlasnici zaboravljaju da u članku 1 Osnovnog zakona o rudarstvu piše da je »rudno blago vlasništvo države« a ne njihovo osobno. Ovo će u budućnosti vrlo vjerojatno stvarati dosta problema, kako prilikom proširivanja eksploatacijskih polja, tako i prilikom istraživanja i otvaranja novih kamenoloma.

S rudarskog stajališta, prilikom odvijanja probne eksploatacije, nije dolazilo do posebnih problema, kako proizvodnih, tako i sigurnosnih. Pokušana je eksploatacija sa širim otvorima od 5,6 metara i pokazalo se da u ovim uvjetima u zdravoj stijeni nema problema kod otvora širine 8,5 metara. Kontrola stanja pomaka na diskontinuitetima sa stakalcima je pokazala da ni do današnjeg dana nije došlo do bilo kakvog pomaka, tako da se dobivene prostorije mogu smatrati sigurnima.

Radi jednostavnijeg rada i sporazumjevanja morali smo uvesti novu nomenklaturu za pojedine prostorije i sada su već udomaćeni slijedeći nazivi:



Sl. 4. Shematski prikaz otkopavanja II. etaže sjekačicom

Fig. 4. Schematic view of exploitation with chain saw at lower level

- **tunel**, prvi ulazni potkop kojim se otvara ležište; svi pravci paralelni s ovim također se nazivaju tuneli, svaki sa svojim brojem
- **galerija**, hodnik koji se izrađuje okomito na tunele i koji presjeca nekoliko tunela, također se označavaju brojevima.

Tijekom eksploatacije u njenom planiranju ustanovili smo nekoliko »promašaja« koje smo u slijedećim projektima nastojali ukloniti. Na osnovi dobivenih iskustava probne eksploatacije prilikom budućih izvođenja podzemnih radova potrebno je predvidjeti:

- da dimenzije stupa uvijek budu u funkciji dužine mača ili širine bloka, ako je to ikako moguće, jer se kod raznih probijanja iz tunela u galerije i obratno uvijek moraju dobiti po dimenzijama komercijalni blokovi
- da se rad na eksploataciji odvija tako da se prvo otkopavaju dva tunela na razmaku jednakom ili većem od 2 tunela + 2 stupa između njih. Time se paralelno s otkopavanjem obavlja istraživanje ležišta, kako bi se dobila što bolja slika diskontinuiteta koji nas čekaju u eksploataciji. Na ovaj način se unaprijed provjerava tektonsko stanje ležišta. Ova dva, nazovimo ih istražna tunela, otkopavaju se za dvije do tri galerije ispred linije pune eksploatacije
- da se u početku ostavljaju maksimalne veličine stupova, a kada se oko njih otkopa, tada ih se sužava na minimalne projektirane dimenzije. Na ovaj se način povećava iskorištenje ležišta. Maksimalna širina prostorija mora biti poznata

- da se radovi na podzemnom otkopavanju moraju pratiti od strane stručnih osoba s posebnom pažnjom na diskontinuitete. Njih treba stalno pratiti i kartirati. Na osnovi ovakve operativne karte donose se odluke o napredovanjima i mjestima otvaranja novih galerija i tunela. Naravno, time se dobije neregularni raspored stupova i komora. Operativni kadar mora biti osposobljen za ove radove.

Regularni raspored »šah mat« stupova i komora doводи do slabijeg iskorištenja ležišta. Radi toga je bolje otkopavanje s nepravilnim rasporedom stupova i komora, ali takvim koji poštuje minimalne dimenzije stupa i maksimalne raspone komora.

Na sjekačici je potrebno konstrukcijski riješiti način kretanja mača prilikom rezanja kako bi se dobili što pravilniji završeci reza, a time i puno bolje (ravnije) kalanje po toj stranici (najčešće glavi) bloka. Ovo će u budućnosti morati riješavati proizvođači strojeva.

Vađenje prvog bloka s utovarivačem je komplicirano i obavezno je upotrebljavati vilice. Pri tom treba paziti da je minimalna visina bloka jednaka visini vilica na utovarivaču. Preporučljivo je da visina vilica ne bude veća od 1 metra.

U svibnju 1977. godine završena je u potpunosti probna eksploatacija s opisanim rezultatima. Tijekom eksploatacije nisu obavljena mjerenja koja bi poslužila utvrđivanju rasporeda naprezanja i deformacija u stijenama, nije se radilo s piljenjem zadnje strane bloka žičanom dijamentnom pilom čime bi se svakako

Tablica 2. Geomehanički parametri vapnenca u kamenolomu "Kanfanar"

Mjerenja izvršena u prosincu 1995, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu, Zavod za rudarstvo i geotehniku

Table 2. Geomechanical characteristics of limestones from "Kanfanar" quarry

Tests performed in December 1995, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Department for mining and geotechnics

