



## ISPITIVANJE PETROGRAFSKIH I FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA KAMENA TENELIJE I MILJEVINE

**Vinko Bilopavlović**, dipl.ing.geol.

Elektroprivreda HZ HB

mr.sc. **Krešimir Šaravanja**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, "IGH-Mostar" d.o.o. Mostar

**Svjetlana Pekić**, dipl.ing.građ.

Elektroprivreda HZ HB

**Sažetak:** Tenelija i miljevina se u Mostaru intenzivno eksploatiraju i koriste u graditeljstvu kao arhitektonsko-građevni kamen od 1550-ih godina kroz vrijeme turske i zatim austrougarske vladavine, sve do poslije II. svjetskog rata kada u građevinarstvu počinju prevladavati suvremeni materijali. To su oolitični i sitnozrni vapnenac s lokaliteta Mukoša južno od Mostara. Zahvaljujući revitalizaciji kamenoloma Mukoša 1997. godine, tenelija i miljevina su nakon više desetljeća ponovno dostupne, kako u suvremenoj primjeni, tako i u obnovi ratom porušenih povijesnih zdanja.

**Ključne riječi:** Arhitektonski kamen, „tenelija“, „miljevina“, oolitični vapnenac, Mukoša, Mostar

## TESTING OF PETROGRAPHIC, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE “TENELIJA” AND “MILJEVINA” STONES

**Abstract** „Tenelija“ and „miljevina“ have been intensively exploited in Mostar and used in building as architectural stones for the last five centuries, throughout the periods of the Ottoman empire and Austro-Hungarian rule until a half of century ago. They are the oolitic and the finegrained limestones from the location of “Mukoša” south of Mostar. Thanks to revitalisation of the “Mukoša” quarry in 1997, „tenelija“ and „miljevina“ became available again for modern uses, as well as for restorations of historic structures destroyed during the war.

**Key words:** Architectural stone, “tenelija” stone, “miljevina” stone, oolitic limestone, “Mukoša” quarry, Mostar



## 1. UVOD

Većina znanstvenih ispitivanja kamena iz Mukoše od 1950-ih godina do danas bila su vezana za kamen ugrađen u Stari most. Opsežniji podaci o fizičko-mehaničkim i mineraloškim svojstvima ovog kamena dobiveni su prilikom sanacije i konzervacije temelja i svoda Staroga mosta 1963. godine. Tada je proučen kamen ugrađen u Stari most, ispitani su uzorci na lokalitetu Mukoša i prišlo se zamjeni oštećenih blokova na mostu.

Prilikom realizacije projekta revitalizacije kamenoloma na lokalitetu Mukoša po narudžbi privatnog poduzeća "Dent", u čijem vlasništvu je kamenolom, ispitivanja tenelije i miljevine uzetih izravno iz nalazišta su rađena u Institutu građevinarstva Hrvatske iz Zagreba i u IGH-MOSTAR (1998.).

U sklopu projekta rekonstrukcije Staroga mosta obavljena su opsežna ispitivanja fizičkih i mehaničkih svojstava tenelije iz ostataka Starog mosta, kao i tenelije svježe izvađene iz kamenoloma Mukoša (Zavod za geotehniku i fundiranje Građevinskog fakulteta u Sarajevu 1998 i Geotehnički institut LGA iz Nürnberga, 2000./01.).

## 2. GEOLOŠKI UVJETI I PETROGRAFSKA SVOJSTVA

Ležište tenelije i miljevine nalazi se na lokalitetu Mukoša, oko 4 km južno od Mostara na lijevoj obali Neretve, neposredno uz dionicu Mostar-Buna prometnice M17.

Uže područje ležišta izgrađuju neogenske, odnosno srednje i gornjomiocenske naslage, dijelom prekrivene kvartarnim deluvijalnim naslagama. Radi se o kontinentalnoj fazi geološke evolucije terena područja mostarske kotline, to jest. razdoblju formiranja naslaga u jezerskim bazenima (slatkovodne naslage).

Poslije povlačenja mora, u tijeku donjeg i srednjeg oligocena dolazi do snažne tektonske aktivnosti. Uz fazu ubiranja slijede velika rasjedanja mostarske kotline. Ova rasjedanja su prouzročila stvaranje dubokog tektonskog rova u području Mostarskog polja, u koji je prodrla slatka voda. U tektonski rov se talože prvo grubo klastični materijal, a potom pješčenjaci, laopori i gline s proslojcima ugljena. U toj fazi dolazi još do tonjenja bazena i nastavka taloženja sve do pliocena, kada se formiraju i naslage tenelije i miljevine.

