



Analiza raspoloživih rezultata ispitivanja kamena „Tenelija“

Izvorni znanstveni rad/ Research paper

Primljen/Received: 11. 9. 2018.;

Prihvaćen/Accepted: 24. 9. 2018.

Krešimir Šaravanja

Ministarstvo graditeljstva/građenja i prostornog uređenja HNŽ/K, mr.sc.

Davor Popić

„IGH“ d.o.o. Mostar, dipl. ing. građ.

Tomislav Marić

„IGH“ d.o.o. Mostar, dipl. ing. građ.

Jelena Radić-Kustura

„IGH“ d.o.o. Mostar, dipl. ing. građ.

Sažetak: U kamenolomu Mukoša kod Mostara smjenjuju se slojevi *tenelije*, oolitičnog vapnenca, sa slojevima *miljevine*, sitnozrnog vapnenca, pri čemu je *tenelija* trajnija i posjeduje bolje fizikalno-mehaničke karakteristike. Od davnina su se upotrebljavali u građevinarstvu i predstavljaju tradiciju mostarskog kraja. Zadnjih dvadesetak godina *tenelija* i *miljevina* su ponovno dostupne u suvremenoj primjeni, ali i u obnovi ratom porušenih građevina.

Ispitivanja kamena *tenelija* ugrađenog u Stari most počela su sredinom prošlog stoljeća. Prilikom sanacije i konzervacije temelja i svoda Starog mosta 1963. godine proučen je kamen ugrađen u Stari most, a ispitani su i uzorci iz kamenoloma Mukoša zbog zamjene oštećenih blokova na mostu. U okviru projekta poslijeratne rekonstrukcije Starog mosta, obavljena su opsežna ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava *tenelije* iz ostataka Starog mosta, kao i kamena iz kamenoloma, izvađenog dvije godine ranije (Građevinski fakultet u Sarajevu, 1998, Geotehnički institut LGA Nürnberg, 2000/2001). Ispitivanja su vršena i u „IGH-Mostar“ (1998.-2002, te 2006) i na Rudarsko-geološko-građevinskom fakultetu u Tuzli (2003. i 2006). Zadnja opsežnija istraživanja napravljena su u „IGH“ Mostar 2016. godine.

U ovom radu je dana analiza rezultata svih ovih ispitivanja kamena *tenelija*.

Ključne riječi: kamen, *Tenelija*, Stari most, ispitivanje, rezultati

Analysis of the available test results for *Tenelija* Stone

Abstract: At the “Mukoša” quarry near Mostar, the layers of *Tenelija* Stone (*Tenelija*) - oolitic limestone, are replaced by layers of *Miljevina* Stone (*Miljevina*) - fine grained limestone, where *Tenelija* is more durable and possesses better physical and mechanical characteristics. Since ancient times they have been used in construction and represent the tradition of the Mostar region. In last twenty years, *Tenelija* and *Miljevina* were re-available, both in modern use and in the reconstruction of war-torn buildings.

Tests of *Tenelija* built in the Old Bridge began in the middle of last century. During the restoration and conservation of the foundation and arch of the Old Bridge in 1963. the stone specimens from the Old Bridge were studied, as well as samples taken from the “Mukoša” quarry because of replacement of the damaged blocks in bridge. Within the project of the reconstruction of the Old Bridge extensive studies of physical and mechanical properties of *Tenelija* from the Old Bridge’s remnants were done, as well as of *Tenelija* extracted from the „Mukoša“ quarry two years earlier (Faculty of Civil engineering in Sarajevo, 1998., Geotechnical institute „LGA“, Nürnberg, 2000/01). Testings were carried out by „IGH-Mostar“ (1998.-2002 and 2006) and by Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering in Tuzla (2003 and 2006). The most extensive research was done in “IGH” Mostar in 2016.

This paper gives an analysis of the results of all these *Tenelija* testings.

Key words: *Tenelija* Stone, Old Bridge, testing, results



1. UVOD

U tektonskim potolinama nastalim u Dinaridima za vrijeme miocena, formirana su slatkovodna jezera, u kojima je dolazilo do taloženja laporovitih vapnenaca, a mjestimično i vapnenaca s visokim sadržajem kalcijevog karbonata. Registrirani su u skoro svim ugljenim bazenima, od Gacka i Miljevine, do Kamengrada i Cazina, različite debljine (od nekoliko do preko 400 m). U stručnoj literaturi se koristi više naziva: **slatkovodni vapnenci, jezerski vapnenci, sedrasti vapnenci, jezerska kreda.**^{1,2}

Odlikuju se znatnim do visokim poroznošću, malim volumnim masama, niskim čvrstoćama i slabom otpornošću na habanje. Vrlo lako se obrađuju, posebno dok je u njima prisutna kamenolomska (majdanska) vlaga.

Jezerski vapnenac *muljika*, odavna je u uporabi u Glamoču, Livnu, Tomislavgradu i Bugojnu. Južnije, oko Posušja i Mostara, ili istočnije, oko Foče, ovaj kamen je u narodu poznat kao *miljevina*, kao i kvalitetniji kamen *tenelija* u ležištu Mukoša kod Mostara, koji pripada gornjemiocenskim slatkovodnim vapnencima.

Jezerski vapnenci imaju dugu tradiciju uporabe od antičkih vremena na većem broju lokaliteta, od krških polja Hercegovine i jugozapadne Bosne (na širem prostoru Mostara, Posušja, Tomislavgrada, Livna, Glamoča), preko Središnje Bosne (Gračanica kod Bugojna i Travnik), do Bihaća. Postoje dokazi o njihovoj uporabi u predrimskom dobu, a Rimljani su ga upotrebljavali za zidanje stambenih, fortifikacijskih i drugih objekata (ranokršćanske bazilike u Cimu-Mostar i Livnu), za nadgrobne spomenike na livanjsko-duvanjsko-glamočkom i ljubuškom području, kao i za različite sakralne predmete. Kasnije su korišteni za gradnju brojnih značajnih građevina: mostova utvrda, vjerskih, javnih i stambenih objekata, nadgrobni spomenika... Sa dolaskom austro-ugarske vlasti na ove prostore, nastavilo se sa njihovom eksploatacijom i korištenjem, kao i zadnjih dva-tri desetljeća...

2. KRATAK OSVRT NA PRIMJENU TENELIJE I/ILI MILJEVINE

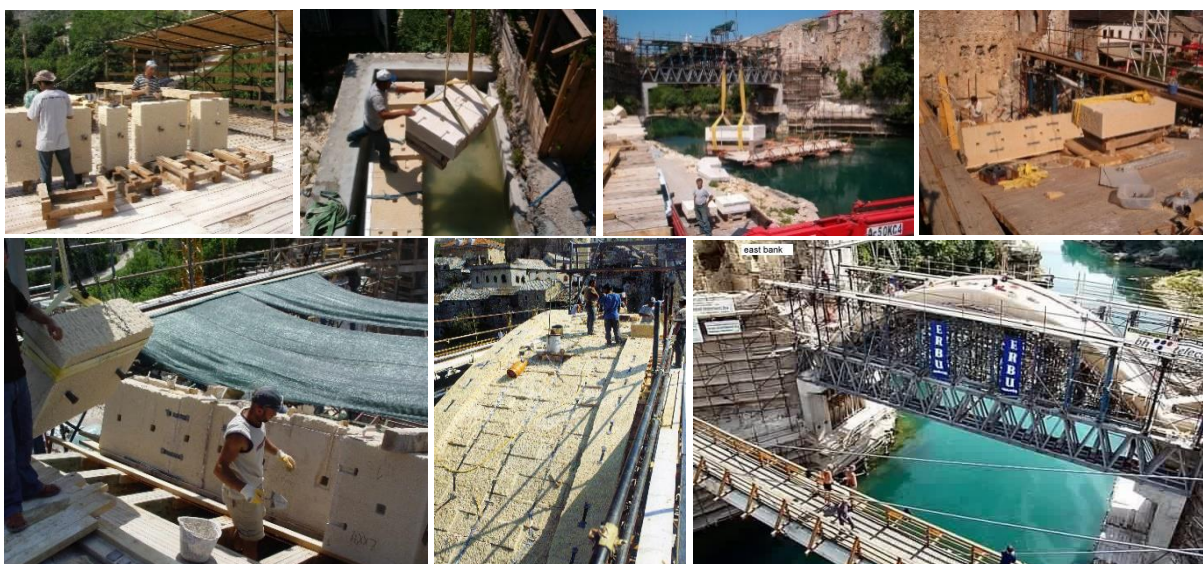
Gdje je bilo *sedre* ili *tenelije*, odnosno vrlo slične *miljevine*, koje se daju lako obrađivati, tamo su i građevine elegantnije, nježnije i profinjenije.³ Zbog nedovoljne postojanosti na mraz primjena *tenelije* u eksterijeru je ograničena na mediteransko podneblje.

Zidanje *tenelijom* je tradicija mostarskog kraja. *Tenelija* se kao arhitektonsko-građevni kamen može primjenjivati za zidanje u građevinarstvu kao obrađen i neobrađen kamen, i to u raznim oblicima: u kvaderima nekoliko tona teškim (svod Starog mosta), u manjim kockama i ugaonicima za zidanje zidova, za okomito oblaganje interijera i eksterijera rezanim pločama različitih formata, rjeđe u podnim pločama nekoliko centimetara debelim, u lomljenim komadima kao ispuna zidova, u raznolikim oblicima nadgrobni spomenika, isturenih profilacija austrijskih zdanja, za izradu stupova i ukrasnih ograda, kao modelarski kamen za izradu skulptura u kiparstvu,....⁴

Gradnja *tenelijom* je bila najraširenija u vrijeme turske vladavine, kada su njome ozidani brojni objekti. Najpoznatija građevina građena *tenelijom*, a i uopće slatkovodnim vapnencima u BiH, je Stari most u Mostaru. Kameni most izgrađen je s vrlo vitkim i elegantnim oblicima da je teško povjerovati da se takva građevina mogla napraviti od ogromnih kamenih blokova. Za građenje mosta trebalo je upotrijebiti samo jednu vrstu kamena - *tenelija*, koja je cjenjenija i skuplja, ali vrlo malim postotkom zastupljena u ležištu Mukoša od *miljevine*. *Tenelija* je korištena za gradnju vitalnih dijelova mosta, a drugi varijeteti u mostu su zastupljeni u malim količinama. Očito je graditelj Starog mosta izvrsno poznao svojstva kamena.



Slike 1.-2. Stari most u Mostaru, UNESCO-ov spomenik, u završnoj fazi rekonstrukcije (lijevo, 2004); Luk i čela su izvedeni od kamena *tenelija* (desno) (foto: K. Šaravanja)



Slike 3.-9. Faze rada luka mosta s *tenelijom*: klesanje, potapanje u vodu, dizanje i ugradba bloka^{5,6,7,8}

Prije Starog mosta, kao „prototip“ za njegovu gradnju, zidana je Kriva ćuprija, mali i najstariji jednolučni kameni most u Mostaru (1558). U razdoblju turske vladavine sagrađeni su, gotovo u potpunosti, od kamena *tenelije* (ili *mulke miljevine*, kako je još zvana), koji ostaje vidljiv na fasadi, brojni vjerski i javni objekti orijentalne arhitekture, kao i veliki broj oblika kamenih ukrasa, okvira i lukova, podnih ploča, stuba i stubišta, te dekorativnih ukrasa...

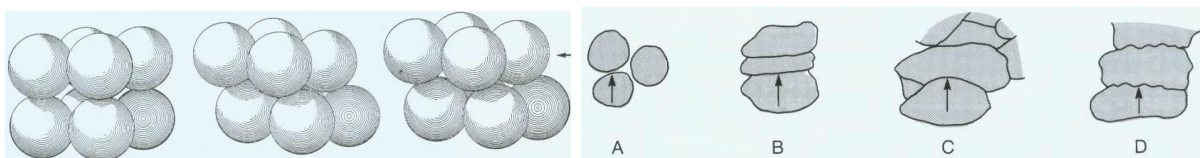
Eksploatacija *tenelije* i *miljevine* na lokalitetu Mukoša, koja je počela u XVI. st., trajala je do sredine XX. st. i stalno je slabila u intenzitetu da bi na kraju spala na desetak kubičnih metara godišnje. Za razdoblje austro-ugarske vladavine u Mostaru karakteristična je gradnja monumentalnih zgrada sa nosivim zidovima prekrivanih fasadom, pri čemu je više bio korišten kamen *miljevina*, a *tenelijom* su, zbog mogućnosti finije obrade površina, zidani fasadni dijelovi objekata. Na nekim pročeljima su klesanci *tenelije* i *miljevine* različite površinske obrade u svojstvu lica zida, te u oblicima okvira prozora, vijenaca, profilacija i ornamentike. Dakle, klasičan način primjene *tenelije* je izmijenjen, pa se koristila u obliku tanke kamene podloge, poprimajući dekorativno-zaštitnu ulogu oblaganja.

Nakon revitalizacije ležišta „Mukoša“ (1997), kamen je nakon više desetljeća ponovno postao dostupan za obnovu ratom porušenih povijesnih zdanja, ali i u suvremenoj primjeni, kada je nekolicina javnih i (stambeno)-poslovnih objekata oblagana *miljevinom* (i *tenelijom*).