Opis Description	Neposredna krovina Direct roof	Drugi sloj Second strata	Četvrti sloj Fourth strata	Diskontinuiteti Discontinuities			Normalna slojnica Normal joint among the strata
				Slojnica V. sloja Strata line at fifth stratum	Kalcitna žila Vein of calcite	Pukotina Crack	
Jednoosna tlačna čvrstoća Uniaxial compression strength	σ_{1-rod} MPa	87,409	84,847	92,413			
Jednoosna vlačna čvrstoća Uniaxial tension strength	σ_{1-rod} MPa	5,328	4,216	4,502			
Troosna tlačna čvrstoća Triaxial compression strength	σ_3 MPa		4	4			
Yangov modul elastičnosti Young's modulus	E GPa	10,946	14,394	14,762			
Kohezija Cohesion	c MPa	17	13	13	5,228	6,059	2,460
Koeficijent Poissona Poissons ratio	ν	0,26	0,335	0,151			
Kut unutrašnjeg trenja Angle of internal friction	φ°	50°	59°	52°	47°23'	34°10'	58°13'
Prostorna masa Apparent specific gravity	ρ_{-4} kg/m ³	2663,2	2628,1	2642,3			



Sl. 5. Pogled na ulaz u jamu (I. etaža) na kamenolomu - Kanfanar 5
Fig. 5. Opening of underground mine (upper level) on a quarry Kanfanar 5

povećalo iskorištenje blokova, ali bi se pogoršali uvjeti rada. U slijedećem periodu ovo će se polako uvoditi u praksu pri redovnoj eksploataciji. Tijekom eksploatacije nije bilo problema s vjetrenjem, čije se instaliranje provodi na novoj podzemnoj eksploataciji u kamenolomu Kanfanar 5.

Dobiveni rezultati nakon potpune eksploatacije probnog polja u Kanfanar 2 dokazali su opravdanost uvođenja ove tehnologije u redovnu upotrebu.

Podzemna eksploatacija u kamenolomu Kanfanar 5

Kamenolom Kanfanar 5 je najjužniji kamenolom u okviru šireg područja ležišta vapnenca poznatog pod trgovačkim imenom »Kanfanar« – »Giallo d'Istria«. Ova lokacija je za razliku od lokacije Kanfanar 2 tektonski mnogo nepovoljnija, znatno više raspucana i mnogo problematičnija za eksploataciju. Prilikom standardne površinske eksploatacije iskorištenje u ovom kamenolomu je uvijek bilo najmanje, iako je sirovina uvijek bila kvalitetna. Na ovoj je lokaciji otkrivka debljine od 6 do 25 metara i pri površinskoj je eksploataciji otkopavana

metodom horizontalnog potpiljivanja i prespliting miniranjem. Nažalost, za površinsku eksploataciju treba otkupljivati velike površine plodnog terena, čija je cijena u stalnom porastu. Razmatrajući detaljnije ove parametre došlo se do zaključka da se na ovom dijelu ležišta pristupi podzemnoj eksploataciji.

Podzemna eksploatacija će obuhvatiti površinu oko 38000 m² i očekuje se godišnja proizvodnja od 1500 m³ blokova po sjekačici. S obzirom na kvalitetu stijenske mase ovdje se ne očekuje veće iskorištenje od 35 do 40%. Prvi rezultati to i dokazuju.

