

**ID 13**

## **OPTIMIRANJE IN SPREMLJAVA VARNOSTNIH STEBROV PRI PODZEMNEM PRIDOBIVANJU BLOKOV NARAVNEGA KAMNA**

**doc.dr. Jože KORTNIK**

*UL, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo,  
Aškerčeva 12, LJUBLJANA  
[joze.kortnik@ntf.uni-lj.si](mailto:joze.kortnik@ntf.uni-lj.si)*

### **POVZETEK**

V članku so predstavljeni postopki za načrtovanje, optimiranje in spremljavo visokih varnostnih stebrov pri podzemnem pridobivanju blokov naravnega kamna.

**Ključne besede:** naravni kamen, visoki varnostni steber, komorno-steberna odkopna metoda.

### **UVOD**

Podzemno pridobivanje blokov naravnega kamna ni ideja sodobne informacijske družbe, ampak izvira še iz časov starih Rimljanov. V vzhodnoangleški pokrajini Devon [7] v danes že opuščeni in v muzej preurejeni kamnolomu Beer obstajajo dokazi, da so tu že pred našim številom v času Rimljanov podzemno pridobivali bloke naravnega kamna. V Evropi se danes izvaja podzemno pridobivanje blokov naravnega kamna v kamnolomih v Italiji (Carrara, Apuanske Alpe, Bolzano, itd.), Veliki Britaniji (Avon, Somerset, Dorset, itd. [7, 11]), Grčiji (Dionysos – Atene [6, 8]), Portugalski (Solubema-Lizbona), Hrvaški (Kanfanar-Pazin), itd.



**Slika 1., 2.:** Podzemno pridobivanje naravnega kamna v kamnolomu Beer [6].

V Sloveniji so podzemno pridobivanje blokov naravnega kamna najprej pričeli poskusno uvajati leta 1993 v kamnolomu pisanega apnenca Hotavlje I. in nato leta 2002 tudi v kamnolomu lipiškega apnenca Lipica II.

Podjetje Marmor Hotavlje (MH), kot eno od vodilnih slovenskih kamnoseških podjetij, je v kamnolomu Hotavlje I. pričelo organizirano pridobivati naravni kamen leta 1948. Začetki pridobivanja blokov naravnega kamna v kamnolomu Hotavlje I. pa segajo še v prejšnja stoletja. Tu pridobivajo naravni kamen t.i. Hotaveljčan, pisan (rdeč, siv, rožnat, včasih skoraj črn, z belimi kalcitnimi žilami, ostanki koral in apnenčevih alg) apnenec. Za podzemno pridobivanje se je vodstvo MH odločilo predvsem zaradi geološke zgradbe nahajališča, stanja kamnoloma, velikih količin odkrivke v primeru širjenja površinskega dela kamnoloma in zaradi vse večjih potrebah po surovini naravnem kamnu.



**Slika 3., 4., 5.:** Kamnolom Hotavlje I., Hotaveljčan (siv, rožnat, rdeč).

Podjetje Marmor Sežana, ki je že več kot pol stoletja glavni nosilec kamnoseške dejavnosti na Krasu, je v kamnolomu Lipica II. pričel pridobivati naravni kamen leta 1986. V kamnolomu Lipica II. pridobivajo naravni kamen, ki so ga kraški kamnoseki poimenovali Lipica Unito (enotni) in Lipica Fiorito (rožasti) [10]. Kamnolom Lipica II. po velikosti uvrščamo med največje slovenske kamnolome naravnega kamna. Zaradi podobnih razlogov kot v kamnolomu Hotavlje I., so se tudi tu leta 2001 odločili in nato leta 2002 pričeli s poskusnim podzemnim pridobivanjem blokov naravnega kamna.