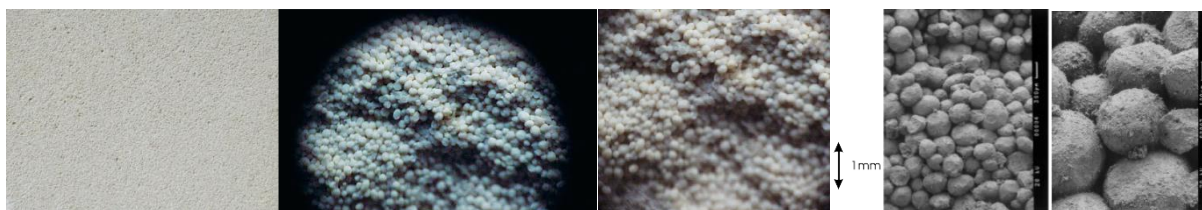
3. MINERALOŠKO-PETROGRAFSKE KARAKTERISTIKE *TENELIJE*

Tenelija je stijena izgrađena od karbonatnih zrna (klasta) koji su mehanički transportirani prije sedimentacije, a potječu od starijih vapnenaca (kreda, paleocen, eocen) lociranih u okolici sedimentacijskog bazena. Ima romboedarsko pakiranje, zbog čega daje visoku poroznost i permeabilnost. Kontakt među zrnima je uglavnom tangencijalni (zrno na zrno).⁹



Slike 10.-11. Romboedarsko pakiranje zrna u *teneliji* (lijevo); Kontakti među zrnima (desno): tangencijalni (A), uzdužni kontakti (B), konkavno-konveksni kontakti (C) i šavni kontakt (D)⁹

Zrna su zaobljena. Pod mikroskopom se uočavaju gusto pakirane skupine sitnih, zaobljenih (kuglastih, rjeđe elipsoidnih/jajolikih) zrna kalcita, međusobno slijepljenih - ooliti (oolide), ujednačene veličine zrna - promjera od 0,2(0,3) do 0,5(0,6) mm, koji su obavijeni koncentričnim ovojima, i karbonatni mulj - mikrit, sa izometričkim kristalima veličine do 30 μm .¹⁰ Ooliti su povezani prirodnim vezivom od kalcita, tj. međuprostor je ispunjen kalcitom ili je prazan prostor. Po cijelosti oblika, to su potpuni ooliti, uzajamno utisnuti, a negdje deformirani. Zbog navedenog, stijena je nazvana *oolitični vapnenac*.



Slike 12.-16. Fotografija rezanog uzorka *tenelije* sa ležišta (lijevo)¹; Oolitična struktura *tenelije* na elektronskom mikroskopu (ostale slike - snimke Institut LGA)^{1,11,12}

Pod mikroskopom je vidljivo da su ooliti negdje zgusnuti, a ponegdje je među njima prazan prostor, koji može primiti vodu, pa čak i plinove, gdje se kasnije može iskristalizirati prevlaka (korica) od raznih materijala. Ovim procesom kamen može dobiti novu nijansu boje, povećanu kemijsku i mehaničku otpornost. Na presjeku pod mikroskopom vide se koncentrični prsteni sa bijelim i tamnim nijansama. Bijele primjese su od minerala kalcita, a tamne primjese su od oksida i hidroksida željeza, mangana i organskih bituminoznih primjesa.



Slike 17.-19. Mikroskopski izgled *tenelije* pri povećanju 8x (lijevo) i 48x (sredina i desno)^{13,10}

Oolitne forme ukazuju na snažna kretanja vode i zasićenost kalcijevim karbonatom. Nastale su nepotpunom litifikacijom oolitičnog pijeska pretaloženog iz visokoenergetskog pličaka s odlikom plimnih oolitičnih pješćanih prudova u lagunu ili niskoenergijskog pličaka s intenzivnim razvojem cijanobakterija koje mikritiziraju podlogu na kojoj rastu.¹⁰ To su geološki mlade



formacije nastale u području plitkih rubnih (priobalnih) dijelova jezerske kotline, u kojoj su bile česte promjene režima sedimentacije i dijagenetskih procesa primarnog ili sekundarnog mineralnog materijala.

Ovisno o ovim promjenama taložili su se i varijeteti bez ili sa vrlo malo oolita guste mikroskopski zrnaste strukture. Izmjena kamena *tenelija* i kamena *miljevina* u ležištu kod Mostara može biti i lateralna, pri čemu prijelaz jednog u drugi varijetet može biti postupan i skokovit. Kratkotrajna promjena režima sedimentacije vidljiva je u pojavi tankih slojeva jednog varijeteta unutar drugog.

Prema ispitivanju mineraloško-petrografskog sastava provedenom u Institutu „IGH“ d.d. Zagreb (1998) na izvađenom kamenu iz Mukoše, *tenelija* je klasificirana kao *oosparit*.

Ooliti *tenelije* se sastoje od relativno krupne jezgre, koju često čine zrnca kvarca (ili nekog drugog *silikatnog* materijala), kao centara kristalizacije kalcita iz vode pri formiranju sferičnih ovoja. Kristalizacijom kalcita zrna (kuglice) su međusobno povezana, a kalcit može biti žućkast, taman ili providan. Na površini oolita nalazi se tanki ovoj mikritnog cementa preko kojeg se ostvaruje veza između oolita. Kako su ooliti međusobno vezani samo na maloj dodirnoj površini (tangencijalni kontakt), stijena ima veliku poroznost, relativno malu čvrstoću, visok stupanj habanja i upijanja vode. Ova svojstva se mijenjaju ako je dio šupljina ispunjen mikritom ili prekrizaliziranim kalcitom. Nijanse boje daju mineralne primjese oksida i hidroksida željeza i mangana. U ležištu se najčešće nalaze varijeteti stijene sa malom količinom mikritnog matriksa, što znači da je ooidni pijesak prije cementacije bio dobro ispran i sortiran.¹⁰

Ovakva građa daje *teneliji* posebna svojstva, koja nemaju „klasični“ vapnenci koji se upotrebljavaju u građevinarstvu. Ima manju prostornu masu i lakša je od sitnozrnate *miljevine* istog kemijskog sastava.

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 razdiobom kamenih struktura unutar slojeva, što je dovelo do sadašnjih mikro i makro razlika među susjednim slojevima.

Što se tiče *miljevine*, do sada nije urađena suvremena mineraloško-petrografska analiza, pa nije još moguća ni njena točna petrografska klasifikacija (dugo se o *miljevini* govorilo kao o podvarijetetu *tenelije*).

Uzorci „*stare tenelije*“ iz ostataka Starog mosta, izvađenih iz rijeke Neretve, i iz upornjaka mosta, kao i uzorci „*nove tenelije*“ na deponiju, iz velikih blokova izvađenih iz ležišta par godina ranije, su analizirani vizualno makroskopski i mikroskopski. Mikroskopskim analizama utvrđeno je da postoje razlike u strukturi (veličina zrna, kompaktnost građe, kemijske transformacije matriksa), što je, vjerojatno posljedica promjena u sedimentaciji u vremenu nastanka samog ležišta. Pretpostavlja se da je materijal koji je korišten pri izgradnji Starog mosta uziman iz drugog horizonta u odnosu na materijal korišten za njegovu obnovu.¹⁴

Kemijska analiza (rendgenskom difraktometrijom) u Institutu Landesgewerbeamtstatt Bayern - LGA Nürnberg (LGA) pokazala je da su uzorci „*stare*“ i „*nove tenelije*“ iz Mukoše čisti kalciti. Dolomit nije nađen u ispitivanim uzorcima. Uzorci su ispitani i na prisustvo minerala glina, koji nisu nađeni.¹⁴

„*Tenelija mekša*“ i „*tenelija čvrsta*“ su imale petrografsku razliku u „gustoći“ oolitnih zrna u cementnoj matrici. Razlike u tvrdoći i karakteristikama površine sloma (tekstura i boja) su bitne za potencijalnu uporabu u arhitekturi. Novi vlasnik ležišta ih je nazvao „*Tenelija I*“ i „*Tenelija II*“, a temeljna razlika je u njihovoj boji. „*Tenelija I*“ je korištena kao nosivi kamen za luk, bez



ograničenja. „*Tenelija II*“ je korištena kao opcija. Obje *tenelije* su korištene u luku i uporcima, što ne može biti lako uočeno. Tu je i *tenelija* iz označena kao „*Tenelija III*“, koja je izgleda bila slabija i korištena je kao ispuna za manje značajne građevine.¹⁵

Detaljne mineraloško-petrografske analize izvršene su u LGA na uzorcima iz srušene konstrukcije mosta, kao i svježim uzorcima iz ležišta. Iz blokova *tenelije* uzeti su uzorci za makroskopska i mikroskopska ispitivanja. Mikropreparati su korišteni za određivanje strukture i mineraloškog sastava. Za petrografske analize korišten je polarizirajući mikroskop (uvećanja od 31,3x do 1.250x), a za određivanje kemijskih komponenti korištena je difraktometrija X zraka. Na temelju rezultata provedenih istraživanja, *tenelija* spada u oolitične vapnence sa općim karakteristikama koje se mogu prezentirati kroz slijedeće navode iz izvještaja LGA:¹⁴ „*Glavne mineralne komponente oolita su generalno: kalcit, dolomit, kvarc, muskovit i pirit. Njihov sadržaj može varirati, dok neke od komponenti mogu nedostajati. Ooliti su sferični produkti sa koncentričnom ili radijalnom strukturom i sa tankim slojevima Ca(Mg)CO₃. Ovi slojevi se javljaju kao aragonit ili kao kalcit. Aragonit s vremenom može prijeći u kalcit. Ova vlaknasta struktura može, u kasnijoj fazi, potpuno ili djelimično nestati uslijed inverzije ili kristalizacije kada Mg-kalcit postane čisti kalcit. Koncentrična škriljasta građa zamjenjuje vlaknastu građu, kada mikronska jezgra počinju akumulirati tanke slojeve na svojoj površini. Pretpostavljeno je da male „jezgre“ sačinjene od npr. klastičnog kvarca ili ostataka mikrofosila, plutaju u turbulentnim vodama (nastale uslijed talasanja), što za posljedicu ima akumuliranje kore od koncentričnih slojeva i vlakana na njihovoj površini. Tokom ovog procesa, njihova masa se povećava dok ne potonu na sediment koji se nalazi na dnu. Odvojena je još jedna vrsta mikročestica u vapnencima, a to su tzv. onkoidi, koji imaju generalno promatrajući, istu strukturu kao i ooliti. Oni su također izgrađeni od koncentričnih slojeva u kojima nema gotovo nikakvih vlaknastih struktura. Onkoidi su pomicali lagano po dnu, što im daje pravilni sferni oblik. Kod eliptičnih formi mikročestica jezgra je najčešće sačinjena od linearne ili plosnate strukture (kao npr. komad školjke). Nađene su i druge nesferične mikročestice, gdje su originalne sfere naknadno podvrgnute asimetričnim abrazivnim silama. Ooliti i onkoidi su transportirani do sedimenta i taloženi u sediment uz pomoć podvodnih struja. Zbog toga se pri promatranju ovog tipa vapnenca može naići na iznenadne promjene u granulaciji, kao i na vrlo porozne slojeve. Raspored zrna u oolitičnim vapnencima često je sličan rasporedu zrna u pijescima sa sličnom veličinom zrna. Struktura oolita ovisi mnogo od dubine akvifera za vrijeme sedimentacije i duljine trajanja sedimentacije (brza sedimentacija ostavlja više otvorenih pora u granulacijskoj strukturi ležišta).*

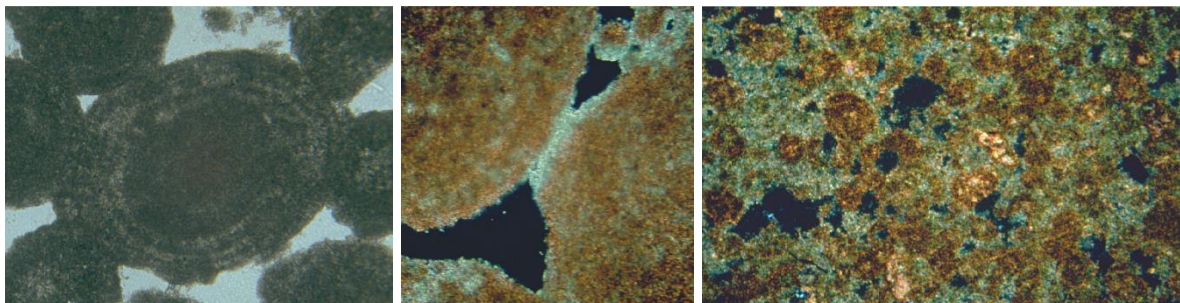
Unutar otvorenih pora mikrogranularnog oolitičnog sedimenta, ponekad dođe do formiranja tanke prevlake izgrađene od pirita. Ovakve prevlake se javljaju samo u gornjim površinama sedimenta i daju jasnu indicaciju orijentacije slojeva zato što su njihov nastanak i oblik, pod utjecajem gravitacije. Pirit se taloži kada pod reduciranim uvjetima u vidu prevlaka na sedimentu rastu alge i bakterije.