Iako je prema Osnovnoj geološkoj karti (V. Raić i J. Papeš, 1977.) ova stijena opisana kao vapnoviti lapor i lapor, prof. B. Crnković (1979.) utvrdio je kako se radi o vapnencu. Geološko-petrografsku ocjenu kamena dao je prof. L. Marić ispitujući kamen ugrađen u Stari most (1963.).

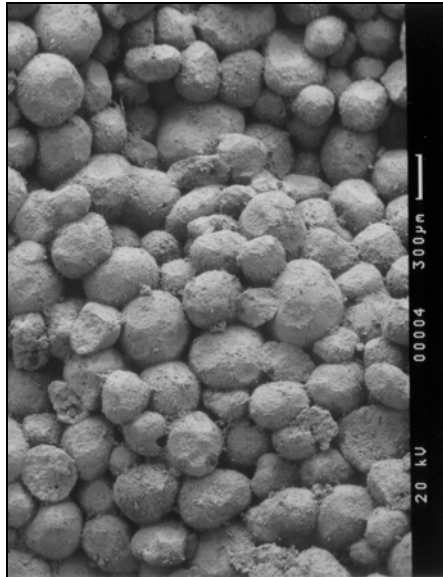
U ležištu su uočene dvije vrste kamena: tenelija – oolitični vapnenac i miljevina – sitnozrnati vapnenac. Obje predstavljaju dobru sirovinu za proizvodnju arhitektonsko-građevnog kamena jer su malo degradirane pukotinama i prslinama. To su bankovite strukture s azimutom pružanja istok-zapad, pad slojeva iznosi 18°-25°.

Dva kamena se u ležištu nalaze međusobno interkalirani, tj. međusobno se smjenjuju kao proslojci i veoma teško ih je razdvojiti na terenu, iako uopćeno gledajući tenelija sačinjava gornji sloj stijene koji prati konfiguraciju terena u naslagama debljine 60 cm do 2 m. Zatim je jasno vidljiv oštri prijelaz prema sitnozrnatom vapnencu donjeg sloja – miljevini. Tijekom

nedavnih iskopa prvi put je nađena tenelija na dubini oko 6 m ispod naslaga miljevine, i kao što je za očekivati manje je degradirana pukotinama i kvalitetnija od one na površini terena.

Miljevina je znatno zastupljenija od tenelije. Tenelija je cjenjenija, pa je i danas u prodaji za oko 30% skuplja od miljevine.

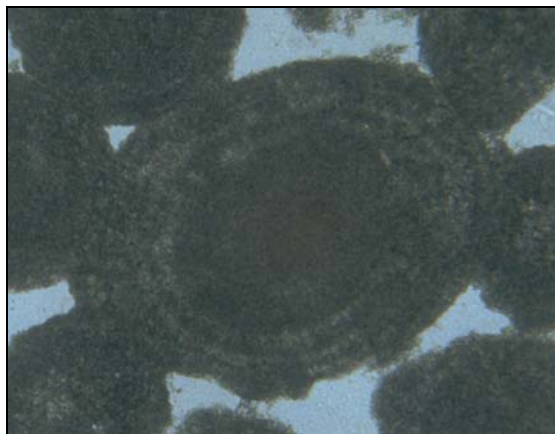
**Tenelija** je kamen žućkaste boje kad je tek izvađena iz kamenoloma i svijetlosmeđe boje u vlažnom stanju. Sušenjem dobiva bjeličastu, a vremenom i starenjem svijetlosivu i sivu boju. Homogene je teksture i visoke poroznosti.



Slika 1. Oolitična struktura tenelije (SEM snimka - LGA Nürnberg)