V obeh kamnolomih se podzemno pridobivanje blokov naravnega kamna izvaja z nahajališčema prilagojenima komorno-stebarnima odkopnima metodama z nepravilno razporejenimi varnostnimi stebri. Ker se podzemno pridobivanje v obeh primerih izvaja relativno plitvo pod površino cca. 34 m, je vrednost primarnega vertikalnega napetostnega stanja relativno nizka (<1.0 MPa) in s tem tudi znatno povečana možnost izpada klinov oz. blokov iz stopa odprtih podzemnih prostorov. Zato je bilo potrebno pri načrtovanju podzemnega pridobivanja, posebno pozornost nameniti inženirsko-geološkemu kartiranju najprej zunanjih površin bodočega območja podzemnih prostorov (najprej galerij, prečnikov in niš, po poglobljanju pa komor) in strukturalni zgradbi produktivne plasti. Na osnovi teh podatkov so bili določeni prevladujoči sistemi razpok, ki so pomembni za stabilnost in posledično varnost podzemnih prostorov, čemur pa se v članku ne bom posebej posvečal.



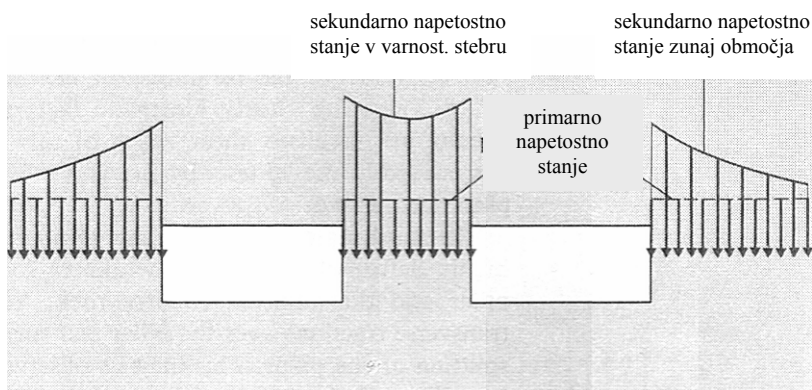
Slika 6., 7., 8.: Kamnolom Lipica II., Lipica Unito (enotni) in Lipica Fiorito (rožasti).

## NAČRTOVANJE IN OPTIMIRANJE KOMORNO-STEBERNE ODKOPNE METODE

V številnih podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna se uporablja pogojem nahajališča prilagojena komorno-steberna odkopna metoda z nepravilno razporejenimi visokimi varnostnimi stebri z majhnim koeficientom razmerja širina/višina. Odkopna metoda omogoča uporabo samonosilne hribine kot podpornega elementa v obliki varnostnih stebrov ustreznih dimenzij, ki morajo zagotavljati stabilnost krovline v stropu ter omogočiti zahtevan razpon odprtih prostorov med njimi za varen dostop in obratovanje podzemnih delovišč. Pri načrtovanju dimenzij (površine in višine) varnostnih stebrov in razpona odprtih prostorov (komor) med varnostnimi stebri, se mora projektant običajno odločati med zahtevo lastnika rudarske pravice oz. naročnikom rudarskega projekta po čim večjem izplenu blokov naravnega kamna in zahtevo po zagotavljanju še ustrezne varnosti. Zaradi omejenih količin naravnega kamna v nahajališču, se namreč za izplen tem večjega volumna blokov naravnega kamna zahteva tudi tem večje dimenzije podzemnih prostorov in čim manjše dimenzije varnostnih stebrov, s čemer pa se obratno sorazmerno zmanjšuje varnost v podzemnih prostorih. Z manjšanjem tlorisnih dimenzij varnostnih stebrov se zmanjšuje njihova trdnost, obratno pa narašča obtežba ter možnost preobremenitve varnostnega stebra.

Stabilnost stropa velikih podzemnih prostorov in varnostnih stebrov je odvisna predvsem od kvalitete geomehanskih lastnosti hribine in intenzivnosti tektonskih aktivnosti v nahajališču. Do razlik prihaja zaradi različnih volumskih mas hribin, različnih obtežb odkrivke in različnih tektonskih aktivnosti, kar zahteva podrobno načrtovanje pridobivanja in ustrezne podporne ukrepe za zagotavljanje varnih delovnih pogojev. Zaradi tega je potrebno za potrebe varnega

in stabilnega pridobivanja blokov naravnega kamna dobro poznati geomehanske lastnosti hribine, primarno napetostno stanje v krovlini in tektoniko nahajališča.