Unutar pukotina postoji tendencija razvoja kristala pirita prema dnu sedimenta. Vrlo fini kalcitni mulj i blato postupno prekriva sediment. Romboedarski dolomitični kristali relativno jednolike veličine rastu unutar mikritskog matriksa. U onkoidima se javlja samo mali broj dolomitičnih kristala dijagenetskog porijekla ili je njihova površina prekrivena mikrokristalima dolomita. Također se u onkoidima javlja kvarc. Feldspatski kalcit često prekriva mikropukotine unutar strukture.“

Prema LGA, *teneliju* izgrađuju ooliti koji predstavljaju alokemijske komponente mikritskog kalcita, sastavljenog od karbonatnih čestica mikronskih veličina (5 μ i manje), nastalog uslijed sedimentacije iz vode i razlaganja krutih dijelova organizama u sedimentacijskim bazenima karbonatnih formacija i sparitskog kalcita, sastavljenog od nešto većih zrna (5 μ i više), a to je većinom cement koji ispunjava pore i koji se može stvarati, u sedimentu, dugo vremena nakon sedimentacije.¹⁴



Ispitivanjem mikropreparata „*stare tenelije*“ (B19 i BB37), utvrđeno je da se *tenelija* sastoji od oolita, koji su sfernog oblika i imaju promjer do 2 mm. Ooliti su, prema teoriji, nastali plutanjem inicijalne „jezgre“ u turbulentnoj vodi, pri čemu je na toj jezgri došlo do taloženja čestica (karbonati, klastični kvarc), koje su postupno stvarale koru oko „jezgre“. Ooliti su stvaranjem kore dobivali na masi, dok na kraju ne bi potonuli na dno.¹⁵



Slike 20.-22. Uzorak „*stare tenelije*“ BB37 sa platforme, sa koncentričnim zrnima oolita; uvećanje 125x (Nicols II, lijevo); Uzorak B19 „*stare tenelije*“ iz zida upornjaka - mikritski cement spaja zrna; uvećanje 312,5 Nicols x (sredina); Uzorak SB40 „*nove tenelije*“ – makropore i mikritska matrica; uvećanje 125x (Nicols X, desno)¹⁵

U ispitivanom mikropreparatu „*stare tenelije*“, koncentrično sferna struktura oolita je slabo razvijena. To je posljedica kemijske reakcije pri kojoj dolazi do transformacije aragonit-oolita u kalcitne, nakon koje radijalna struktura nije više vidljiva. Poroznost uzorka je relativno velika. Sadržaj karbonata u uzorku je preko 95%.¹⁴

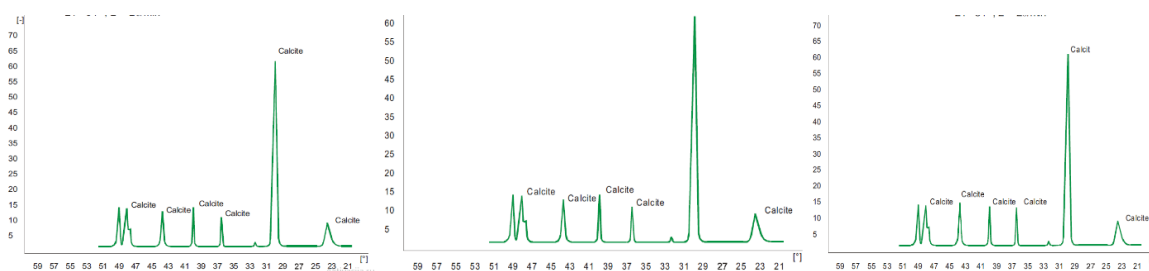
U mikropreparatu „*nove tenelije*“ uzete iz bloka (SB 40) koji se kasnije koristio za izgradnju mosta, utvrđena je manja poroznost u odnosu na druge ispitivane uzorke. Uzorak je izgrađen od oolita (što je poznato iz ranijih studija i literature). Mikropore su djelomično ispunjene mikritskim cementom, a pojavljuju se i pojedine makropore koje su nastale raspadanjem ostataka organizama. Sadržaj karbonata u uzorku je preko 95%.¹⁵

Uzorak je klasificiran kao klasa II, odnosno srednje kvalitete. Uzorak je boje slonovače, sa manje pora (oko 25%) u odnosu na druge proučavane uzorke. Unutar pora nailazi se na ispunu mikritskog cementa. Makropore unutar strukture su vjerojatno ostavljene raspadanjem ljuštura organizama. U kasnijoj genetskoj fazi nekoliko kristalića dolomita je izraslo u mikritnoj matrici. Ovi kristali su gotovo potpuno zamijenili mikritnu matricu, koja je ostala u nišama između zrnaca.

Mikroskopskim i ispitivanjima X-zrakama po klasifikaciji Dunhama (1962), *tenelija* je definirana kao „*Packstone*“, „*Mudstone*“ i „*Grainstone*“. Uzorak „*stare Tenelije*“ pripada „*Packstone*“ tipu vapnenca (kvalifikacija po Dunhamu, 1962). Sadržaj karbonata je preko 95%. Uzorak „*svježe tenelije*“ uzet iz izvađenog bloka iz ležišta Mukoša za rekonstrukciju Starog mosta pripada „*Mudstone*“ tipu vapnenca.¹⁴

Ispitivanjima je zaključeno da nije bilo moguće dobiti istovjetan kamen iz ležišta, koji bi mikroskopski gledano, mogao zamijeniti izvorni kamen iz Starog mosta, s tim da su usporediva njihova fizikalno-mehanička svojstva.

Vapnenac *tenelija* je laboratorijskim ispitivanjima određen kao „*Grainstone*“ (po Dunham-u), odnosno kao *oosparit* (po Folk-u).¹



Slike 23.-25. Difraktometrija X-zrakama (LGA):
uzorak B19 (lijevo), BB37 (sredina) i SB40 (desno)¹⁵

Na mikroskopskom izbrusku *tenelije* vidljiva je koncentrična, slabije razvijena unutarnja struktura oolita koji sadrže u unutarnjoj strukturi jednu ili više koncentričnih ovoja, a neki imaju i radijalnu internu strukturu, koja je loše razvijena i nije jasno vidljiva. Do gubitka izvorne strukture je došlo i zbog transformacije primarnih aragonitskih oolita u kalцит. Poroznost uzorka je visoka (oko 33%). Pore su djelomično ispunjene mikritom koji je nakon taloženja djelomično prešao u dolomit. To su porozne stijene sa varijacijom u veličini zrna, dobrom poroznošću s kemijskom transformacijom matriksa zahvaljujući uvjetima sedimentacije u jezeru.

4. ISPITIVANJA FIZIKALNO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA *TENELIJE*

4.1. Ispitivanja u cilju obnove Starog mosta u Mostaru (1956.-2003)

Boja *tenelije* tek uzete iz ležišta je svijetložute boje, a u vlažnom stanju je svijetlo smeđe boje. U zonama gdje je došlo do izdvajanja oksida željeza ima boju hrđe. Sušenjem dobiva bjeličastu boju, a starenjem svijetlo sivu i sivu boju. Promjena boje u površinskom dijelu blokova posljedica je izloženosti atmosferilijama i razvoju biljnih organizama (algi).¹⁴

Prve raspoložive rezultate ispitivanja *tenelije* ugrađene u Stari most dali su profesori Tufegdžić (1956) i Hahamović (1960) sa Građevinskog fakulteta u Sarajevu, koji su ispitivali neka fizikalno-mehanička svojstva kamena.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava kamena¹⁶

Svojstvo	Jed. mjere	V. Tufegdžić	J. Hahamović
Gustoća (Specifična masa)	g/cm ³	2,56 - 2,63	2,27 - 2,57
Prostorna masa	g/cm ³	2,07 - 2,32	1,70 - 2,27
Upijanje vlage	%	6,0 - 8,5	7,2 - 12,5
Tlačna čvrstoća			
- u suhom stanju	MPa	30,0 - 48,8	12,9 - 57,1
- u vodozasićenom stanju	MPa	23,4 - 43,3	13,9 - 21,6
- nakon 25 ciklusa smrzavanja	MPa	17,1 - 39,4	-
Postojanost na mraz	-	-	Slaba

Prilikom sanacije i konzervacije temelja i svoda Staroga mosta, koju je izvelo poduzeće "Mostogradnja" (1963), proučen je kamen ugrađen u Stari most, ispitani su uzorci na lokalitetu Mukoša i prišlo se zamjeni oštećenih blokova na mostu. Profesor L. Marić (1972) s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta (RGN) u Zagrebu je mikroskopski ispitao uzorke oba varijeteta vapnenca: *tenelije* (i *miljevine*) - fino uslojeni oolitični vapnenici.

Iako je prema Osnovnoj geološkoj karti, List Mostar (V. Raić i J. Papeš, 1977) ova stijena opisana kao vapnoviti lapor i lapor, profesor B. Crnković (1979) je utvrdio da se radi o vapnencu.

Nakon ponovnog otvaranja ležišta „Mukoša“ izvršena su ispitivanja *tenelije* u Institutu građevinarstva Hrvatske („IGH“) d.d. Zagreb (1998), kao i 3 ispitivanja u „IGH-Mostar“ d.o.o.



Mostar (1998-2002), a za eksperimentalni dio diplomskog rada studentice Svjetlane Pekić na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru izvršena su dodatna ispitivanja kamena (2002). Rezultati svih ovih ispitivanja prikazani su u Tablici 2.^{17,18,19}

Za obnovu Starog Mosta u Mostaru izvađeno je 470 blokova volumena 1.250 m³. Kriteriji za ocjenu njihove kvalitete bili su: dimenzije, geometrija, homogenost, stratifikacija, debljina slojeva *tenelije*, proslajavanje s drugim stijenama, ispucalost, mogućnost rezanja za konstruktivne elemente mosta, kontrola ultrazvukom. Svaki blok je vizualno pregledan, okupan, nacrtan, fotografiran, ultrazvukom premjeren i svaki ima indeks karticu. Kako za „stari“, tako i za „novi kamen“ određeni su slijedeći fizikalni i mehanički parametri: petrografska identifikacija kamena, kemijski sadržaj komponenti, vlažnost, upijanje vode, apsorpcija, permeabilnost, kapilarnost, gustoća (specifična masa), poroznost, tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, E-modul, Poissonov koeficijent, Point Load test, brzina ultrazvuka, itd.

Ispitivanja kamena su obuhvatila slijedeće:

- prikupljanje informacija o građevinskim materijalima mosta;
- identifikacija kamena iz stare strukture mosta: uzimanje uzoraka iz starih elemenata mosta, uzimanje uzoraka iz ležišta i kompletna ispitivanja kvalitete „starog“ i „novog kamena“;
- komparaciju dobivenih rezultata ispitivanja „starog“ i „novog kamena“;
- geološka istraživanja ležišta „novog kamena“;
- nadzor na vađenju, rezanju i klesanju kamena.

U pripremi kamena za obnovu Starog mosta I. faza je obuhvaćala vađenje blokova iz ležišta „Mukoša“ iz kojeg je građen Stari most, samo u nižem sloju. Vađenje je bilo strogo kontrolirano od nadzornika za kvalitetu (g. Ante Kršinić, inženjer s Korčule), pri čemu je vođeno računa o slojevitosti (stratigrafiji), minimiziranju otpada i poštivanju kvalitete. U sljedećoj fazi vršeno je pilanje 288 blokova, skladištenje i označavanje. Blokovi su rezani na predviđene dimenzije uvećane za po 2,5 cm na svakoj strani, koji su ručno rezani na gradilištu i stavljani na skelu. Ispitivanja je vršio prof. Zlatko Langof. Geološkim istraživanjima ležišta Mukoša utvrdili su prisutnost sloja od oko 10 m širokog i 1 m visokog.²⁰

Prof. Vignoli je za izrezane blokove *tenelije* tražio minimalnu tlačnu čvrstoću od 30 MPa. U pripremi za rekonstrukciju Starog mosta ispitivanja *tenelije* su vršena i na Građevinskom fakultetu u Sarajevu - Zavod za geotehniku i fundiranje (GFS-GTF) i u Institutu LGA. Dobiveni su rezultati ispitivanja od 12-25 MPa, pa je projektant morao ispraviti proračune. Podneseni izvještaj nije objasnio krajnje visok postotak odbačenog materijala (oko 90%) i nije sadržao precizne definicije različitih kategorija osnovnih kamenih blokova.²⁰ Stoga je sugerirana provjera kvalitete blokova, odnosno njihova verifikacija ispitivanjem ultrazvukom, kao prethodna selekcija. Prihvaćeni su kameni blokovi koji su imali brzine veće od zahtijevanih. Osim na novim kamenim blokovima, ispitivanja zvučnim metodama izvršena su i na ostacima porušenog mosta izvađenim iz rijeke i upornjacima mosta na obje obale. Brzine valova dobivene su metodom ultrazvuka i „impakt-eho“ metodom.¹⁰

Po preporukama ekspertne grupe u „IGH“ d.d. Zagreb su izrađeni zidani modeli za kontrolna ispitivanja morta radi utvrđivanja utjecaja opterećenja od kamenih blokova na tok očvršćavanja i deformiranja morta u spojnica. Izrađeni su mali modeli (uzorci 1-3), oblika kocke brida 200 mm i veliki modeli (uzorci 4-6), dimenzija 400x400x200 mm. U prisustvu ekspertne grupe na uzorku 1 dobivena je tlačna čvrstoća 15,94 MPa i modul elastičnosti 1.767 MPa.

U GFS-GTF su ispitivani uzorci kamena *tenelije* (1998), i to: kamena od ostataka svoda Starog mosta, koji je izvađen iz rijeke i skupljen na platformi montiranoj u blizini mosta („stari kamen - platforma“), i kamena iz blokova predviđenih za obnovu mosta izvađenih iz ležišta „Mukoša“ i uskladištenih na deponiju poduzeća "Komos", Put za Opine („novi kamen - deponij“).¹⁵



U Institutu LGA (2000.-2001) je, uz "*stari kamen - platforma*" i *novi kamen - deponij*", ispitivan i "*stari kamen - most*", kamen iz očuvanih dijelova konstrukcije Staroga mosta (upornjaci mosta i preostali dijelovi svoda). U izvješću LGA ističe kao literaturno poznate - "*teneliju mekšu*" i "*teneliju čvrstu*", sa petrografskom razlikom u „gustoći“ oolitnih zrna u kalcitnoj matrici. Različite čvrstoće i svojstva površine sloma utječu na njihovu primjenu u arhitekturi. U tehničkoj studiji *tenelije* kao gradiva, opis vrste i analiza je zasnovana više na čvrstoći i trajnosti, što među ostalim ovisi od veličine granulacije (grubo i fino granulirani ooliti) i prirodne poroznosti. U raspoloživim studijama korišteni su termini „*gruba*“ i „*fina tenelija*“.¹⁵

Dobavljač kamena je koristio potpuno drukčije označavanje *tenelije* za rekonstrukciju Starog mosta - „*tenelija I*“ i „*tenelija II*“, pri čemu je glavna razlika bila u njihovoj boji, dok su mehanička svojstva bila jednaka.¹⁵ Izgleda da gruba i fina struktura i različite boje iz ležišta - „*tenelija I*“ i „*tenelija II*“ dobro odgovaraju „*teneliji mekoj*“ i „*teneliji čvrstoj*“.