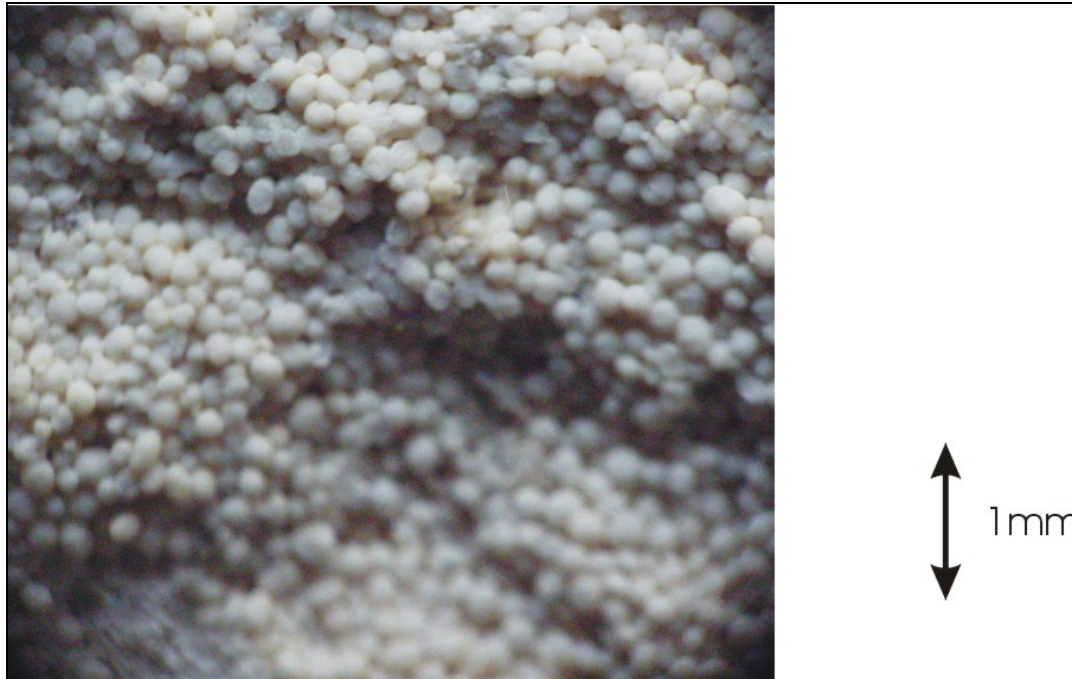
Pod mikroskopom se uočavaju gusto pakirani ooidi ujednačene veličine zrna, prosječnog promjera 300  $\mu\text{m}$ , tj. od 0,2 do 0,5 mm (slika1). Ooidi su negdje zgusnuti, a ponegdje je među njima prazan prostor. Na mikroskopskom izbrusku tenelije vidljiva je koncentrična unutarnja struktura ooida (slika 2).

Tenelija je klasificirana kao *oosparit* (prema ispitivanju mineraloško-petrografskog sastava provedenom u Cestovno-građevnom laboratoriju IGH-Zagreb).

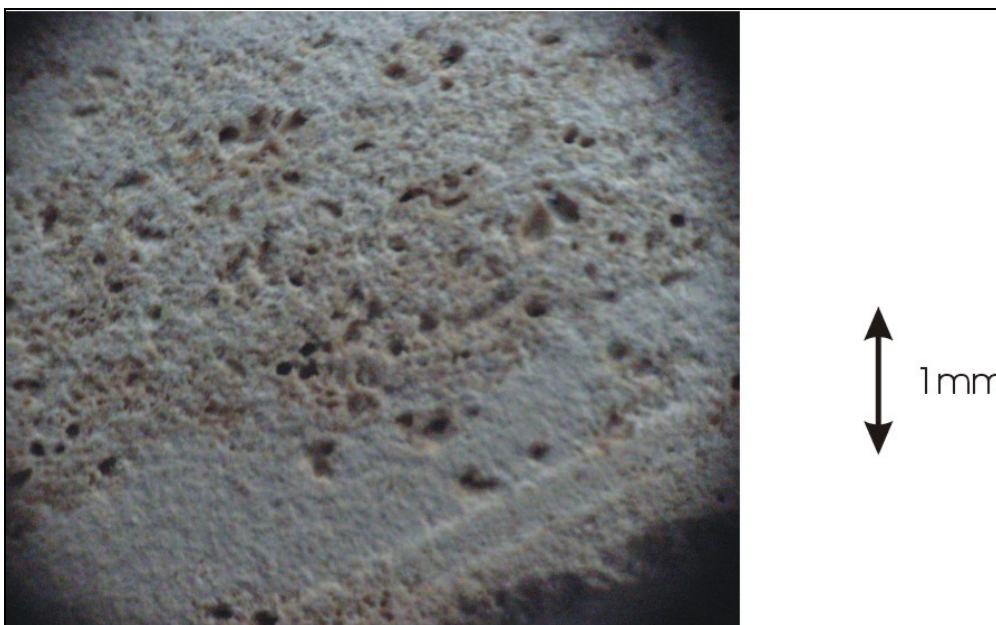


Slika 2. Tenelija: koncentrična struktura ooida

**Miljevina** je kamen bjeličaste do žućkaste boje s tamnijim mikroslojevima smeđe-žućkaste boje. U vlažnom stanju je svijetlo smeđe boje. Na piljenoj površini, koja je izrazito glatka, mjestimično se uočavaju nezacijeljene milimetarske pore. Neravnog je loma, a prijelomne ivice su trošne. Ima trajnu povišenu vlažnost i teško se suši.