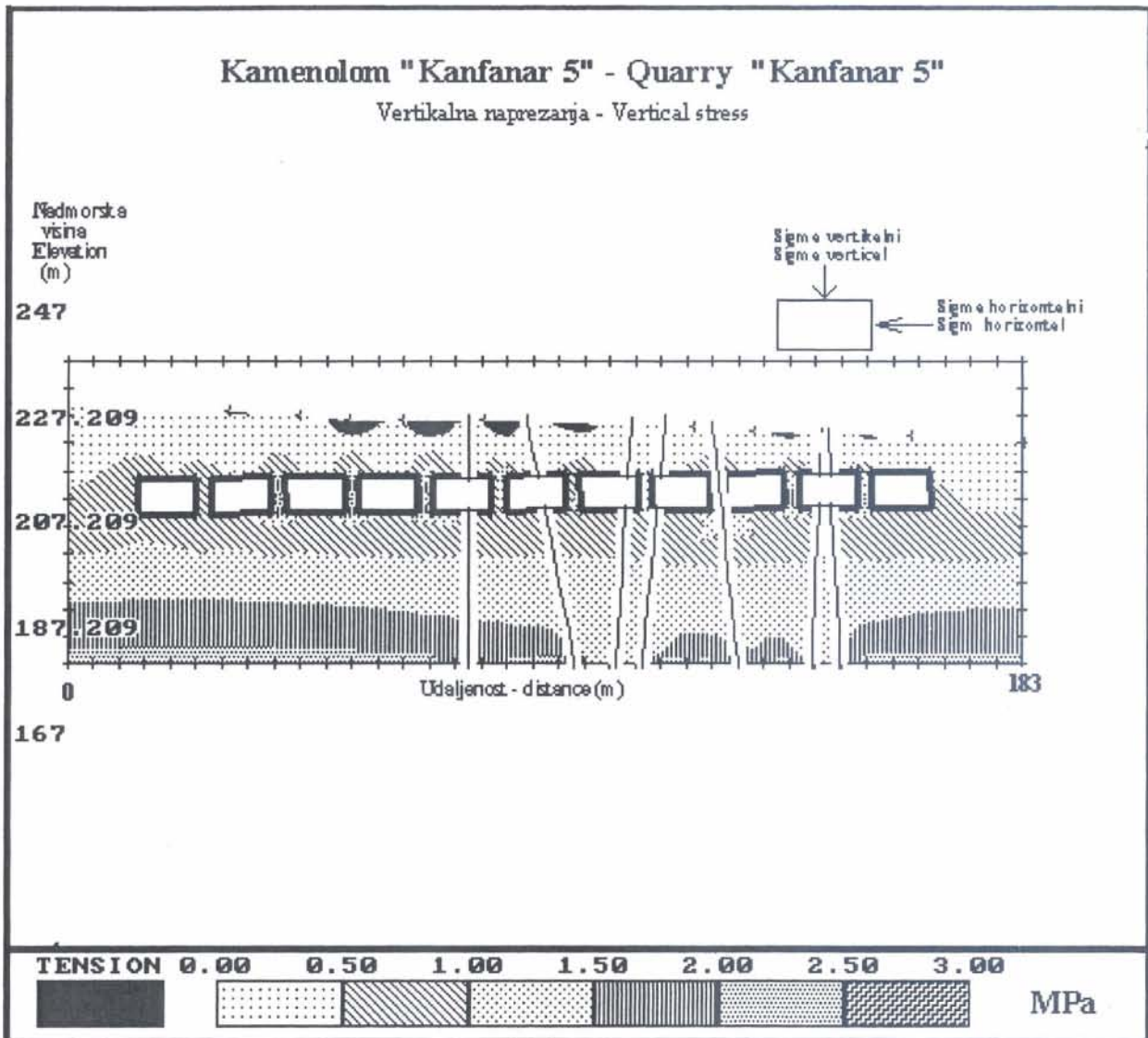
Stijenska masa ima iste karakteristike kao i u kamenolomu Kanfanar 2, s time da će ovdje eksploatacija obuhvaćati sve eksploabilne slojeve u ukupnoj visini od 6,85 metara. Pošto je ova visina prevelika za postojeće sjekačice, projektirana je metoda eksploatacije u dvije etaže i to:

- vađenje I., II. i III. sloja u prvoj etaži, visine 4,2 metra, metodama eksploatacije opisanim ranije (C o t m a n , 1996 a, b).
- vađenje IV. i V/VI. sloja u drugoj etaži, visine 2,65 metara, klasičnim metodama pomoću lančane sjekačice i dijamantne pile (sl. 4).

Tehnologija eksploatacije je projektirana na osnovi iskustava probne eksploatacije u kamenolomu Kanfanar 2.

Eksploatacija u drugoj etaži odvijat će se klasičnim metodama površinske eksploatacije. Površinskom sjekačicom se izrežu vertikalni rezovi, a nakon njih se izrezuju horizontalni rezovi dijamantnom pilom. Odabir ostalih detalja načina dobivanja bit će utvrđen tijekom eksploatacije.

Budući se ovdje radi o velikom i kompleksnom ležištu, a eksploabilni slojevi su bili otvoreni na dužini od približno 120 metara, moglo se prići podzemnom otvaranju na više mjesta s dvije sjekačice u aktivnom radu (sl. 5). Kako je etaža bila pripremljena za nastavak površinske eksploatacije (postojao je podrez po granici otkrivke i sloja), jedna sjekačica je započela rad ispod ovog podreza, dok je druga sjekačica započela rad u gornjoj (prvoj) etaži.



Sl. 6. Presjek kroz kamenolom – raspored vertikalnih naprezanja
Fig. 6 Distribution of vertical stresses

Dimenzioniranju komora i stupova u rudarskom projektu (tipskom), za otvaranje podzemnog dobivanja u ležištu Kanfanar 3, poslužile su numeričke analize uz korištenje programa FLAC (Kovačević-Zelić, et al., 1996). Uzimajući u obzir diskontinualnost u ležištu te potrebne mjere sigurnosti pri probnom otkopavanju utvrđene su slijedeće dimenzije jamskih prostorija: potrebna površina poprečnog presjeka stupa iznosi minimalno 16 m^2 , minimalna širina stupova je 3,3 m, a maksimalno dopušteni raspon komora 5,5 m.