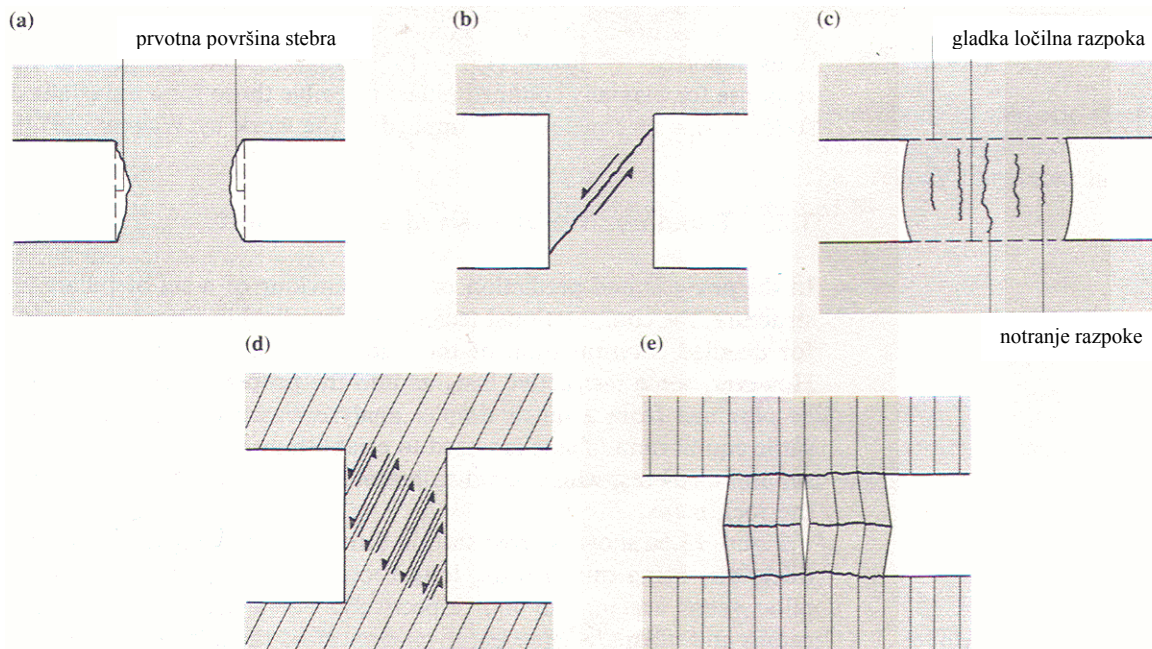


Slika 9.: Prerazporeditev napetosti po izdelavi odprtih podzemnih prostorov.

### Določitev dimenzij visokih varnostnih stebrov z majhnim koeficientom razmerja širina/višina

Nosilnost (trdnost) varnostnega stebra je odvisna predvsem od trdnosti hribine in vrednosti koeficienta razmerja širina/višini. Vsako zmanjšanje koeficienta razmerja širina/višini lahko povzroči zmanjšanje skupne trdnosti varnostnega stebra. V obstoječih podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna so bile glede varnostnih stebrov z nizko vrednostjo koeficienta razmerja širina/višina opažene naslednje skupne značilnosti (priporočila):