Slika 3. Oolitična struktura tenelije (SEM snimka – LGA Nürnberg)



Slika 4. Sitnoznata struktura miljevine (SEM snimka – LGA Nürnberg)

Sadrži smeđežućkasti prah, odlomke fosila i gustu bijelu masu koja se ni s velikim povećanjem nije mogla odrediti (L. Marić, 1972). Veličina zrna vjerojatno pripada prašinastoj,



a moguće i glinovitoj frakciji. U tamnijem smeđe-žučkastom prahu primjetni su milimetarski fosilni ostaci, kao i šupljine koje su vjerojatno ostale nakon raspadanja ljuštura organizama.

Da se zaključiti da stijena u Mukoši pokazuje devijacije i varijacije u gradaciji veličine zrna i stupnju zbijenosti, kao i poroznosti. Očito je da su uvjeti sedimentacije varirali rezultirajući različitom raspodjelom kamenih struktura unutar slojeva, što je dovelo do sadašnjih mikro i makro razlika među susjednim slojevima.

### 3. FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA

U sljedećoj tablici dan je pregled fizičko-mehaničkih svojstava tenelije i miljevine dobivenih na uzorcima iz kamenoloma Mukoša u laboratoriju instituta IGH-Mostar u lipnju 2002. godine. Prema kategorizacijama arhitektonsko-građevnog kamena tenelija i miljevina spadaju u kamen vrlo niske čvrstoće, srednje težak, ekstremno porozan i velikog upijanja vode.

Uzimajući u obzir i rezultate nekih ranijih ispitivanja tlačna čvrstoća tenelije se kreće između 25 i 45 MPa, a miljevine između 15 i 30 (35) MPa. Veoma su velike varijacije u čvrstoći i poroznosti kod oba kamena ovisno o mjestu odakle je uzet pojedini uzorak, zbog čega se posebna pozornost posvećuje odabiru kamena u odnosu na vizualno uočljive varijacije u građi, poroznosti ili boji. Kod tenelije nema značajnih odstupanja u čvrstoći ovisno o pravcu opterećivanja, dok je kod miljevine zbog mikroslojevitosti čvrstoća manja u pravcu paralelnom slojevima. Ispitivanja miljevine su pokazala da je tlačna čvrstoća uzoraka opterećenih paralelno slojevima jednaka 70% tlačne čvrstoće uzoraka opterećenih okomito na slojeve.

Tablica 1. Fizičko-mehanička svojstva tenelije i miljevine

SVOJSTVO		KAMEN	
		TENELIJA	MILJEVINA
Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]		2,616	2,402
Prostorna masa [g/cm <sup>3</sup> ]		1,977	1,836
Poroznost [%]		24,4	23,6
Upijanje vode [%]	Pod atm. tlakom	9,47	14,10
	Kuhanjem u vodi	14,11	16,30
Koeficijent zasićenja		0,67	0,87
Postojanost na mrazu		nepostojan	nepostojan
Tlačna čvrstoća [MPa]	U suhom stanju	37,14 (32,86-45,00)	22,99 (20,82-24,69)
	U vodom zasićenom stanju	30,81 (27,67-36,16)	17,02 (13,96-20,72)
Koeficijent razmekšanja		0,83	0,74

Veliko upijanje vode ima izravan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u uvjetima kvašenja i na otpornost prema mrazu. Smanjenje tlačne čvrstoće uslijed prisutnosti vlage u kamenu izraženo je koeficijentom razmekšanja, koji je kod tenelije iznad 0,80, a kod miljevine je ispod