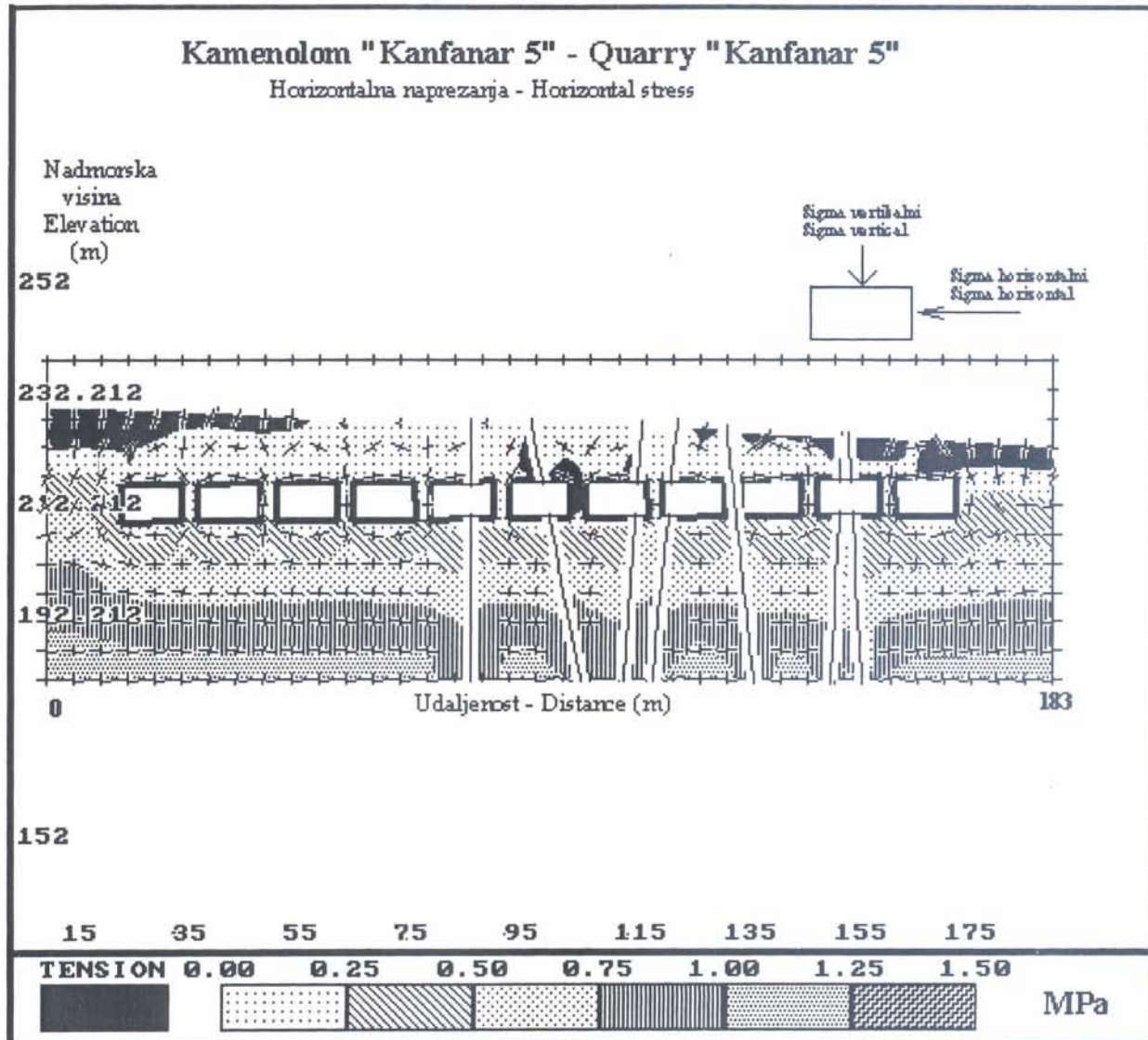
Za potrebe ležišta Kanfanar 5 je na osnovi novih praktičnih iskustava stečenih u nas i u rudnicima s podzemnim otkopavanjem arhitektonsko-građevnog kamena u Italiji, prvi koautor ovog prikaza I. Cotman, proveo novu numeričku analizu primjenom programa EXAM2D (Rock Engineering group, University of Toronto, Canada), čije rezultate iznosimo u nastavku.

Držeći se ranije utvrđenih pravila, bilo je potrebno potvrditi mogućnosti širokih prostorija s ciljem da se postupno postigne širina otkopavanja koja odgovara dvostrukoj širini sjekačice odnosno $(2 \times 5,6) \text{ m} = 11,2$ metra. Dosada je u ležištu Kanfanar 5 postignuta širina prostorije od 9,0 m i nikakvi elementi nestabilnosti nisu

uočeni. Pri modelskoj analizi su uporabljeni podaci laboratorijskih ispitivanja prema tablici 2 (Cotman, 1996a), u obzir je uzeta dvostruka širina otvora, uz visinu eksploatacije od 4,2 metra i dobiveni su dijagrami naprezanja prikazani u narednim slikama.

Što se tiče sigurnosti pri radu u drugoj etaži, krovina se ne poremećuje daljim produblavanjem iskopa prema istraživanju i mjerenju u kamenolomu bijelog mramora Pantelikos. Proračune i mjerenja su obavili grčki stručnjaci uz pomoć firme Dionyssomarble Co.S.A. (Kapenis et al., 1997). U njihovom radu izmjereni su pomaci krovine, u točki koja je 5,6 metara udaljena od boka prostorije široke 30 metara, u iznosu od 1,4 mm već nakon 60 dana po eksploataciji. Radovi na mjerenju i ispitivanju teku dalje.