- Začetne višine varnostnih stebrov običajno znašajo 4,5 m (7,6 m), ki pa se z poglobljanjem podzemnih prostorov povečujejo in ponekod dosegajo višine 18,0 m in tudi več. Že tako vitki varnostni stebri so običajno z vsako poglobitvijo osnovne etaže še dodatno oslabljeni zaradi zmanjšanjem osnovnega horizontalnega preseka in se lahko porušijo v primeru zmanjšanja mejne dopustne trdnosti zaradi zmanjšanja vrednosti koeficienta razmerja širina/višina.
- Na začetku stabilni varnostni stebri lahko z poglobljanjem osnovne etaže postanejo nestabilni. V številnih podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna je bilo poglobljanje opuščeno ravno zaradi poslabšanja hribinskih pogojev poglobljenih etaž.
- Oslabitev oz. porušitev enega varnostnega stebra lahko povzroči verižno reakcijo oz. preobremenitev sosednjih varnostnih stebrov ter s tem posedanja celotnega območja krovline nad njimi. Ta nevarnost je še posebej velika v primeru vitkih varnostnih stebrov.
- Varnostni stebri, ki se jim postopoma zmanjšuje koeficient razmerja širina/višina so še posebej občutljivi na oslabitve zaradi prečno ali vertikalno presekajočih diskontinuitet (razpok ali drsnic). V podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna so običajno zelo dobri geomehanski pogoji, ki pa se lahko zaradi nepričakanega pojava diskontinuitet hitro poslabšajo, še posebej v primeru vitkih varnostnih stebrov.



**Slika 10.:** Najpogostejše vrste deformacij varnostnih stebra; (a) drobljenje površine, (b) strižni prelom preko stebra, (c) prečni razteg (sodček), (d) vzporedne razpoke, (e) brstenje.

### Določitev največjega razpona odprtih prostorov (komor) med stebri

Zahteva rudarskih podjetij je, da zaradi naraščajočih potreb po surovinah in manjših stroških pridobivanja, posledično zahtevajo povečanje razponov odprtih podzemnih prostorov. Zaradi različnih geoloških pogojev v nahajališčih naravnega in tehničnega kamna, predstavlja površina stropa velikega odprtega prostora največkrat kar enega ali več slojev (plasti) hribine, ki so vzporedni ali pod naklonom glede na strop. Stabilnost stropa odprtega prostora je odvisna predvsem od geomehanskih lastnosti hribine, obremenitve krovline na strop (obok) in tektonskih pogojev v nahajališču. Običajni razponi odprtih prostorov v podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna znašajo 13,0 m in dosega do 18,0 m. Z povečanjem razpona se zmanjšuje stabilnost stropa odprtega prostora in sicer:

- Pojav upogibnih napetosti povzroči upogibanje in zvijanje stropa ter nastanek strižnih razpok v stropu,
- Naraščanje upogibnih in strižnih napetosti v stropu lahko povzroči kritične poškodbe intaktne hribine oz. zrušek stropa,
- Z večjo verjetnostjo, da bo strop podzemnega prostora presekala neugodna razpoka.

Kot pri načrtovanju dimenzij varnostnih stebra, se tudi tu največkrat prenašajo praktične izkušnje že uporabljenih razponov stropa obstoječih podzemnih prostorov oz. pristopa poskusi-popravi napako. Metode na osnovi katerih bi lahko, za različne lokalno značilne hribinske pogoje in za različna napetostna stanja, določili ustrezne razpone stropa podzemnih prostorov v rudnikih naravnega in tehničnega kamna, so še v povojih. Danes se uporabljajo

metode, ki so izpeljane za potrebe premogovnikov in kovinskih rudnikov in le posredno upoštevajo pogoje podzemnega pridobivanja naravnega in tehničnega kamna.