te vrijednosti, čak i do 0,60 prema ranijim ispitivanjima. Uz nizak koeficijent razmekšanja još je jedan pokazatelj neprikladnosti primjene miljevine u uvjetima izloženosti kvašenju: visok koeficijent zasićenja, tj. relativno mala razlika u upijanju vode u postupku zasićivanja kuhanjem u vodi u odnosu na postupak zasićivanja pod atmosferskim tlakom. Prilikom ispitivanja postojanosti prema mrazu, uzorci tenelije i miljevine su prethodno zasićeni vodom postupkom kuhanja u vodi, kojim se u slučaju tenelije postiže za 33% veća ispunjenost pora vodom u odnosu na postupak zasićivanja vodom pod atmosferskim tlakom, a kod miljevine je ova razlika zasićenosti 13%. Već nakon trećeg ciklusa naizmjeničnog smrzavanja i odmrzavanja došlo je do pojave pukotina (tenelija) i loma uzoraka (miljevina). Uzorci tenelije ispitivani istim postupkom, ali prethodno zasićeni vodom postupkom zasićivanja pod atmosferskim tlakom, zadobili su prsline nakon 22. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Očito je da se postupkom zasićivanja kuhanjem u vodi postiže veća ispunjenost pornog prostora vodom i da ne preostaje prostora za širenje leda što dovodi do razarajućih vlačnih naprezanja unutar kamena. Također, nešto bolji rezultat kod tenelije ukazuje na to da se zbog njene krupnozrnate strukture voda brže iscijedi iz kamena, tj. na kraće zadržavanje vode u strukturi kamena, čemu u prilog govori i velika razlika u upijanju vode postupkom kuhanja u odnosu na upijanje pod atmosferskim tlakom. Kod miljevine je ta razlika manja i voda se u njevoj sitnozrnatoj strukturi duže zadržava čime se stvaraju uvjeti za formiranje ledenih leća i samim time manje je otporna na mrazu. Visok koeficijent zasićenja kod miljevine upućuje na veliku higroskopnost i najvjerojatnije veoma laku ingresiju vlage iz okoliša.

Iz ranijih ispitivanja vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti tenelije odgovaraju redu veličine za sitne pijeskovne (približno  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  cm/s). Za očekivati je manje vrijednosti za miljevinu s obzirom na tendenciju zadržavanja vode unutar njene sitnozrnate strukture.

U uvjetima suvremene primjene miljevine za fasadna oblaganja i kao ukrasni kamen, gore navedeni odnosi prema kvašenju i vlazi su izrazito nepovoljni, zbog čega se kamene obloge zaštićuju visoko-vodoodbojnim impregnirajućim sredstvom (Chromosil S). U starim zgradama koje imaju zidove od miljevine oduvijek se javljao problem povećane vlage.

Kada se kamen koristi za vanjska oblaganja, kao što je to slučaj u suvremenoj primjeni miljevine, važno je ocijeniti i predvidjeti mehanizam kretanja vode u kamenu, u njegovoj unutrašnjosti i na površini, jer najveći broj procesa dezintegracije događa se u vrijeme zadržavanja vode i sušenja, a ne u periodu upijanja. Na povećanu količinu upijene vode mogu utjecati kiše nošene vjetrom, zatim udari vjetra i tlak zraka mogu pospješiti brzinu i dubinu prodiranja vode u kamen (Tomašić, 2000).

Tenelija i miljevina spadaju u izrazito mekan kamen: za teneliju je rezultat otpornosti na habanje prema Böhmeu iznosio  $48 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ; za očekivati je kod miljevine gubitak volumena materijala još veći, što u ugrađenoj konstrukciji znači sklonost mehaničkom trošenju, zaobljavanju oštih bridova i sl. Na fasadne obloge habajuće mogu djelovati jaki vjetrovi koji nanose pijesak i prašinu.

O svojstvima i trajnosti tenelije i miljevine najbolje svjedoči ugrađeni kamen u građevinama iz bliže i dalje prošlosti. Nepovoljni rezultati o postojanosti tenelije su dobiveni na uzorcima svježe izvađenim iz stijenske mase. Blokovi tenelije u Starom mostu su preko 4 stoljeća odolijevali atmosferskim utjecajima i zemljotresima, što jasno govori o njevoj postojanosti.

Većina prijašnjih istraživanja tenelije su rađena na kamenu ugrađenom u Stari most, na kojem je primijećeno da tenelija vremenom dobiva na čvrstoći. To se najprije objašnjavalo



gubitkom kristalne vode, ali je ubrzo ovo objašnjenje uzeto s rezervom. Najinteresantniji je podatak o uočenom prirodnom procesu zacjeljenja pukotina, koji je rezultat kristalizacije

kalcita iz vode koja sadrži kalcij-hidrokarbonat. Također, prazni prostor u strukturi tenelije može primiti vodu, pa i plinove, gdje se kasnije može iskristalizirati prevlaka-korica od raznih minerala. Ovim procesom kamen može dobiti novu nijansu boje, povećanu kemijsku i mehaničku otpornost.