Na dijagramu vertikalnih naprezanja u stupovima (sl. 6) vidljivo je da su sva naprezanja tlačna i da nigdje ne prelaze 4 MPa, što je mnogo manje od vrijednosti jednoosne čvrstoće. Prema tome očito je da problem ne predstavljaju veličine stupova, koji će se u daljoj eksploataciji pokušati smanjiti, nego problem predstavlja širina prostorije. Budući imamo mogućnosti za smanjenje presjeka stupa, želja nam je da se stupovi



Sl. 7. Presjek kroz kamenolom—raspored horizontalnih naprezanja
 Fig. 7. Distribution of horizontal stresses

moгу »suziti« na minimalnu dimenziju 2,8 m x 2,8 m. U ovom slučaju, jedini problem koji se može javiti je stabilnost stupa s obzirom na njegovu vitkost u odnosu na ukupnu visinu prostorije. Ovo je potrebno direktno provjeriti u praksi, ali tek nakon izvršenih mjerenja naprezanja i pomaka za osnovnu visinu od 4,2 metra. U neposrednoj krovini još uvijek su maksimalna naprezanja tlačna, a zone vlaka javljaju se tek pri površini.

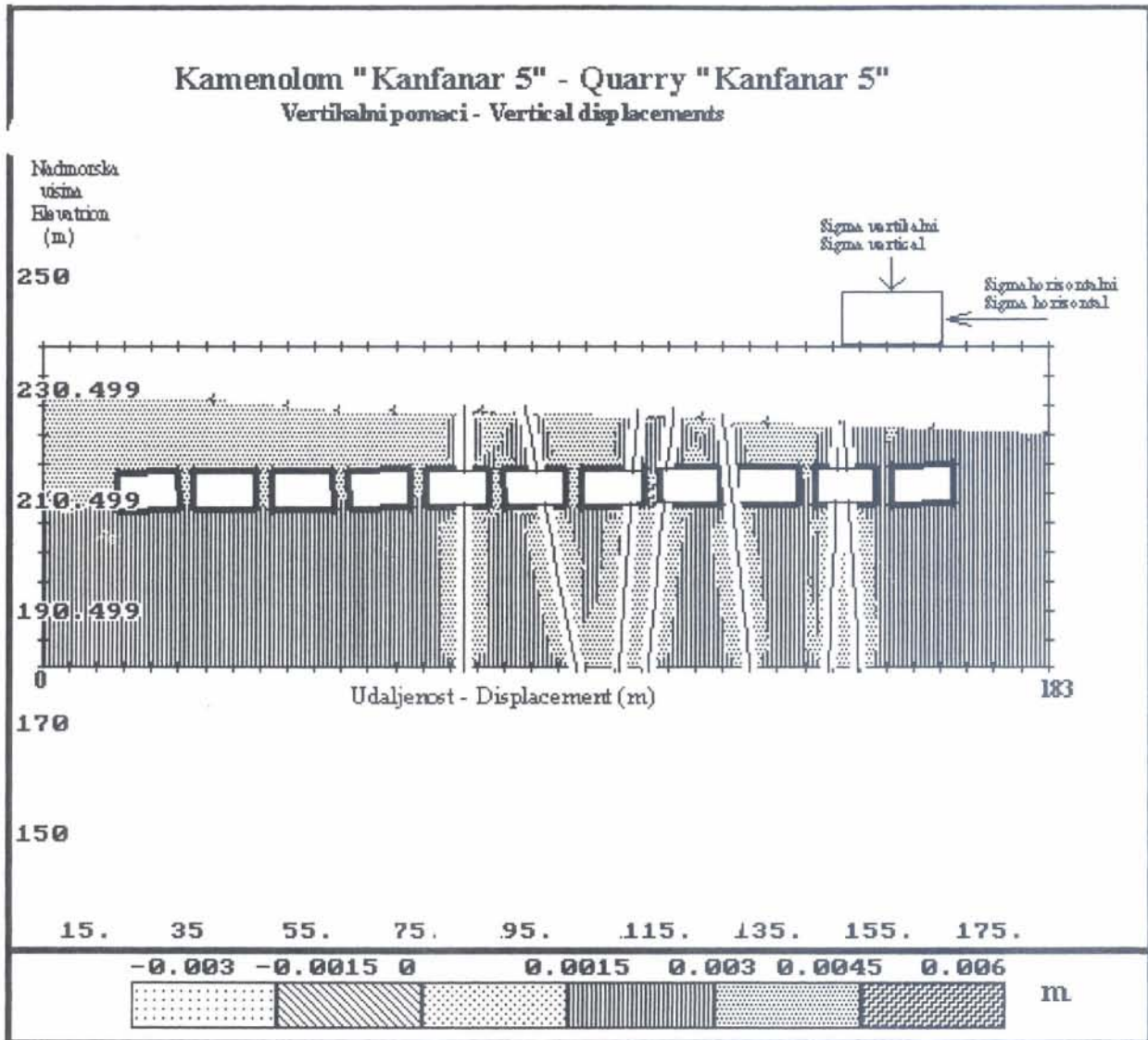
Na dijagramu horizontalnih naprezanja (sl. 7) očito je da su se počela javljati i vlačna naprezanja. Kontrolom raznih presjeka i točkastom kontrolom utvrđeno je da se veličine vlačnih naprezanja kreću u iznosima od 0 do 0,5 MPa. To je još uvijek mnogo manje od laboratorijski utvrđene vlačne čvrstoće (4,5 MPa), ali se nalazi na graničnoj vrijednosti vlačne čvrstoće slojnice V. sloja (0,679 MPa). To znači da kod otkopavanja posebnu pažnju treba obratiti tamo gdje se očekuje »obrnuti« klin pukotina jer bi tamo moglo doći do padanja ili osipanja materijala bilo iz boka (desni bok tunela 5) ili iz stropa.