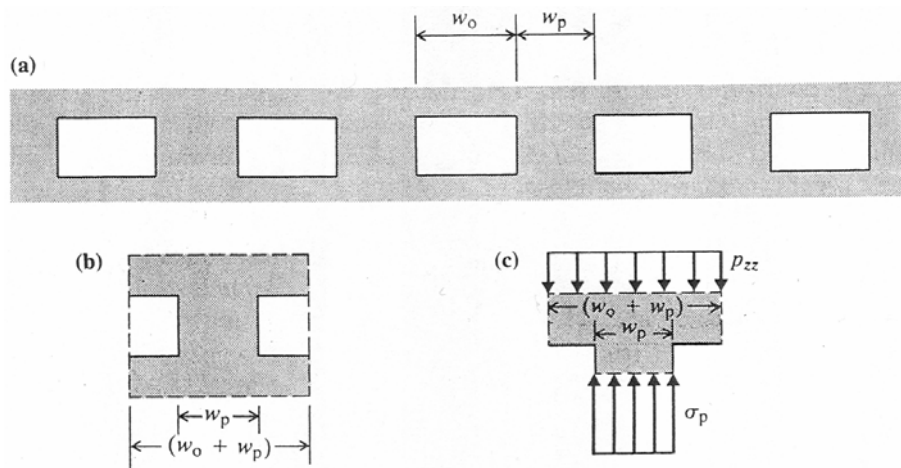
## METODE ZA NAČRTOVANJE VARNOSTNIH STEBROV

Trdnost varnostnih stebrov že desetletja raziskujejo številni raziskovalci. Večina raziskav v preteklosti je bila usmerjena v raziskovanje varnostnih stebrov v premogovnikih, nekaj teh raziskav pa je potekalo in bilo preneseno tudi v kamnine. Kot rezultat teh raziskav je ugotovitev, da je trdnost varnostnega stebra sorazmerno odvisna od trdnosti hribine v kateri se nahaja in obratno sorazmerna z njegovo vitkostjo. Bolj kot je steber vitkejši manjša je njegova nosilnost. Med metodami za načrtovanje varnostnih stebrov, danes prevladujeta dve in sicer:

- Analitične metode, ki temeljijo na matematičnih zakonitostih mehanskega obnašanja kamnin so računsko manj zahtevne. Te metode, kljub možnosti boljšega razumevanja mehanike varnostnih stebrov, v praksi niso doživele široke uporabe. Slaba stran teh metod je uporaba določenih predpisanih vrednosti, konstant, ki jih je v praksi težko ali skoraj nemogoče določiti.
- Numerične metode, ki uporabljajo sodobne numerične tehnike in so računsko bolj zahtevne, za modeliranje obremenjevanje varnostnih stebrov ali prikaz spremembe napetostnih in deformacijskih stanj v hribini. Nadalje omogočajo modeliranje posebnih pogojev, z upoštevanjem prelomnic, razpok in vnos ter oceno vpliva oslabljenih področij na stabilnost. Numerični modeli imajo danes zelo pomembno vlogo pri načrtovanju varnostnih stebrov v posebnih pogojih.

### Analitična metoda določitve največjega razpona odprtih prostorov (komor) med stebri

Analitične analize običajno temeljijo na osnovi statičnega ravnotežja hribine. Pri teh analizah v elementih podpiranja (varnostnih stebrih) najprej določimo povprečno napetostno stanje, ki ga nato primerjamo s povprečno vrednostjo trdnosti hribine.



**Slika 11.:** Presek preko horizontalno ležeče produktivne plasti enakomerne debeline, ki se pridobiva z dolgimi komorami širine  $W_0$  in vmesnih stebrov širine  $W_p$ .

Povprečno vrednost osnega napetostnega stanja v varnostnem stebru  $\sigma_p$  je;

$$\sigma_p = \frac{p_{zz} \cdot (W_0 + W_p)}{W_p} \quad [1]$$

kjer je

$W_p$ [m]	Širina stebra
$W_0$ [m]	Širina odprtega podzemnega prostora (galerije, komore)
$p_{zz}$ [MPa]	Vertikalna komponenta primarnega napetostnega stanja