Rezultati ispitivanja dani su u Tablici 2.

4.2. Ispitivanja nakon obnove Starog mosta u Mostaru (2003.-2006)

U ranijem tekstu su spomenuta ispitivanja koja nisu bila u funkciji rekonstrukcije Starog mosta, kao što je spomenuti eksperimentalni dio diplomskog rada na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Mostaru (2002), te kontinuirano praćenje kvalitete *tenelije* u ležištu „Mukoša“ od strane „IGH-Mostar“ u svrhu obnove Gradske vijećnice u Sarajevu. Ispitivanja u „IGH-Mostar“ su nastavljena 2006. godine na 21 uzorku iz 3 istražne bušotine. Dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 2.

Najbrojnija ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava *tenelije* izvršena su na Rudarsko-geološko-građevinskom fakultetu (RGGF) u Tuzli (2003. i 2006) prema starim B.B. normama (kocke brida 50 i 100 mm (postojanost na mraz ispitana na 89 uzoraka označenih kao oznakom IH i pripadajućim brojem koji je određivao pripadnost svakog uzorka pojedinom bloku iz kojeg su uzorci uzeti) i prizme 50x50x100 mm), te po EN normama na uzorcima većih dimenzija (kocke brida 100 mm i prizme 100x100x200 mm), da bi se mogao odrediti utjecaj koji na pojedine ispitivane parametre ima veličina uzorka koji se ispituje. Uzorci su rezani kružnom dijamantnom pilom, mokrim postupkom, na dimenzije određene normama. U obje faze ispitano je oko 170 uzoraka, odabranih iz različitih blokova izvađenog kamena, tako da provedena ispitivanja predstavljaju opći reprezentativni uzorak *tenelije*.¹⁴ Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 2.

4.3. Najnovija ispitivanja

U kolovozu 2016. godine u „IGH“ je izvršeno ispitivanje prirodnog kamena iz istražnih bušotina (B-1, B-2, B-3 i B-4) i raskopa (PEE) na lokalitetu „Mukoša“ prema europskim normama (u Tablici - Revigrad1), kao i ispitivanje prirodnog kamena iz istražnih bušotina (B-1, B-2 i B-3) (Naručitelj: „Revigrad“, Mostar) prema europskim normama (u Tablici - Revigrad2).

U listopadu 2016. godine u „IGH“ je izvršeno ispitivanje prirodnog kamena iz bušotine Ø 80 mm (B-1) i kamenog bloka (BL-1) na lokalitetu „Mukoša-jug“ (naručitelj: „GELD“, Mostar) prema europskim normama. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 2.

Tablica 2. Usporedba raspoloživih rezultata ispitivanja *tenelije* iz ostataka mosta iz „Mukoše“^{14,15,16,17,18,19,21,22,23,24,25}



Hercegovina-zemlja kamena

Lab.	Porijeklo tenelije	Gustoća (g/cm ³)	Prostorna masa (g/cm ³)	Poroznost (%)	Upijanje vode pod atm. tlakom (%)	Postojanost na mrazu	Vodopropusnost [x10 ⁻⁷ cm/s]	Tlačna čvrstoća (MPa)		Savojna č. (MPa)		Posmična čvrstoća φ (°) i c (MPa)				Youngov modul elastičnosti (MPa)	Pois. koef.	Otp. na habanje (cm ³ /50cm ²)
								u suhom stanju	Nakon smrzav.	U suhom stanju (okomito)	u VZ stanju	u suhom stanju okomito	u suhom stanju paralelno	u VZ stanju	u suhom stanju okomito			
GH-Mostar (1998.-2002) prosjek 3 isp.	Mukoša	2.639	1.966	24,2	9,4	Slaba	-	34,66	29,8	-	-	-	-	-	-	48,0 (1 isp.)		
GH-ZG (1998)	Mukoša	2.701	1.951	27,77	9,60	-	-	34,00 (31,4-35,3) ¹	27,5 (20,0-34,6)	26,1 (20,0-32,7)	-	-	-	-	-	48,0		
GFS-GTF (1998)	ostaci mosta iz Neretve	2.700	2.060 vl. 1.920 suh	23	-	-	4,4	20,5	19,0	10,0	8,4	53 ^{9/5}	-	16.600 suh, 16.200 vlaž.	-	-		
	Mukoša	2.700	2.100 vl., 1.930 suh	27	-	-	1,3	20,8	18,0	6,2	5,2	32,8 ^{9/0,099}	-	13.000 suh, 12.500 vlaž	-	-		
Yeralty-Conex	Kamen iz upornjaka mosta	-	-	-	-	-	-	29,05 (6 uz) (11,00-46,42) ⁵	-	-	-	-	50,2-58,9 ⁹ (BG7-83,4 ⁹)/0,000-0,012(BG7-2,250)	-	-	-		
LGA (2000.-2001)	Mukoša (30 uz)	-	-	-	-	-	-	23,00 (11,00-31,70) ⁴	-	-	-	68,4 ⁷ 1,640	78,2 ⁷ 2,033	17.976 (15 uz) (okomito) 17.582 (15 uz) (paralelno)	0,251	-		
	ostaci mosta (platforma) (5 uz)	2.672	2.015	24,6	-	-	11,6	39,90 (37,00-42,20) ²	-	-	-	-	-	16.539 ⁵	-	-		
	upornjaci mosta (6 uz)	2.636	2.018	23,4	-	-	-	36,90 (26,03-47,50) ²	-	-	-	-	-	-	-	-		
	novi kamen (deponiji) (16 uz)	2.665	1.979	25,7	-	slaba	19,6	37,70 (25,30-45,13) ³	-	-	-	-	-	20.220 ⁵	0,205	-		
Dipl. rad (2002)	Mukoša	2.616	1.977	24,4	-	nepost.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,57		
Tenelija (i mljevina)	Mukoša	2.600	1.970	-	9,13	postojan	-	26,0-33,0	-	-	-	-	-	-	-	48,0		
GH-MO (2003)	Mukoša	-	-	-	-	-	-	34,88 (67 uz)	-	-	-	-	-	-	-	-		
GH-MO (2006)	Mukoša	2.250 (2.090-2.710)	2.040 (1.810-2.190)	9,6 (7,1-13,2)	10,7 (10 uz) (7,8 - 15,4)	-	-	24,79 (11,95 - 47,70) (11 uz.)	19,26 (12,83-29,17) (10 uz.)	-	-	-	-	-	-	-		
RGGF Tuzla (I.faza, 2003)	Mukoša	-	1.920 (1.776 - 2.009) (63 uzorka) ⁵	-	-	1,8	-	20,4 okomito (15,3 - 29,5) (40 uzorka) ¹ 18,1 paralelno (15,5 - 25,2) (23 uzorka) ¹	-	-	-	-	-	3.822,2 okomito (1.636,0-5.563,0) (40 uzorka) ¹ 3.530,2 paralelno (2.352,0-4.906,0) (23 uzorka) ¹	-	-		
Geotelnika (2006)	Mukoša	-	-	23,71-25,19	9,16-9,72	-	-	32,45	27-36	-	-	-	-	-	-	-		
RGGF Tuzla (II.faza, 2006)	Mukoša	2.564	1.919 ¹ suho 1.915 ⁴ suho 2.102 VZ st. ^{1,4}	25	9,5 ^{1,4}	-	-	21,5 ^{1,4}	16,8 ^{1,4}	-	-	34 ^o	40 ^o	-	-	-		

¹kočke, ²vajlici 50/125 mm ³vajlici 100/200 mm, ⁴prizme 40x40x80 mm ⁵prizme 100x100x200 mm ⁶posmična čvrstoća bloka ⁷posmična čvrstoća sloja na sloj poslije sloma

⁸Nakon ispitivanja na uzorcima su utvrđene pukotine koje bitno utječu na otporne parametre kamena, pa je zaključeno da tenelija nije postojana na mraz, pa se može koristiti samo u Hercegovini gdje nema velikih kolebanja temperature i do granice smrzavanja



Tablica 3. Rezultati ispitivanja prirodnog kamena iz ležišta „Mukoša“ („IGH“, 2016)

SVOJSTVO		Revigrad1		Revigrad2		GELD	
		Broj uzoraka	Rezultati	Broj idim. uzoraka (mm)	Rezultati	Broj i dim. uzor. (mm)	Rezultati
Gustoća (g/cm ³)		30	2.672 (2.669-2.674)	4 K 50	2.672,4 (2.665,3-2.679,6)	4	2.681,34 (2.678,66-2.685,21)
Prostorna masa (g/cm ³)		30	1.825 (1.822-1.829)	6 K 50	1.805,2 (1.754,00-841,18)	19	2.042,17 (1.854,66-2.226,46)
Ukupna poroznost (%)		30	31,7 (31,6-31,8)	4 K 50	31,7 (31,0-32,4)	4	23,8 (23,8-23,9)
Otvorena poroznost (%)		-	-	6 K 50 mm	27,0 (25,6-28,4)	19	22,0 (15,4-28,2)
Upijanje vode	Pod atm. tlakom	30	14,9 (14,5-15,6)	6 K 50	14,9 (13,8-16,2)	6K 50 + 6Ø 80/80 + 6P40x40x160	10,9 (6,9-14,8)
	Kuhanjem u vodi	-	-	-	-	-	-
Tlačna čvrstoća (MPa)	U suhom stanju	30	18,5 (18,1-19,1)	6 K 50	18,3 (16,6-20,9)	7 K 50 + 5 Ø 80/80	27,2 (20,9-38,9)
	U VZ stanju	30	16,2 (15,9-16,9)	6 K 50	14,7 (11,0-17,9)	7 K 50 + 5 Ø 80/80	16,6 (11,9-24,7)
	Nakon smrzavanja	50	14,6 (14,2-15,3)	10 K 50	13,0 (9,5-18,4)	6 K 50	15,8 (11,2-28,5)
Koef. razmekšanja kvašenjem		-	0,88	-	0,80	-	0,61
Koef. razmekšanja smrzavanjem		-	0,79	-	0,71	-	0,58
Savojna čvrstoća (MPa)	U suhom stanju	30	4,1 (4,0-4,2)	5 P 40x40x160	4,10 (3,54-4,85)	6 P 40x40x160	6,27 (3,60-8,52)
	U VZ stanju	-	-	4 P 40x40x160	2,85 (2,69-3,24)	6 P 40x40x160	4,54 (4,00-5,22)
	Nakon smrzavanja	-	-	5 P 40x40x160	2,17 (1,56-2,63)	6 P 40x40x160	2,57 (1,03-4,94)
Koef. razmekšanja kvašenjem		-	-	-	0,70	-	0,72
Koef. razmekšanja smrzavanjem		-	-	-	0,53	-	0,41
Otpornost na mraz poslije 14 ciklusa		50	Vizualno nema vidljivih oštećenja	10 K 50 + 5 P 40x40x160	*	7K 50 + 6P 40x40x160	0,2 (sr. vrij.) (0,13-1,7)
Otpornost na habanje po Böhmeu (cm ³ /50 cm ²)		30	65,6 (64,0-66,8)	4 K 71	65,605 (62,502-68,187)	4 K 71	64,748 (61,439-67,623)

* Uzorci nisu pokazali nikakve promjene u smislu ljuskanja, krunjenja i prskanja. Čvrsta struktura uzoraka je ostala nepromijenjena, nema promjene prividnog volumena ispitnih uzoraka

5. ANALIZA RASPOLOŽIVIH REZULTATA

5.1. „Stara tenelija“

Kao što je već rečeno, prilikom sanacije i konzervacije temelja i svoda Staroga mosta (1963) proučen je kamen ugrađen u Stari most, izvršena je klasifikacija blokova po stupnju oštećenosti i utvrđeno je da je na mostu bilo 34,5% jače oštećenih blokova. Profesor L. Marić (1972) s RGN u Zagrebu je u svom radu "O kamenu od koga je sadjelan Stari most u Mostaru" detaljno je opisao oštećene blokove na Starom mostu. U konstrukciji Starog mosta bilo je ukupno 65,5% neoštećenih i malo oštećenih kamenih blokova i samo 8,3% blokova sa velikim oštećenjima.^{13,10}

Na GFS-GTF (1998) i u LGA (2000.-2001) su ispitivani uzorci kamena od ostataka svoda Starog mosta, koji je nakon nešto više od 4 godine izvađen iz rijeke i skupljen na platformi montiranoj u blizini mosta („stari kamen - platforma“), a u LGA i „stari kamen - most“, odnosno kamen iz očuvanih dijelova konstrukcije Staroga mosta (upornjaci mosta i preostali dijelovi svoda).¹⁴

Srednje vrijednosti **gustoće (specifične mase)** kretale su se u rasponu 2.636-2.700 kg/m³, a pojedinačni rezultati ispitivanja su bili u još širem rasponu.



Srednje vrijednosti **prostorne mase u suhom stanju** kretale su se u rasponu 1.920-2.018 kg/m³, a srednja prostorna mase vlažnih uzoraka je bila 2.060 kg/m³ (GFS-GTF).

Tenelija se odlikuje i znatnim do visokom **poroznošću**, čija se srednja vrijednost kretala od 23,0-24,6%, pa prema klasifikaciji N. Bilbije, *tenelija* spada u ekstremno porozne materijale.

Vrijednosti **koeficijenta vodopropusnosti** *tenelije* odgovaraju redu veličine za sitne pijeskovke (približno 10⁻⁴-10⁻³ cm/s).¹² Prema raspoloživim rezultatima, koeficijent vodopropusnosti se kretao u rasponu 4,4-11,6 x 10⁻⁴ cm/s.