Iz dijagrama pomaka po osi »Y« (sl. 8), može se zaključiti da su pomaci najveći tamo gdje je i raspored pukotina najgušći. Maksimalno mogući pomaci iznose

do 5,0 mm u raspuknutoj stijeni, dok se u zdravoj stijeni mogu očekivati pomicanja do 2,79 mm. U daljem radu na otkopavanju namjeravaju se izvršiti mjerenja pomaka na dva načina. Mjerenja će biti izvedena tenzometrijskom metodom te mjerenjem konvergencija. Rezultati mjerenja trebali bi potvrditi rezultate proračuna na modelima.

Na slici 9. prikazan je odnos čvrstoće i stvarnog naprezanja, takozvani »faktor čvrstoće«, koji se uvjetno može smatrati i »faktorom sigurnosti«. Promatrajući elemente vidi se da nigdje nisu razvijena tolika naprezanja da bi moglo doći do sloma. Jedini problem koji se javlja vidi se između tunela 5 i 6, gdje, uslijed pukotina u stupu, dolazi do smanjenja sigurnosti na granične vrijednosti. Ovo je posljedica toga što se stup nalazi između dva diskontinuiteta, pa ovdje može doći do padanja komada odvojenog pukotinom, što se u praksi rješava neregularnošću rasporeda stupova i komora.

Prema rezultatima dobivenim razradom modela i dosadašnjim iskustvima, rad u podzemlju, uz projektom predviđene mjere predostrožnosti, može se ocijeniti sigurnim.



Sl. 8. Presjek kroz kamenolom – dijagram vertikalnih pomaka
Fig. 8. Diagram of vertical displacements

Eksploatacija se izvodi lančanom sjekačicom FANTINI G70 sa zahvatom kraka od 2,8 metara slijedećih karakteristika:

masa strojaoko 6000 kg
masa hidrauličnog pogona (centraline).....oko 2000 kg
instalirana snaga..... 75 KS
brzina lanca.....do 0.71 m/sek (radna 0,58–0,60)
brzina rezanja ostvarena u vapncu
Kanfanara.....3,6 m²/sat
širina reza 3 8 mm
učinak jedne vidia pločice 3.78 m²/plaketi

Rezanje se odvija na suho. Jedna garnitura zubi ukupno raspili jedan napredak, dok zubi broj 4, 5 i 6 mogu izdržati dva napretka. Potrošnja zubi u mnogome ovisi o tome kako se za nju brine operativac koji radi sa strojem. Potrošnja masti za podmazivanje se kreće od 3 do 4 kg/dan. Sjekačica FANTINI je nakon produživanja kolona postala stroj koji skoro u potpunosti zadovoljava potrebe i za otvaranje kao i za redovnu eksploataciju blokova. U daljem razvoju ovog stroja radi se u dva osnovna pravca:

- omogućiti stroju samostalno kretanje
- omogućiti ravan rez »maču« kako se ne bi gubilo mnogo na premještanju i kasnije na stijenskoj masi prilikom cijepanja.