Izračun nosilnosti stebra  $S$ ,

$$S = S_1 \cdot h^\alpha \cdot W_p^\beta \quad [2]$$

kjer je

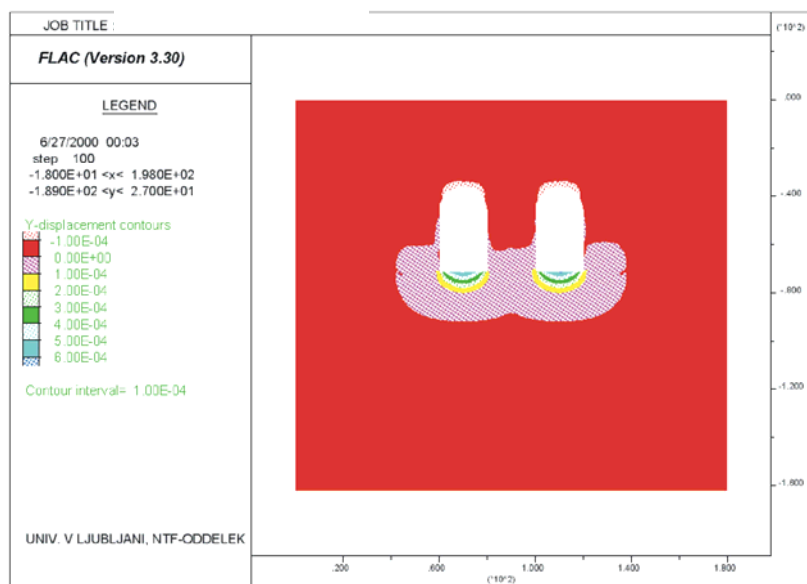
$S$ [MPa]	Nosilnost stebra
$S_1$ [MPa]	Enosna tlačna trdnost
$h$ [m]	Višina stebra
$W_p$ [m]	Širina stebra
$\alpha, \beta$	Konstanti volumna in oblike varnostnega stebra

Varnostni faktor  $F$

$$F = \frac{S}{\sigma_p} \geq 1,6 \quad [3]$$

### Numerične analiza stabilnosti varnostnih stebrov in stropa odprtih prostorov

Za numerične analize stabilnosti varnostnih stebrov in stropa odprtih podzemnih prostorov so danes na voljo različni programski paketi (FLAC 2D, FLAC 3D, PLAXIS, itd.), ki temeljijo na metodah končnih elementov, končnih diferenc, itd.



Slika 12.: Stabilnostna analiza varnostnih stebrov v programskem paketu FLAC 2D.

## IN-SITU MERITVE

V okviru in-situ kontrolnih meritev komorno-steberne odkopne metode so predvidene meritve napetostnega stanja (2D merilec napetostnega stanja) in deformacij (EL palični merilec, več točkovni ekstenziometer, merilec pomika odprtih razpok) tako v varnostnih stebrih kot tudi v stropu velikih odprtih podzemnih prostorov.

Za kontrolne meritve sprememb napetostnega stanja v visokih varnostnih stebrih smo uporabili 2D merilec napetostnega stanja (VW (vibrating wire) biaxial stressmeter model 4350-1) proizvajalca Geokon bomo uporabili za spremljanje glavnih napetosti v eni vertikalni ravnini pravokotni glede na os vrtine. Meritve glavnih napetosti omogočajo trije VW senzorji, ki so v sondi orientirani s kotnim zamikom 60°. Telo merilca napetostnega stanja je izdelano iz jeklenega cilindra največjega zunanega premera 57,1 mm.



Slika 13., 14.: 2D merilec napetostnega stanja (VW biaxial stressmeter 4350BX) in njegov položaj v vrtini.

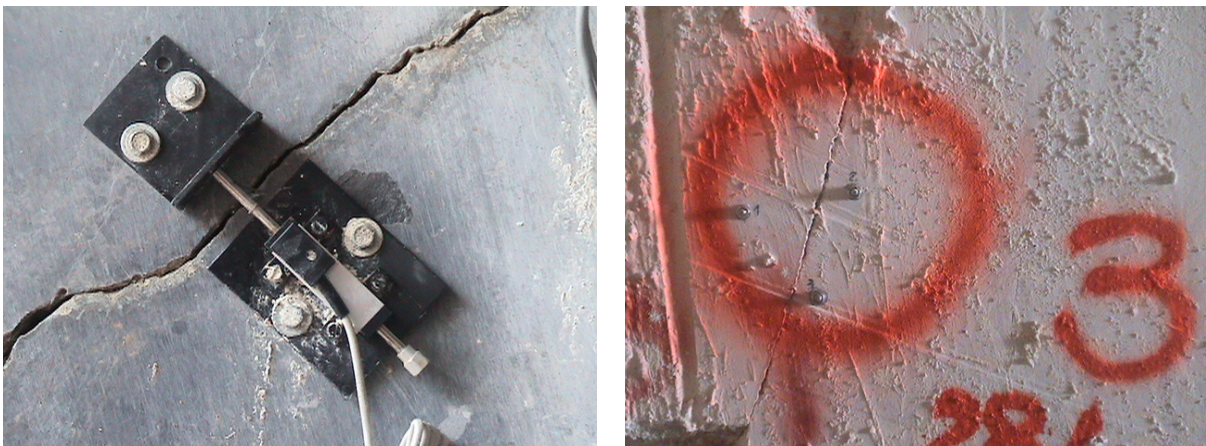
Tehnične lastnosti 2D merilca napetostnega stanja (Model 4350 BX):