Vrijednost koeficijenta vodopropusnosti, ispitivanog s hidrauličkim gradijentom 30 koji odgovara visini vodenog stupa od 3 m iznad ispitivanog uzorka, što približno odgovara uvjetima vodostaja rijeke Neretve kod Starog mosta (DIN 18130), kretala se u rasponu 4,83x10⁻⁰⁴-3,44x10⁻⁰³ cm/s.¹⁴

Tablica 4. Rezultati kapilarnog dizanja i sadržaja vode pri potpunom zasićenju (LGA)^{15,14}

Uzorak	Visina uzorka (mm)	Sadržaj vode pri potpunom zasićenju W _{zas} (-)	Vrijeme kapilarnog podizanja do vrha uzorka (minuta)
B 9	100	0,067	15
BA 38	100	0,076	15
B 3	120	0,059	15
B 18	100	0,063	15

Srednje vrijednosti ispitivanja **tlačne čvrstoće u suhom stanju** su se kretale u širokom rasponu vrijednosti od 20,5-39,9 MPa. Gledajući pojedinačne rezultate, a ne srednje vrijednosti istih, raspon rezultata je još širi i kretao se u rasponu 11,00-47,50 MPa.

Ispitivanjem ostataka mosta iz rijeke na GFS-GTF dobivena je prosječna **tlačna čvrstoća u VZ stanju** od 19,0 MPa, pa je koeficijent razmekšanja, uz prosječnu tlačnu čvrstoću u suhom stanju od 20,5 MPa, bio visokih 0,93.

Kod ponovne izgradnje Starog mosta sugerirana je provjera kvalitete blokova, odnosno njihova verifikacija, ispitivanjem ultrazvukom, kao prethodna selekcija. Osim na novim kamenim blokovima predviđenim za obnovu mosta, ispitivanja zvučnim metodama izvršena su i na ostatcima porušenog mosta izvađenim iz rijeke i upornjacima mosta na obje obale. Brzine valova dobivene su metodom ultrazvuka i „impakt-eho“ metodom. Znatno manje brzine valova izmjerene su u kamenu zidova mosta, a jedan od glavnih uzroka je pojava tanke kalcitne kore, skrame, sive boje na površini dijela kamenih blokova, koja je nastala otapanjem i ponovnom kristalizacijom kalcita na površini kamena u uvjetima djelovanja atmosferske i riječne vode koja sadrži veće količine CO₂. Zbog načina ispitivanja na zidovima mosta, predajne i prijemne sonde su postavljane na kalcitnoj kori koja je djelomice ispucala, a na nekim mjestima i odvojena od površine kamena, pa su rezultati ispitivanja na dijelu zidova gdje se pojavljuje kalcitna kora korigirani. Ispitivanja na uzorcima bušenja kamenih blokova zidova mosta pokazala su rezultate koji su se kretali u rasponima dobivenim ispitivanjima na drugim dijelovima konstrukcije, u rasponu 2.900-4.100 m/s, uz srednju vrijednost od 3.480 m/s.¹⁰

Na mjestima gdje je kalcitna kora potpuno formirana kamen u presjeku je pokazao neoštećenu strukturu sa ujednačenim cementnim vezama među oolitima, što znači da ista ima funkciju zaštite od djelovanja atmosferilija, pa iako je poroznost kamena velika, na je ovaj način djelovanje mraza smanjeno. Na malom broju uzoraka kamena dobivenih bušenjem zidova mosta, na dubini do 200 mm, gdje se kalcitna kora nije formirala, pa je djelovanje mraza poremetilo strukturu kamena, posebno na mjestima većeg broja mikropukotina, izmjerene su ekstremno male brzine zvučnih valova i male prostorne mase. Prema tome, ova vrsta kamena vremenom dobiva veću otpornost na djelovanje atmosferilija.¹⁰



Mjereći odskok sklerometra dobivena je informacija o mineraloško-petrografskom sastavu stijene, koji ima najveći utjecaj na rezultate mjerenja. Metoda ne daje dobre rezultate ako je kamen zrnate strukture, napravljen od minerala različite tvrdoće. Homogeni sastav i oolitična struktura *tenelije* ga čine pogodnim za ova ispitivanja. No, kalcificirani sloj na površini povećava površinsku tvrdoću kamena (vrijednosti odskoka u rasponu 30-40), a ispitivanja na kamenu bez kalcificiranog sloja pokazuju manju vrijednost odskoka (približno 20).¹⁰

U LGA je dobivena srednja vrijednost **modula elastičnosti** na prizmatičnim uzorcima od „*starog kamena - platforma*“ od 16.539 MPa, a na GFS-GTF 16.600 MPa u suhom stanju i 16.200 MPa u VZ stanju.

Na uzorcima od „*starog kamena - platforma*“ na GFS-GTF je dobiven **koeficijent vodopropusnosti** u rasponu $4,4-11,6 \times 10^{-4}$ cm/s, a u LGA $11,6 \times 10^{-4}$ cm/s. Dakle, vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti *tenelije* odgovaraju redu veličine za sitne pijeskovke (približno $10^{-4}-10^{-3}$ cm/s).¹⁴

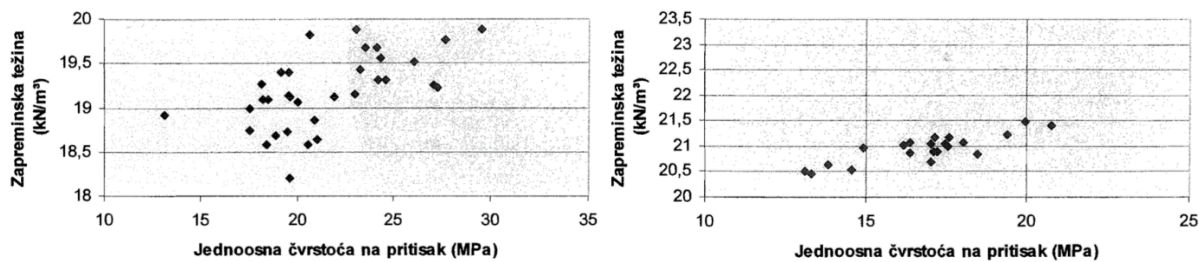
5.2. „Nova tenelija“

Srednje vrijednosti **gustoće (specifične mase)** su se kretale u rasponu 2.600-2.701 kg/m³. Ispitivanjem na RGGF (2006) dobivena je niža srednja vrijednost od 2.564 kg/m³, uz gotovo zanemarivo variranje rezultata, dok je ispitivanjem u „IGH-Mostar“ (2006) dobivena srednja vrijednost na 21 uzorku od samo 2.250 kg/m³, uz veliko rasipanje rezultata (2.090-2.710 kg/m³), pri čemu je dio rezultata značajno odstupao (*miljevina???*).

Rasipanje rezultata kod ispitivanja prostorne mase je još veće u odnosu na gustoće. Srednja vrijednost **prostorne mase u suhom stanju** se kretala u rasponu 1.920-1979 kg/m³, a već spomenutim ispitivanjem u „IGH-Mostar“ je na 10 uzoraka dobivena veća srednja vrijednost od 2.040 kg/m³ (raspon rezultata 1.810-2.190 kg/m³) i mala srednja vrijednost poroznosti od 9,6%, uz raspon rezultata 7,1-13,2%. Na RGGF, uz gore navedeni nešto niži rezultat gustoće, dobivene su ujednačene prostorne mase u obje faze ispitivanja, i to: 1.919 kg/m³ u I. fazi (prizmatični uzorci), a u II. fazi 1.919 kg/m³ (kocke brida 50 mm), odnosno 1.915 kg/m³ (prizme 50x50x100 mm), što ukazuje da oblik i dimenzije ispitnog tijela nisu imali nekog značajnijeg utjecaja na vrijednosti prostorne mase, ali i ukazuje na veliku poroznost, čija je srednja vrijednost iznosila 25%, čime, prema klasifikaciji N. Bilbije, kamen *tenelija* spada u ekstremno porozne materijale. U LGA dobivene prostorne mase u suhom stanju su bile u rasponu 1.904-1.955 kg/m³ (1 uzorak 2.151 kg/m³). Preciznim ispitivanjima na 6 uzoraka dobivena je prosječna vrijednost od 1.942 kg/m³ (uz raspon rezultata od 1.858-1.956 kg/m³, pri čemu 1 rezultat odudara od prosjeka - 2.092 kg/m³).

Srednja vrijednost prostorne mase **u VZ stanju** je bila od 2.100 kg/m³ (GFS-GTF) do 2.135 kg/m³ (LGA, po DIN 18125). Na RGGF, na uzorcima oblika kocke brida 50 mm i prizmicama 50x50x100 mm, je iznosila 2.102 kg/m³ (raspon od 2.087-2.121 kg/m³, 1 uzorak 2.276 kg/m³).

Na RGGF je vršeno i ispitivanje utjecaja promjene prostorne mase na jednoosnu tlačnu čvrstoću. Zbog toga što se vrijednosti prostorne mase nisu bitno mijenjale s promjenom veličine ispitivanih uzoraka, odnos između prostorne mase u suhom stanju i jednoosne tlačne čvrstoće detaljno je ispitan na uzorcima oblika kocke brida 50 mm. Iz prvog dijagrama, s velikim rasipanjem rezultata, ne može se utvrditi jasna korelacija, a iz drugog dijagrama, s manjim rasipanjem rezultata, može se zaključiti da s povećanjem prostorne mase VZ uzorka raste i njegova čvrstoća. Ovakvi rezultati mogu biti posljedica djelovanja vode u porama kao privremenog veziva, preko kojeg čestice djeluju jedna na drugu i tako ostvaruju jače veze koje se odupiru djelovanju vanjskih sila, odnosno, voda „homogenizira“ materijal.

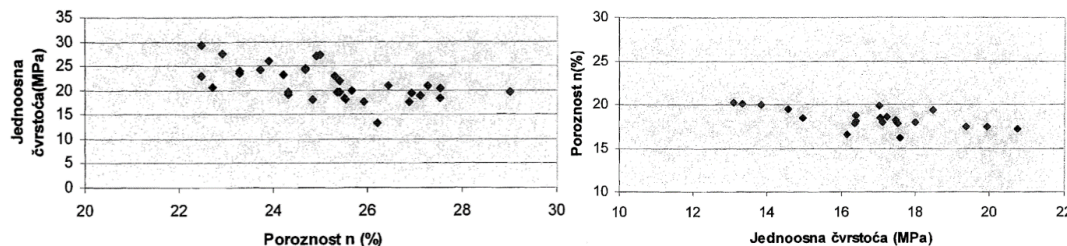


Slike 26.-27. Dijagrami odnosa prostorne mase i jednoosne tlačne čvrstoće suhog uzorka (lijevo) i VZ uzorka (desno)¹⁴

Napomena: čvrstoća na pritisak=tlačna čvrstoća, zapreminska masa=prostorna masa

Tenelija se odlikuje i znatnom do visokom **poroznošću**, čija se srednja vrijednost kretala od 24,2-27,77%. Prema LGA, poroznost *tenelije* je u rasponu 25-30%.¹⁵ Prema klasifikaciji N. Bilbije, kamen *tenelija* spada u ekstremno porozne materijale.

Na sljedećim slikama su prikazani dijagrami odnosa poroznosti (suhog uzorka i VZ uzorka) i jednoosne tlačne čvrstoće (RGGF). Vidljivo je relativno malo rasipanje rezultata, pa se može zaključiti da sa povećanjem poroznosti dolazi do smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće i obratno. Ovakav odnos parametara dovodi do pretpostavke da na čvrstoću *tenelije* više utječe način na koji su ooliti, koji grade materijal povezani, nego količina i zbijenost oolita u samom unutarnjem sklopu *tenelije*. To znači da veću čvrstoću imaju uzorci sa više ispune između čestica koje grade *teneliju*, koja čvršće povezuje čestice i prenosi silu na čitavu površinu djelovanja, nego oni koji su izgrađeni od više čestica (oolita), ali sa manjom količinom ispune.



Slike 28.-29. Dijagrami odnosa jednoosne tlačne čvrstoće i poroznosti suhog uzorka (lijevo) i VZ uzorka (desno)¹⁴

Tenelija je kamen velikog **upijanja vode** (po Tufegdžiću 6,0-8,5%, po Hahamoviću 7,2-12,5%). Rezultati upijanja zasićivanjem pod atmosferskim tlakom su se kretali u rasponu od 9,13-9,60%, uz još veće upijanje dobiveno spomenutim ispitivanjem „IGH-Mostar“ (2006) od 10,70%. Uzrok velike vrijednosti upijanja vode je u samoj strukturu *tenelije*, koja ima veliku poroznost, a veličina uzorka ne utječe značajno na povećanje postotka upijene vlage.

Jedini raspoloživi rezultat upijanja vode u postupku zasićivanja kuhanjem u vodi („IGH-Mostar“) je iznosio 13,61%, pa je dobiveni koeficijent zasićenja (odnos oba rezultata upijanja - 9,18/13,61%) bio 0,68, što sugerira da je *tenelija* postojana na mraz.

Ispitivanja **postojanosti prema mrazu** rađena su u LGA sa dvije grupe uzoraka. Uzorci su u 5 ciklusa podvrgavani temperaturama od -25°C i +25°C. Jedna grupa uzoraka je dodatno podvrgnuta i utjecaju soli, kada su se uzorci brže raspadali od uzoraka na koje nije djelovala sol. Zaključeno da nijedna grupa uzoraka nije prošla test, odnosno da je *tenelija* neotporna na djelovanje mraza.

Prilikom ispitivanja, uzorci *tenelije* su prethodno zasićeni vodom postupkom kuhanja u vodi, kojim se postiže za 33% veću ispunjenost pora vodom u odnosu na postupak zasićivanja vodom pod atmosferskim tlakom. Već nakon 3. ciklusa naizmjeničnog smrzavanja i



odmrzavanja došlo je do pojave pukotina. Uzorci, 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.

Iz ranijih ispitivanja vrijednosti **koeficijenta vodopropusnosti** odgovaraju redu veličine za sitne pijeskovke (približno 10^{-4} - 10^{-3} cm/s).¹² Prema raspoloživim rezultatima, koeficijent se kretao od $1,3$ - $19,6 \times 10^{-4}$ cm/s.