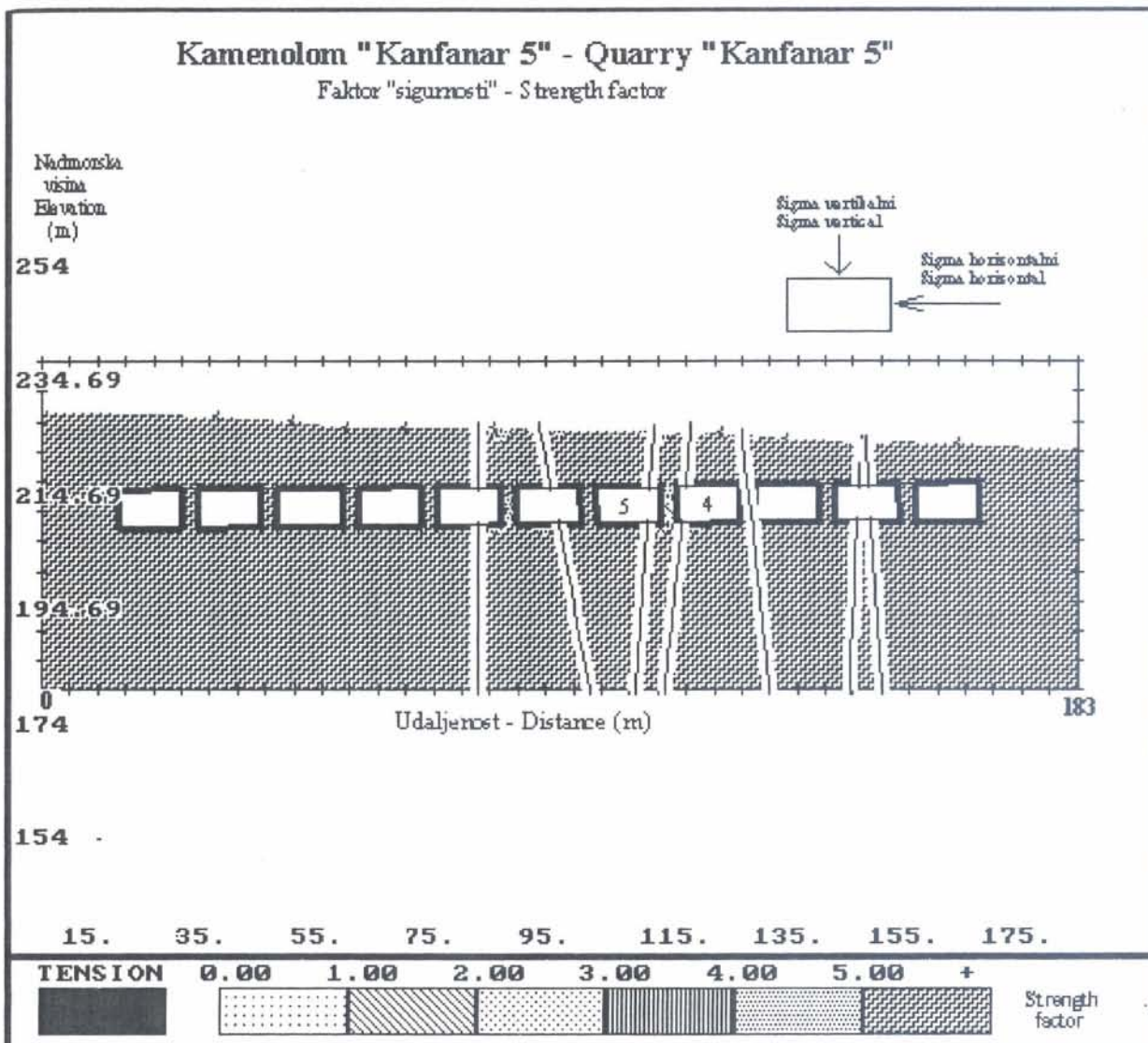
Osim ovoga, radi se i na razvoju autonomnog stroja koji će obavljati rezanja vertikalnih i horizontalnih rezoza s jednog mjesta bez njegovog premještanja.

Tijekom ove eksploatacije, zadnji rezovi bit će piljeni dijamanom pilom s ciljem poboljšanja iskorištenja stijenske mase.

Vjetrenje će se osigurati tlačnom ventilacijom preko postavljenog ventilatora na ulazu i putem savitljivih vjetrenih cijevi.

Zaključak

Nastavkom podzemne eksploatacije u kamenolomima tvrtke KAMEN d.d. iz Pazina, nastavlja se i razvoj tehnike eksploatacije horizontalno uslojenih vapnenaca. Imajući u vidu visoki stupanj razvoja podzemne eksploatacije u ležištima mramora u širem području Carrare, potrebno je i u ovim uvjetima ostvariti slične rezultate, kako bi se ovaj način eksploatacije što više proširio i u našim krajevima. Sa zadovoljstvom možemo zaključiti



Sl. 9. Faktor čvrstoće
 Fig. 9. Strength factor

da su u pogonima KAMEN-a iz Pazina prebrodene prve psihološke barijere, i da su ljudi prihvatili ovaj način eksploatacije kao normalan, a vrlo često čak i kao poželjan.

Kada se u potpunosti dokažu veličine prostora kod ove »room and pillar« metode eksploatacije, tada ćemo moći mnogo lakše dolaziti do našeg proizvoda-bloka, uz puno poštivanje načela o zaštiti okoliša. Tijekom ove godine bit će izvršena mjerenja progiba krovine i vjerovatno će dimenzije prostorija biti u potpunosti utvrđene. Problemi koje treba riješiti tijekom ove godine su i problemi provjetravanja podzemnog kamenoloma. Naime, kako ovo nije tipičan rudnik s jednim ili dva ulaza i izlaza, potrebno je detaljno utvrditi uvjete i način ventilacije, da rad bude u potpunosti siguran. Uvođenje dijamantne pile u podzemni kop će u našem slučaju dovesti do pogoršanja uvjeta rada u podzemlju (voda) ali bi to trebalo dovesti do povećanja iskorištenja stijenske mase. Svi ovi problemi koji nam prethode bit će rješavani i nadamo se vrlo uskoro i riješeni.