Standardno območje meritve	70 MPa
Občutljivost <sup>1</sup>	14 do 70 kPa
Natančnost	±0,1% F.S.
Temperaturno območje delovanja	-20°C do +80°C
Zahtevan premer vrtine	BX (60 mm)

<sup>1</sup> odvisno od Modula Elastičnosti hribine

Za odzjem podatkov z merilca napetostnega stanja se uporablja pomnilniška enota (datalogger CR10 modul, AVW1, SC32B) za zajem podatkov in programska oprema (programski paket PC200W). Zajem podatkov se vrši avtomatsko glede na programsko nastavljen časovni interval (1 min, 60 min ali 240 min).





Slika 15., 16.: Meritve pomikov odprtih razpok na varnostnih stebrih (elektronsko, ročno)

## ZAKLJUČKI IN KAKO NAPREJ

Pri načrtovanju podzemnega pridobivanja blokov naravnega kamna s komorno-steberno odkopno metodo je potrebno posebno pozornost nameniti določitvi ustreznih dimenzij (širine in višine) velikih odprtih podzemnih prostorov (komor), dimenzij visokih varnostnih stebrov ter vgradnji ustreznih sistemov za sprotno spremljavo ter identifikacijo pojavov nestabilnosti v stropu velikih odprtih prostorov (komor). Zaradi velikih višin odprtih podzemnih prostorov je namreč po globljenju otežen ali celo onemogočen dostop do stropa velikih odprtih prostorov za eventualna sanacijska dela oz. vgradnjo dodatnih podpornih ukrepov.

Za dimenzioniranje visokih varnostnih stebrov z nizkim koeficientom razmerja širina/višina za potrebe podzemnih rudnikih naravnega in tehničnega kamna danes ni izdelane ustrezne metodologije. Izkušnje in rezultate meritev, ki jih trenutno pridobivamo v obeh slovenskih kamnolomih s podzemnim pridobivanjem naravnega kamna bomo lahko koristno uporabili pri razvoju metodologije uvajanja podzemnega načina pridobivanja še v druge, za ta način pridobivanja primerne kamnolome naravnega kamna.

## VIRI IN LITERATURA

1. Bajželj, U., Kortnik, J., Petkovšek, B., Fifer, K. & Beguš, T. *Okolju prijazno podzemno pridobivanje naravnega kamna*. RMZ 46/2, str. 203-214 (1999).
2. Brady, B.H.G., Brown, E.T., *Rock Mechanics for Underground Mining*, George Allien&Unwin (Publisher) Ltd., pp. 316-350.
3. Hoek, E., Brown, E.T., 1997, *Practical Estimation of Rock Mass*. Int. J. Rock Mech., Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.
4. Kamnolom Beer, <http://www.lake22.demon.co.uk/beerston.html/>.
5. Kortnik, Jože, Bajželj, Uroš, *Underground mining of natural stone in Slovenia*, 20<sup>th</sup> World Mining Congress 2005, p. 277-286, Iran, Tehran 2005.
6. Marmor Hotavlje, <http://www.marmor-hotavlje.si/>.
7. Marmor Sežana, <http://www.marmorsezana.com/>.
8. Vesel, J. & Senegačnik, A. *Vpliv geoloških dejavnikov na izbiro lokacije, izvedbena dela in rezultate*. 2. strokovno izobraževalni seminar »Lastnina, vrednotenje, varstvo pri delu«, Društvo tehničnih vodij-površinsko odkopavanje, str. 93-101, Hotavlje (1998).