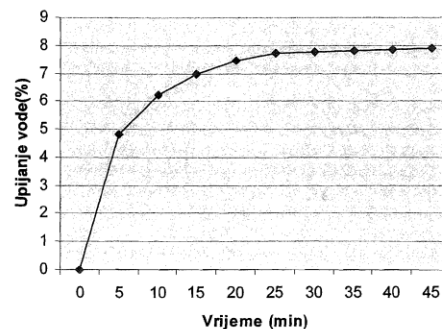
Koeficijent vodopropusnosti, ispitivan sa hidrauličkim gradijentom 30, kretao se od $1,39 \times 10^{-5}$ - $4,22 \times 10^{-3}$ cm/s.

Ispitivanje **kapilarnog podizanja**, pokazalo se da je ono više od samog uzorka, odnosno da je došlo do zasićenja uzorka *tenelije* već nakon 30 minuta. Takvo svojstvo *tenelije* izravna je posljedica njene poroznosti i povezanosti pora unutar stijene.

Tablica 5. Rezultati kapilarnog dizanja i sadržaja vode pri potpunom zasićenju (LGA)^{15,14}

Uzorak	Visina uzorka (mm)	Sadržaj vode pri potpunom zasićenju W_{zas} (-)	Vrijeme kapilarnog podizanja do vrha uzorka (minuta)
SB 47	200	0,077	35
SB 40	200	0,050	25

Utvrđivanje vremena kapilarnog zasićenja i određivanje količine vode koju uzorak upije preko kapilara izvršeno je na 3 prizme dimenzija 50x50x100 mm. Uzorci su dijelom potopljani u vodu čija je razina bila konstantna (dosipanje vode), a mjerena je količina vode koju je uzorak upio kroz određeno vrijeme. Opit je vršen sve do konstantne vrijednosti mase, što je ukazivalo na to da je uzorak kapilarno zasićen. Količina kapilarno upijene vlage na uzorcima je iznosila za 3 uzorka 7,9%, 8,8% i 9,5%.



Slika 30. Dijagram (kapilarnog) upijanja vode¹⁴

Ispitivanjem na istim uzorcima potpune zasićenosti potapanjem u vodu, dobivene su vrijednosti od 8,7%, 9,4% i 10,0%. Male razlike između potpunog i kapilarnog zasićenja ukazuju na to da se kamen *tenelija* pri kapilarnom izdizanju vode, gotovo potpuno zasiti vodom, što je bilo značajno za daljnja izučavanja ponašanja same konstrukcije Starog mosta pri promjenama vodostaja rijeke Neretve.

Na istim uzorcima, nakon njihovog potpunog kapilarnog zasićenja, vršeno je promatranje otpuštanja vode iz uzorka na temperaturi od oko 23°C, vaganjem uzorka svakih pola sata, uz bilježenje razlike u masi. Utvrđeno da i nakon 24 sata (zadnje mjerenje) uzorci ne dostižu masu koju su imali prije početka opita kapilarnog zasićenja, odnosno uzorci nisu otpustili svu upijenu vodu, što znači da se kamen *tenelija* vrlo brzo kapilarno zasiti, a relativno sporo otpušta upijenu vodu iz kapilara.



Jednoaksijalna tlačna čvrstoća je ispitivana u suhom stanju, VZ stanju (rjeđe) i nakon 25 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja (puno rjeđe). Ispitivanja su vršena na uzorcima različitih dimenzija (po EN normama na uzorcima kocke brida 100 mm i prizme 100x100x200 mm, po starim B.B. normama, na uzorcima kocke brida 50 mm i 100 mm, te prizmi 50x50x100 mm, a u LGA na uzorcima oblika valjka, dimenzija 50/100 mm). U nekim slučajevima, ispitivanja su vršena nanošenjem opterećenja i okomito i paralelno stratigrafiji, iako se u većini slučajeva nije vodilo računa o tome, ili to nije istaknuto u izvještajima o ispitivanjima. Nema značajnih odstupanja u čvrstoći ovisno o pravcu opterećivanja (za razliku od *miljevine*). Ipak, u ispitivanjima LGA razlike prosječnih vrijednosti čvrstoće okomito (27,18 MPa) i paralelno stratigrafiji (23,56 MPa) su bile 13,3% (pojedinačno od 4,1-24%). Prema Hrvatoviću i Đuloviću, tlačna čvrstoća u suhom stanju okomito na slojeve kreće se u rasponu od 20-32 MPa, a paralelno slojevima je nešto manja, od 18-30 MPa.

Srednje vrijednosti ispitivanja **tlačne čvrstoće u suhom stanju** su se kretale u širokom rasponu od 20,40-38,16 MPa (odnosno od 20-38 MPa), uz vrlo velike varijacije pojedinačnih rezultata (od 11,0-47,7 MPa). Podsjećamo da je Hahamović dao još širi raspon mogućih rezultata (12,9-57,1 MPa).

Na RGGF, srednja vrijednost dobivene jednoosne tlačne čvrstoće u suhom stanju je iznosila: 21,5 MPa (kocke brida 50 mm), 23,2 MPa (prizme dimenzija 50x50x100 mm), 23,2 MPa (kocke brida 100 mm), 20,4 MPa (prizme dimenzija 100x100x200 mm). Jedan od ciljeva ovih ispitivanja bilo je utvrditi mogući utjecaj veličine ispitivanog uzorka na dobivenu čvrstoću. Na većim uzorcima dobiveni su različiti rezultati srednjih vrijednosti čvrstoća, a ovakav odnos je karakterističan za većinu stjenskih materijala, odnosno, čvrstoća istog materijala je manja kod odnosa $d:h=1:2$ nego kod odnosa $1:1$. Kod ispitivanja manjih uzoraka ovaj odnos je drugačiji, pri čemu se *tenelija* ne ponaša kao ostali materijali. Razlike u rezultatima ispitivanja na različitim dimenzijama uzoraka variraju u malom rasponu (kod nekih stijena variranje može doseći i 50%), bez neke zakonitosti, na temelju čega se može zaključiti da veličina ispitivanog uzorka ne utječe značajno na vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće. Ovaj zaključak se može izvesti i promatranjem uzoraka istih dimenzija, gdje se primjećuje veliko rasipanje rezultata.

Preliminarnim ispitivanjima LGA na 3 uzorka, u svrhu korelacije sa rezultatima dobivenim točkastim opitom, utvrđena je vrijednost od 15,76-26,49 MPa. Čvrstoća određena na temelju točkastog opita se kretala u rasponu od 22,3-31,4 MPa.

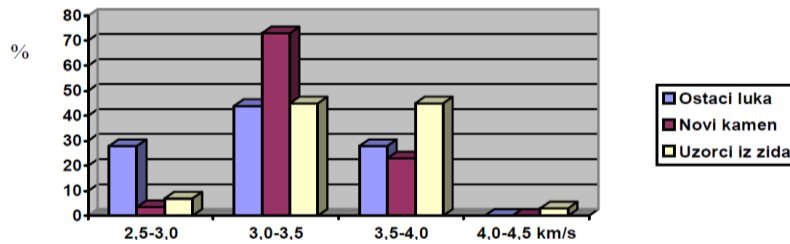
Nadalje, u LGA izvršena su i detaljna ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i Poisson-ovog koeficijenta sa kontroliranim prirastom opterećenja. Kod prve grupe uzoraka (\varnothing 50/100 mm), opterećenje je nanošeno paralelno stratigrafiji, tako da su ti rezultati više „na strani sigurnosti“, a dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće iznosila je 38,16 MPa. Druga grupa uzoraka (100x100x200 mm) ispitivana je nanošenjem opterećenja i okomito i paralelno stratigrafiji, a srednja vrijednost čvrstoće iznosila je 24,15 MPa, uz spomenutu razliku vrijednosti čvrstoće okomito i paralelno stratigrafiji od oko 13,3%. Evidentno je da su neki uzorci prizmatičnog oblika bili gotovo potpuno zasićeni vodom što je utjecalo na srednju vrijednost tlačne čvrstoće. Isto tako je evidentno da uzorci oblika valjka imaju veću srednju vrijednost tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke prizmatičnog oblika, iako je opterećenje kod tih uzoraka nanošeno samo paralelno stratigrafiji. Iz toga se može zaključiti da veličina i oblik uzorka utječu na neki način na čvrstoću samog materijala. Ispitivanja su izvršena prema normi DIN 18136.

Na RGGF na 40 kocki brida 100 mm dobivena je srednja vrijednost tlačne čvrstoće za opterećenje okomito na slojeve u iznosu od 20,4 MPa (raspon od 15,3-29,5 MPa), a paralelno slojevima 18,1 MPa (raspon od 15,5-25,2 MPa) na 23 uzorka (raspon od 15,5-25,2 MPa), uz razliku vrijednosti čvrstoće okomito i paralelno stratigrafiji od oko 12,7%.



Za analizu su bitni rezultati detaljnih, preciznih ispitivanja provedenih u LGA, pri čemu je dobivena prosječna tlačna čvrstoća (okomito na slojeve) od 36,78 MPa, koja bi bila još viša (39,80 MPa) da jedan od rezultata nije bio puno niži od prosjeka (24,7 MPa).

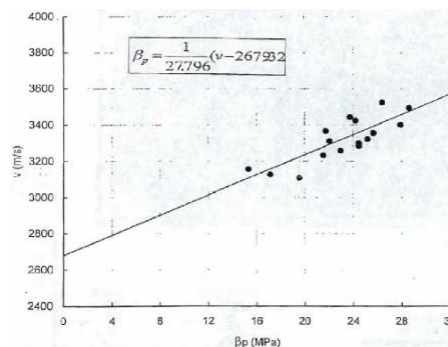
Kod ponovne izgradnje Starog mosta bila je sugerirana provjera kvalitete blokova, odnosno njihova verifikacija, ispitivanjem ultrazvukom, kao prethodna selekcija. Ispitivanja su izvršena na uzorcima bez vidljivih pukotina. Pri ugradnji novih kamenih blokova vršena su kontrolna ispitivanja pa se osigurava ugradnja neoštećenih blokova.



Slika 31. Brzine zvučnih valova u ostacima luka, novim kamenim blokovima i uzorcima iz zida¹⁰

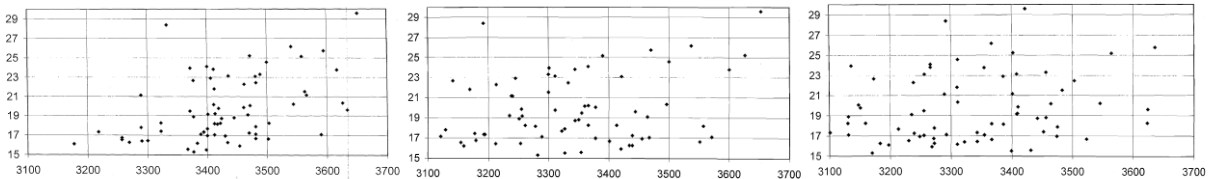
Srednja vrijednost brzine zvučnih valova u kamenim blokovima ostataka luka mosta je iznosila 3.420 m/s (raspon od 2.600-4.000 m/s), a u kamenim blokovima zidova mosta 2.367 m/s (raspon od 800-4.100 m/s). S druge strane, srednja vrijednost brzine zvučnih valova u novim kamenim blokovima predviđenim za rekonstrukciju mosta bila je 3.350 m/s (raspon od 3.000-3.700 m/s).¹⁰

Na RGGF srednja vrijednost brzina longitudinalnih valova okomito na slojevitost na 88 uzoraka iznosila je 3.428,7 m/s (raspon od 3.177,0-3.652,0 m/s), a paralelno slojevitosti na 178 uzoraka iznosila je 3.342,6 m/s (raspon od 3.062,0-3.678,0 m/s).



Slika 32. Korelacijska ovisnost između tlačnih čvrstoća (MPa) i brzina prolaska valova ultrazvuka (m/s), za kamen *tenelija* za Stari most u Mostaru²⁶

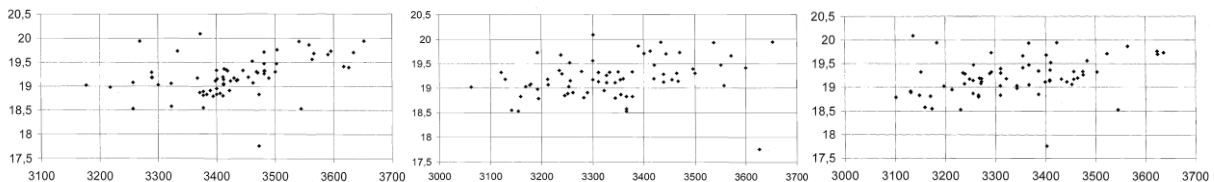
Na RGGF (2003) su izvršeni opiti bez razaranja materijala (određivanje brzine prostiranja longitudinalnih valova i određivanje suhe prostorne mase) i opiti sa razaranjem materijala (jednoosna tlačna čvrstoća i modul elastičnosti). Pokušale su se utvrditi korelacijske veze pojedinih parametara sa brzinom prostiranja longitudinalnih valova kroz kamen, kako bi se bez korištenja razornih metoda mogla odrediti njegova jednoosna tlačna čvrstoća. Međutim, zbog rasipanja rezultata, nije utvrđena čvrsta korelacijska veza ovih parametara. Postoji donja i gornja granica pojave parametara, ali je raspon vrijednosti relativno veliki, bez obzira da li je tlačna čvrstoća određena paralelno ili okomito slojevitosti. Ovo je bio važan podatak jer se kod slaganja blokova kamena *tenelija* u Stari most nije moralo strogo voditi računa o orijentaciji slojevitosti u ugrađenom bloku u most, u odnosu na karakteristike čvrstoće ugrađenog materijala.