Primljeno: 1998-05-20
 Prihvaćeno: 1998-07-07

LITERATURA

- Cotman, I. (1996 a) Probna podzemna eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena u kamenolomu Kanfanar«, Istra. *Rud.-geol.-naft. zb.*, 8, 81-89, Zagreb.
- Cotman, I. (1996b): Probna podzemna eksploatacija u kamenolomu »Kanfanar«. *Klesarstvo i graditeljstvo br. 1-2*, Pučišća.
- EXAM2D, software from Rock Engineering group, University of Toronto, Canada.
- Fornaro M. & Bosticco L. (1994): Underground Stone Quarrying in Italy. *Marmo macchine International No7*.
- Kapeniš, A.P., Sofianos, A.I. and Rogakis, C. (1997): Monitoring and Numerical Modelling of an Underground Marble Quarry. Article on Internet.
- Kovačević-Zelić B., Vujec S. i Cotman, I. (1996): Numeričke analize podzemne eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena. *Rud.-geol.-naft. zb.*, 8, 91-97, Zagreb
- Marušić R., Sakač, K. and Vujec, S. (1995): The world's oldest bauxite mining. *Travaux ICSOBA*, 22, 81-98, Zagreb.
- Piga, P.M., Raspa, G., Giccu, R., Manca, P.P., Masacci, G., Badino, V., Peliza, S., Fornaro, M., Bonifazi, G., Berry, P., Ferrara, G., Shena, G.D., Fisa Morandi, A. and Ghiann, M. (1994): Applied Research in Italian Universities in the Field of Ornamental Stone(1994). XVI. World Mining Congress, Sofia
- Vujec, S. (1996a): Rudarstvo i zaštita okoliša u Hrvatskoj. *Zaštita prirode i okoliša i eksploatacija mineralnih sirovina, Ekološke monografije* 8, 13-20, Varaždin.
- Vujec, S. (1996b): Rudarstvo u Hrvatskoj. *Rud.-geol.-naft. zb.*, 8, 11-17, Zagreb.

Planing and Starting Experience of Underground Exploitation of Dimension Stone in Istria (Croatia)

I. Cotman and S. Vujec

Planing the excavation of dimension stone is based primarily on geologic factor, usability, market and tradition. All other requirements are the same as for each row material. For the Istrian bedded limestone, of numerous variety, all basic demands are fulfilled.

The seams are approximately horizontal, with vertical and semivertical cracks what is convenient for a production of prismatic blocks. The thickness of productive seams are cca 7m. Overburden are limestones with thickness of several meters to thirty or more meters. From the mining point of view this is convenient for development of quarries and, for thicker overburden, underground exploitation. Environmental insistance, in last few decades, are on the sides of underground exploitation.

The stone is useful for primary construction of buildings, monuments, coastal objects and for decorative facing materials for interior and, in some climatic region, exterior of buildings.

Enrichment of community, in number of states, give opportunity to build new monumental buildings and reconstruct old monuments. This is reason that the market for building stone in last decades is excellent and demand is growing up.

The history of building stone exploitation in Istria could be seen on numerous of monument built from Roman time to today. The modern quarries are in operation after the Second world war.

Last few years we are planing and opening mines with underground exploitation. However, old underground quarry Sv. Stjepan (Fig. 1) is located on north part of Istria in the valley of river Mirna.

The first experimental underground mine was open on the deposit Kanfanar 2 (Fig. 2). Operation lasted 3 years. In this mine equipment was tested and the workers, quarry man, was transferred and trained for underground work. Realised results of experimental underground exploitation are presented in table 1.

Design and numerical analyses for stability of rooms and pillars of underground exploitation was performed for mines in a deposits Kanfanar 3 and Kanfanar 5. The numerical models were created according to the geological data and results of laboratory rock testing.

For the cutting of the blocks in the upper level chain saw machine FANTINI, Tivoli, Italia (Fig 3) is used, as a modern variant of the old miners chain saw machines. On the lower level usual quarry equipment could be used. Fig. 4. shows schematic view of exploitation with chain saw at lower level. Opening of underground mine (upper level) on a quarry Kanfanar 5 is visible on fig. 5.

Some results of numerical analyses, using EXAM2D (Rock Engineering group, University of Toronto, Canada), are as follow: distribution of vertical stresses (Fig. 6), distribution of horizontal stresses (Fig. 7), diagram of vertical displacements (Fig. 8) and strength factor (Fig. 9).

In the future convergence and some tensometric measurement in situ and practical opservation should or shouldn't prove that proper dimensions of room and pillar are chosen.