Zbog visoke poroznosti i tenelija i miljevina kada su tek izvađene iz kamenoloma sadrže veliku količinu kamenolomske vlage, koja može sadržavati rastvorene soli. Sušenjem kamena soli zajedno s vlagom migriraju prema površini kamena gdje kristaliziraju stvarajući patinu. Također, kod visokoporoznih vapnenaca s međusobno povezanim pornim prostorom voda lako prodire u unutrašnjost pa kišnica s ugljičnim dioksidom pretvara kalcit u rastvorljivi kalcij-hidrokarbonat, koji sušenjem migrira prema površini gdje ponovo kristalizira kao kalcit tvoreći čvršću koricu. Tako se starenjem uz formiranje patine na površini poboljšavaju mehanička svojstva.

#### 4. GRAĐENJE TENELIJOM I MILJEVINOM

Brojni su povijesni objekti iz turskog i austrougarskog razdoblja kod kojih su tenelija i miljevina korištene kao osnovni građevni materijal.

Monumentalne i sakralne objekte turske arhitekture u Mostaru karakterizira upotreba klesanih blokova od tenelije, oštih bridova i precizno slaganih u nosivu konstrukciju objekta, ostavljajući vrlo uske reške s malo morta, te glatke površinske obrade kamena na licu konstrukcije. Primjeri ovakve gradnje između ostalih su Stari most, građen od 1557. do 1566. godine, te mnogobrojne džamije (Karađozbegova, Vučjakovića i Sevrjina).

Tenelija se pokazala kao kamen koji se lako reže i obrađuje; tek izvađen iz kamenoloma dok još sadrži kamenolomsku vlagu može se rezati običnom ručnom pilom i obrađivati najjednostavnijim alatima. Zbog toga je bila rado upotrebljavan materijal i za dekorativne dijelove građevina, okvire i lukove, stupove s ukrašenim kapitelima, te nadgrobnе spomenike.

Građevine u vrijeme Austrougarske imaju nosive zidove od tenelije i miljevina debljine 50-80 cm, zidane vapnenim mortom (Muzička škola, Hotel Neretva, Vakufski dvor, Vojna komanda, Osnovni sud, Biskupski dvor, Simfonijski orkestar, Gradsko kupatilo...). Primjećuje se da je više bila korištena miljevina, za razliku od gradnje iz turskog razdoblja.

Tenelija i miljevina su danas najviše u upotrebi kao ukrasni kamen i u vanjskim vertikalnim oblaganjima: klaustar Franjevačkog samostana u Mostaru, Hrvatski dom Herceg Stjepan Kosača, Prodajni centar Mostar, te u oblicima okvira prozora i vrata, ograda i stupova, profiliranih ukrasnih vijenaca, te namještaja interijera.

Zbog iznimne podatnosti pri obradi, ručna obrada ova dva kamena je i u današnje vrijeme strojeva još uvijek aktualna i veoma cijenjena. Tako je ručno klesana miljevina za česme, fontane i kamine rađena za izvoz. Od revitalizacije kamenoloma Mukoša do sada, osim u obnovi grada i širokoj prodaji na domaćem tržištu, ostvaren je i značajan izvoz kamena u zemlje zapadne i južne Europe, Njemačku, Francusku, Italiju, Belgiju, Španjolsku, te čak i u Sjedinjene američke države.



## LITERATURA

1. Bilopavlović, V. & Smoljan, N. (1997.): Pet stoljeća građenja tenelijom, Rudarsko- geološki glasnik 1, Hrvatsko rudarsko-geološko društvo, Mostar.
2. Bilopavlović, V. (1998.): Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu zaliha arhitektonsko-građevnog kamena oolitičnog vapnenca (tenelije i miljevine) na istražnom prostoru "Mukoša" u Mostarskom polju, Mostar.
3. Crnković, B. & Šarić, Lj. (1992.): Građenje prirodnim kamenom, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
4. Marijanović, P., Smoljan, N. & Bilopavlović, V. (1993.): Arhitektonski građevni kamen u obnovi i izgradnji porušenih objekata, Zbornik radova znanstveno-stručnog skupa "Pravci razvoja HZ Herceg-Bosne", Neum.
5. Tomašić, I. (2000.): Suvremena primjena arhitektonsko-građevnog kamena, Rudarsko-geološki glasnik 4, Hrvatsko rudarsko-geološko društvo, Mostar.
6. Pekić, S. (2002.): Prilog izučavanju svojstava kamena tenelije i kamena miljevine korištenih u izgradnji i obnovi građevina u Mostaru, Diplomski rad, Mostar.