Slike 33.-35. Korelacijski dijagram jednoosne tlačne čvrstoće (MPa) i brzine longitudinalnih valova v_1 (m/s; lijevo), odnosno v_{IH1} (m/s; sredina), odnosno v_{IH2} (m/s; desno)¹⁴

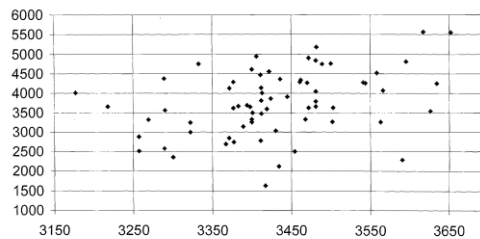
Ako se kod stijenskog materijala, kao što je kamen *tenelija*, povećava prostorna masa, za očekivati je da se povećava brzina prostiranja longitudinalnih valova, odnosno da se povećava tlačna čvrstoća ili modul elastičnosti (pozitivna korelacija). Korišteni su uzorci oblika prizme dimenzija 100x100x200 mm.

Također je utvrđivana i korelacija suhe prostorne mase i brzine longitudinalnih valova da bi se na temelju brzine odredila masa svakog bloka složene forme koju je trebalo ugraditi u most. Postojalo je značajno rasipanje rezultata pa nije dobivena čvrsta korelacijska veza parametara.



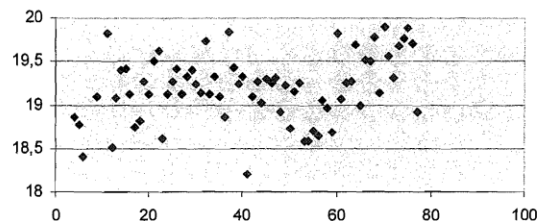
Slike 36.-38. Korelacijski dijagrami suhe prostorne mase (kN/m^3) i brzine longitudinalnih valova v_1 (m/s; lijevo), odnosno v_{IH1} (m/s; sredina), odnosno v_{IH2} (m/s; desno)¹⁴

I u slučaju odnosa modula elastičnosti i brzine longitudinalnih valova rasipanje rezultata je bilo veliko, odnosno nije ustanovljena čvrsta korelacijska veza između tih parametara, vjerojatno kao proizvod niza neodređenosti koje prate materijal i rezultate ispitivanja.



Slika 39. Korelacijski dijagram modula elastičnosti (MPa) i brzine longitudinalnih valova (m/s)¹⁴

U II. fazi ispitivanja na RGGF (2006) cilj ispitivanja je bio utvrditi kakav utjecaj na dobivanje glavnih parametara ima veličina uzoraka na kojima se vrši ispitivanje, kroz usporedbu rezultata ispitivanja u obje faze.



Slika 40. Dijagram varijacije suhe prostorne mase (kN/m^3) - broj uzoraka, na uzorcima oblika kocke brida 50 mm¹⁴



Veliko upijanje vode ima izravan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u uvjetima kvašenja i na otpornost prema mrazu. Broj raspoloživih rezultata ispitivanja **jednoaksijalne tlačne čvrstoće u VZ stanju** je nešto manji, a rezultati su se kretali u rasponu od 16,8-29,8 MPa (V. Tufegdžić 23,4-43,3 MPa; J. Hahamović 13,9-21,6 MPa). Na RGGF srednja vrijednost dobivene jednoosne tlačne čvrstoće u VZ stanju je iznosila 16,8 MPa (kocke brida 50 mm), odnosno 18,4 MPa (prizme dimenzija 50x50x100 mm), što pokazuje da voda ima značajan utjecaj na čvrstoću *tenelije* i da bitno mijenja njena fizikalno-mehanička svojstva (čvrstoća u suhom stanju 21,5 MPa). Voda djeluje na čestice pri čemu smanjuje trenje između njih, ali isto tako utječe i na bolje povezivanje čestica i prenošenje napona između njih („homogenizira“ materijal). Na temelju ovoga se može zaključiti da, zbog velike poroznosti materijala, voda ispunjava sve pore i sam osnovni materijal, što značajno utječe na čvrstoću, odnosno kod VZ *tenelije* voda eliminira utjecaj drugih čimbenika i preostaje kao jedini utjecajni čimbenik na čvrstoću.¹⁴ Smanjenje tlačne čvrstoće uslijed prisutnosti vlage u kamenu izraženo je koeficijentom razmekšanja, kao omjerom čvrstoće u VZ i suhom stanju. Kod *tenelije* je ovaj koeficijent blizu 0,80 ili iznad (kod *miljevine* je ispod te vrijednosti, čak i do 0,60, što je pokazatelj neprikladnosti njene primjene u uvjetima izloženosti kvašenju). Analizom raspoloživih rezultata dobili smo da se koeficijent kreće u rasponu od 0,78 do 0,87 (po LGA Institutu - iznad 0,80).

Tablica 6. Pregled koeficijenata razmekšanja

Lab.	Tlačna čvrstoća [MPa]			Koef. razmekšanja	
	u suhom stanju	u VZ stanju	nakon mržnjenja	3/2	4/2
1	2	3	4	5	6
IGH-Mostar (1998.-2002)	34,66	29,8	-	0,86	-
IGH d.d. Zagreb (1988)	34,0	27,5	26,1	0,81	0,77
GFS-GTF (1998)	20,8	18,0	-	0,87	-
IGH-Mostar (2006)	24,79	19,26	-	0,78	-
Geotehnika (2006)	32,45	27,36	-	0,84	-
RGGF Tuzla (2006)	21,5	16,8	-	0,78	-

Osim što veliko upijanje vode ima izravan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u uvjetima kvašenja, isto ima izravan utjecaj i na otpornost *tenelije* prema mrazu. Nažalost, vrlo rijetko je vršeno ispitivanje jednoaksijalne tlačne čvrstoće nakon 25 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, pa raspolažemo s rezultatom „IGH“ d.d. Zagreb od 26,10 MPa (V. Tufegdžić 17,1-39,4 MPa). Dobiveni koeficijent razmekšanja smrzavanjem, kao omjer čvrstoće na djelovanja mraza i čvrstoće u VZ stanju (26,1/27,5), iznosio je 0,95, što je veće od zahtijevanih 0,75, pa bi zaključak trebao biti da je *tenelija* otporna na djelovanje mraza.

Treba naglasiti činjenicu da se različiti rezultati **otpornosti na mraz** dobivaju ovisno od postupka zasićivanja uzoraka vodom. Tako na pr., imamo izvještaj da je prilikom ispitivanja postojanosti prema mrazu već nakon 3. ciklusa naizmjeničnog smrzavanja i odmrzavanja došlo je do pojave pukotina, dok su uzorci prethodno zasićeni vodom postupkom zasićivanja pod atmosferskim tlakom zadobili prsline nakon 22. ciklusa. 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* (u odnosu na *miljevinu*) 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. Zbog toga je jako važno zaštititi kamen. A i zbog estetskih razloga jer mijenja boju pod utjecajem atmosferilija.

Prema izvještaju „IGH“ d.d. Zagreb (1998) nakon 25 ciklusa smrzavanja utvrđeno je da se kamen pod prstima pjeskuljavo trusi, te da su ponegdje bridovi kamena zaoblili.

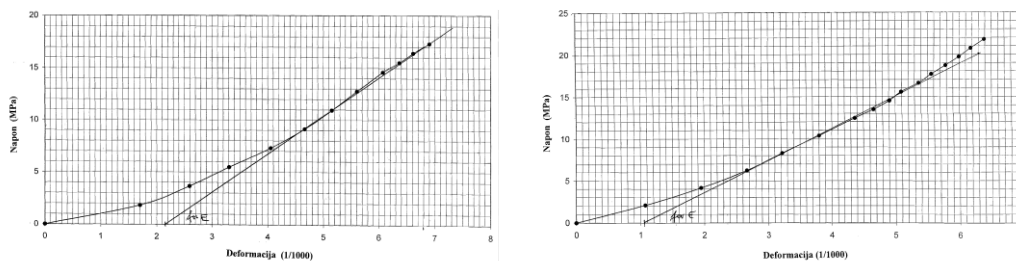


Određivanje postojanosti na mraz na RGGF (2006) nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja vršeno je na uzorcima kocke brida 100 mm. Nakon 25 ciklusa na su utvrđene pukotine koje bitno utječu na parametre otpornosti kamena, pa je zaključeno da *tenelija* nije postojana na mraz, pa se, kao građevinski kamen, može koristiti samo u Hercegovini gdje nema velikih kolebanja temperature i do granice smrzavanja.¹⁴

U cilju određivanja mehaničkih svojstava, izvršena su ispitivanja **posmične čvrstoće** na površinama uzoraka 100x100 mm (vršna i rezidualna). U ispitivanju su korišteni i uzorci u suhom stanju i VZ uzorci. Ispitivanja VZ uzoraka nisu mogla biti vršena u vodi tako da su ti uzorci prilikom ispitivanja gubili 2-3% vlage, što predstavlja veliki gubitak, jer su potpuno zasićeni uzorci imali 7-9% vlažnosti. Prema ranijim ispitivanjima uzoraka *tenelije* dobivene su vršne ($\varphi=52^\circ$ i $c=3$ MPa) i rezidualne ($\varphi=32^\circ$; $c=0$) vrijednosti kuta trenja (φ) i kohezije (c). Ispitivanja koja je proveo LGA dala su drugačije rezultate: $\varphi=70^\circ$ i $c=2$ MPa, koji predstavljaju vršne vrijednosti (suho stanje, paralelno slojevima 78,2⁰ i 2,033, a okomito na slojeve 68,4⁰ i 1,640; u VZ stanju paralelno slojevima 80,2⁰ i 0,069, a okomito na slojeve 72,3⁰ i 0,196). Vršne vrijednosti kuta trenja od $\varphi=52^\circ$ i $\varphi=70^\circ$ su nepostojeće vrijednosti kuta trenja, što ukazuje na to da su ili ispitivanja izvedena pogrešno ili je pogreška nastala u interpretaciji dobivenih podataka.^{14,15}

Na RGGF, dobivene vrijednosti kuta trenja, na površinama 100x100 mm, duž formiranih ravnina, u suhom stanju su iznosile 34⁰, a zasićenom stanju 40⁰, pri manjem normalnom opterećenju, pri čemu se ova vrijednost mijenjala kod određene vrijednosti normalnog opterećenja. Na temelju kuta sloma, utvrđenog pri ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće na kockama brida 100 mm, utvrđen je vršni kut trenja od 26⁰. Razlog dobivanja manjeg vršnog kuta trenja od rezidualnog kuta trenja je što se na ispitanim uzorcima vrlo teško prepoznati „pravu“ ravan sloma. Međutim, i pored toga dobiveni rezultati su puno bliži stvarnom rezultatu, nego kut od $\varphi=70^\circ$, koji je dobiven ispitivanjima LGA. Rezidualni kut trenja, koji je određen ovim opitima, značajan je za promatranje međudjelovanja blokova koji su ugrađeni u konstrukciju Starog mosta.

Modul elastičnosti kamena *tenelija* vrlo je specifičan jer se u početnoj fazi opterećenja odvija sabijanje materijala na račun promjene poroznosti, da bi se nakon ostvarenog sabijanja materijal počeo elastično ponašati do vrlo blisko granici sloma. Mali dio plastičnog ponašanja materijala, nakon iscrpljene elastične deformacije, pokazuje da se materijal u principu ponaša kao kruti materijal, što je i pokazano na dva karakteristična dijagrama provedenih ispitivanja. Modul elastičnosti je računaska veličina određena iz dijela elastičnog ponašanja stjenjskog materijala, što se također može vidjeti na danim karakterističnim dijagramima.



Slike 41.-42. Dijagrami napon-deformacija za uzorke IH-375-82 (lijevo) i IH-287-39 (desno)¹⁴

Ispitivanja materijala u uvjetima histerenog ponašanja sa tri ciklusa pokazuju da se materijal nakon prolaska elastičnog područja u povratnoj deformaciji ponaša i dalje elastično sve dok se skoro potpuno ne rastereti, zadržavajući vrlo visoki stupanj trajne deformacije nakon svakog od ponovljenih ciklusa što je pokazano na dva karakteristična dijagrama.



Određivanje statičkog modula elastičnosti i Poisson-ovog koeficijenta izvršeno je u LGA. U LGA srednja vrijednost modula elastičnosti na prizmatičnim uzorcima je bila 20.220 MPa (18.000-23.300 MPa), a vrijednosti Poisson-ovog koeficijenta su bile od 0,200-0,209, osim jednog rezultata koji je iznosio 0,088.^{14,15}

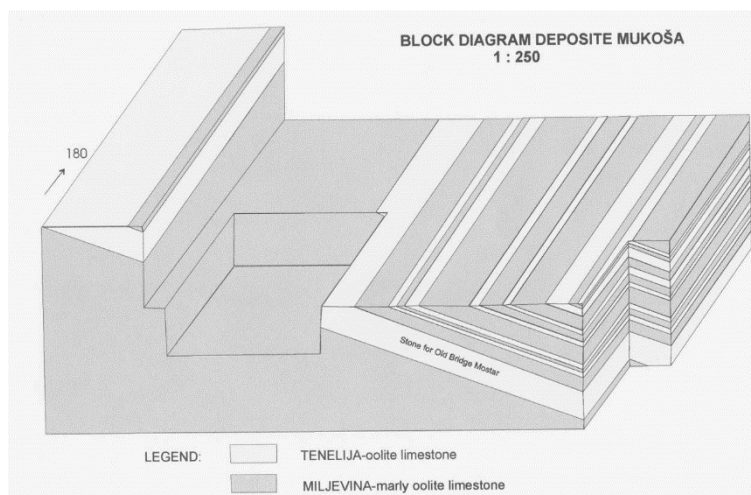
Srednja vrijednost modula elastičnosti na RGGF za opterećenje na 40 uzoraka uzorka okomito na slojevitost iznosi 3.822,2 MPa (raspon od 1.636,0-5.563,0 MPa), a paralelno na slojevitost za 23 uzorka 3.530,2 MPa (raspon od 2.532,0-4.906,0 MPa).¹⁴

Vrijednosti modula deformacije kamena za rekonstrukciju mosta iz ležišta, bile su u rasponu 19.000-23.300 MPa, uz srednju vrijednost od 20.220 MPa.

Tenelija spada u izrazito mekan kamen, odnosno slabu **otpornost na habanje**. Rezultat otpornosti na habanje **prema Böhme-u** iznosio je 48 cm³/50 cm² (prema Hrvatoviću i Đuloviću 45,57 cm³/50 cm²).⁹

6. ZAKLJUČCI

Kao što je već naglašeno, u ležištu „Mukoša“ kod Mostara riječ je o jezerskim sedimentima nastalim u području plitkih rubnih dijelova jezerske kotline, u kojoj su bile česte promjene režima sedimentacije, ovisno o kojima su se taložili *tenelija* i *miljevina*. Njihova izmjena može biti i lateralna, pri čemu prijelaz jednog u drugi varijetet može biti postupan i skokovit. Kratkotrajna promjena režima sedimentacije vidljiva je u pojavi tankih slojeva jednog varijeteta unutar drugog. U procesu dijageneze stijena je zadobila takav oblik pakiranja zrna (oolitična struktura) da joj dalo posebna svojstva (poroznosti i permeabilnosti), koja nemaju „klasični“ vapnenci koji se upotrebljavaju u građevinarstvu, a što je bilo presudno za izbor ovog kamena za gradnju Starog mosta...



Slika 43. Blok dijagram ležišta *tenelije* „Mukoša“^{9,14}

Tijekom više od pola stoljeća vršena su relativno brojna ispitivanja *tenelije*, posebno vezano za obnovu Starog mosta. Autori ovog članka su prvo analizirali rezultate ovih ispitivanja za razdoblje prije i poslije obnove Starog mosta. Kasnije je odlučeno posebno analizirati rezultate uzoraka „stare *tenelije*“ (iz ostataka Starog mosta, izvađenih iz rijeke Neretve, i iz upornjaka mosta), kao i rezultate uzoraka „nove *tenelije*“ iz velikih blokova izvađenih iz ležišta. Kod obnove Starog mosta bila je sugerirana provjera kvalitete blokova, odnosno njihova verifikacija, ispitivanjem ultrazvukom, kao prethodna selekcija. Osim na novim kamenim blokovima predviđenim za obnovu mosta, ispitivanja zvučnim metodama izvršena su i na



ostatcima porušenog mosta. Rezultati ispitivanja su pokazali da „*nova tenelija*“ i „*stara tenelija*“ imaju približno ista fizikalno-mehanička svojstva, dok je dio ispitivanih kamenih blokova ostataka luka bio izložen snažnim dinamičkim utjecajima uslijed rušenja, pa su ti rezultati isključeni iz analize. Ispitivanjima *tenelije* je zaključeno da nije bilo moguće dobiti istovjetan kamen iz ležišta, koji bi mikroskopski gledano, mogao zamijeniti izvorni kamen iz Starog mosta, s tim da su usporediva njihova fizikalno-mehanička svojstva i nisu bila bitno lošija od svojstava kamena koji je korišten za njegovu izgradnju. To znači da genetski uvjeti u dijelovima ležišta kamena namijenjenih izgradnji i rekonstrukciji Starog mosta nisu bili bitno različiti, iako je mikroskopskim analizama utvrđeno da su postojale razlike u strukturi (veličina zrna, kompaktnost građe, kemijske transformacije matriksa), što je, vjerojatno posljedica promjena u sedimentaciji u vremenu nastanka samog ležišta. Stoga se pretpostavlja se da je materijal koji je korišten pri izgradnji Starog mosta uziman iz drugog horizonta u odnosu na materijal korišten za njegovu obnovu.

Mikroskopskim i ispitivanjima X-zrakama po klasifikaciji Dunhama (1962), uzorak „*stare Tenelije*“ pripada „*Packstone*“ tipu vapnenca, a uzorak „*svježe tenelije*“ uzet iz izvađenog bloka iz ležišta Mukoša za rekonstrukciju Starog mosta pripada „*Mudstone*“ tipu vapnenca. Kamen koji je korišten za obnovu Starog Mosta u Mostaru, poznat pod imenom laboratorijskim ispitivanjima određen je kao „*Grainstone*“.

Prema ispitivanju mineraloško-petrografskog sastava provedenom u „IGH“ Zagreb (1998) na izvađenom kamenu iz Mukoše, *tenelija* je klasificirana kao *oosparit* (po Folk-u).

Što se tiče *miljevine*, do sada nije urađena suvremena mineraloško-petrografska analiza, pa nije još moguća ni njena točna petrografska klasifikacija (dugo se o *miljevini* govorilo kao o podvarijetetu *tenelije*).

Zbog visoke poroznosti (*nova tenelija*) (kada je tek izvađena iz ležišta) sadrži veliku količinu kamenolomske (majdanske) vlage, koja može sadržavati rastvorene soli. Sušenjem kamena, soli zajedno s vlagom migriraju prema površini kamena gdje kristaliziraju stvarajući patinu. Prazni prostor u strukturi može primiti vodu, pa i plinove, gdje se kasnije može iskristalizirati prevlaka-korica od raznih minerala. Tako procesom starenja („*stara tenelija*“), uz formiranje patine na površini, kamen može dobiti novu nijansu boje, te povećanu mehaničku (i kemijsku) otpornost.

Na površini se vremenom gubi dio veziva između zrnaca oolita pod utjecajem atmosfere vode sa ugljičnom kiselinom, zbog čega ta zrnca strše na površini, koja postaje otpornija uslijed svog smanjivanja. Površina kamena je stabilnija, otpornija, zadržavajući oštre rubove i kutove. Prazni prostor oko zrnaca je dovoljan da se primljena atmosfere voda može širiti poslije smrzavanja. Još jedna odlika *tenelije* je ta da oolitična struktura omogućava stvaranje ravnih prirodnih ili umjetnih pukotina, kroz koje lakše cirkulira voda sa kalcij hidrokarbonatom, koji tada kristalizira kao kalcit i pritom „zacijeli“ pukotinu. Ovaj prirodni proces je uočen prilikom pregleda blokova na Starom mostu.

Dakle, iako su na svježe izvađenim uzorcima kamena iz stjenske mase („*nova tenelija*“) dobiveni nepovoljni rezultati postojanosti, o svojstvima i trajnosti *tenelije* ipak najbolje svjedoči ugrađeni kamen u Stari most i druge građevine iz bliže i daljnje prošlosti („*stara tenelija*“), koje stoljećima odolijevaju atmosferilijama, vremenskim nepogodama i potresima.

Videoendoskopskim ispitivanjima zidova mosta konstatirana su brojna oštećenja koja su rezultat utjecaja vanjskih faktora. Neke od pukotina ispunjene su kristalima kalcita koji bitno poboljšavaju mehanička svojstva oštećenog kamena. Ova pojava „samozaliječenja“ rezultat je rekristalizacije kalcita u uvjetima cirkuliranja atmosfere, riječne i podzemne vode.



Analizom je ustanovljena vrlo velika varijabilnost rezultata ispitivanja „*nove tenelije*“, koja je više izražena od razlika „*stare*“ i „*nove tenelije*“, kao i još veće razlike između *tenelije* i *miljevine*. Da se zaključiti da ležište 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 razdiobom kamenih struktura unutar slojeva, što je dovelo do sadašnjih mikro i makro razlika među susjednim slojevima. Stoga, kod uzimanja uzoraka iz ležišta, treba voditi računa o mjestu odakle se uzima pojedini uzorak, odnosno posebnu pozornost treba posvetiti odabiru kamena u odnosu na vizualno uočljive varijacije u građi, poroznosti ili boji. Na taj način se mogu razdvojiti *tenelija* i *miljevina*, koje su „isprepletene“ u ležištu. Što se tiče *miljevine*, do sada nije urađena suvremena mineraloško-petrografska analiza, pa nije još moguća ni njena točna petrografska klasifikacija (dugo se o *miljevini* govorilo kao o podvarijetetu *tenelije*).

U tehničkoj studiji *tenelije* kao građiva, opis vrste i analiza je zasnovana više na čvrstoći i trajnosti, što među ostalim ovisi od veličine granulacije (grubo i fino granulirani ooliti) i prirodne poroznosti.

Odlikuju se znatnom do visokom poroznošću, malim volumnim masama, niskim čvrstoćama i slabom otpornošću na habanje. Vrlo lako se obrađuju, posebno dok je u njima prisutna kamenolomska vlaga.

Ispitivanja pojedinih fizikalno-mehaničkih parametara kamena *tenelija* dali su nam niz vrijednosti koji u statističkoj obradi omogućavaju utvrđivanje srednjih vrijednosti, kao i raspona od minimalne do maksimalne vrijednosti svakog pojedinog parametra. Pri tome, rasipanja rezultata pojedinih parametara su bila u relativno širokim granicama, pokazujući da frekvencija razdiobe ne pripada klasičnoj Gauss-ovoj statističkoj normalnoj razdiobi. Tip razdiobe vrijednosti pojedinih parametara je različit i u principu ne daje tzv. simetričnu razdiobu. Tako se kod tlačne čvrstoće okomito na slojevitost pojavljuje srednja vrijednost te čvrstoće, a da je u dijagramu ta vrijednost sa najmanjom frekvencijom. Kod tlačne čvrstoće paralelno slojevitosti javlja se tipična nesimetrična razdioba koja ima karakteristike tzv. gama razdiobe. Najveći broj vrijednosti čvrstoće u dijagramu frekvencije je ispod srednje vrijednosti, što logično daje vrijednost tlačne čvrstoće paralelno slojevitosti značajno manje u odnosu na tlačnu čvrstoću okomito na slojevitost. Modul elastičnosti u dijagramu frekvencije pokazuje različito ponašanje u smislu razdiobe stvarajući vrlo spljoštenu normalnu razdiobu kod opterećenja paralelno slojevitosti i asimetričnu razdiobu kod opterećenja okomito na slojevitost. Korelacija pojedinih parametara pokazala je da postoji niz neutvrđenih utjecajnih čimbenika koji onemogućavaju uspostavljanje čvrstih korelacijskih veza tih parametara. Rasipanje rezultata u korelacijskom odnosu parametara je veliko, pa se ne mogu ustanoviti čvrste korelacijske veze. Ovo je važna konstatacija jer se na temelju metoda bez razaranja (određivanje brzina longitudinalnih valova) ne mogu točno ustanoviti parametri koji predstavljaju karakteristične veličine za projektiranje (čvrstoća i modul elastičnosti). Korelacija parametara otkrila je da postoji niz neodređenosti, nepoznatog izvora, koje onemogućavaju uspostavljanje čvrste korelacijske veze između ispitivanih parametara, kakve postoje za pojedine vrste stjenkog materijala.

Prema dobivenim rezultatima i kategorizacijama arhitektonsko-građevnog kamena, *tenelija* spada u srednje težak kamen. Srednje vrijednosti gustoće (specifične mase) „*nove (svježe) tenelije*“ kretale su se u rasponu 2.600-2.701 kg/m³. Rasipanje rezultata kod ispitivanja prostorne mase je bilo još veće u odnosu na gustoće. Srednje vrijednosti prostorne mase u suhom stanju su se kretale u rasponu 1.920-1979 kg/m³.

Tenelija se odlikuje znatnom do visokom poroznošću, čija se srednja vrijednost kretala u rasponu 24,2-27,77%. Prema LGA, poroznost *tenelije* je u rasponu 25-30%.¹¹ Prema klasifikaciji N. Bilbije, *tenelija* spada u ekstremno porozne materijale.



Ispitivanjem korelacije poroznosti (suhog uzorka i VZ uzorka) i jednoosne tlačne čvrstoće vidljivo je relativno malo rasipanje rezultata, pa se može zaključiti da sa povećanjem poroznosti dolazi do smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće i obratno. Ovakav odnos parametara dovodi do pretpostavke da na čvrstoću *tenelije* više utječe način na koji su ooliti, koji grade materijal povezani, nego količina i zbijenost oolita u samom unutarnjem sklopu *tenelije*. To znači da veću čvrstoću imaju uzorci sa više ispune između čestica koje grade *teneliju*, koja čvršće povezuje čestice i prenosi silu na čitavu površinu djelovanja, nego oni koji su izgrađeni od više čestica (oolita), ali sa manjom količinom ispune.

Tenelija je kamen velikog upijanja vlage, koje je zasićivanjem pod atmosferskim tlakom iznosilo 9,13-9,60%, a jedini raspoloživi rezultat upijanja u postupku zasićivanja kuhanjem u vodi je iznosio 13,61%, pa je dobiveni koeficijent zasićenja (odnos oba rezultata upijanja - 9,18/13,61%) bio 0,68, što sugerira da je *tenelija* postojana na mraz. Uzrok velikog upijanja vode je u samoj strukturu *tenelije*, koja ima veliku poroznost, a veličina uzorka ne utječe značajno na povećanje postotka upijene vlage.

Što se tiče postojanosti prema mrazu, ispitivanjem u LGA kroz 5 ciklusa na temperaturama od -25°C/25°C zaključeno da je *tenelija* neotporna na djelovanje mraza. Jedna grupa uzoraka je dodatno podvrgnuta i utjecaju soli, kada su se uzorci još brže raspadali.

Prilikom ispitivanja otpornosti kroz 25 ciklusa, uzorci *tenelije* su prethodno zasićeni vodom postupkom kuhanja u vodi, kojim se postiže za 33% veću ispunjenost pora vodom u odnosu na postupak zasićivanja vodom pod atmosferskim tlakom. Već nakon 3. ciklusa naizmjeničnog smrzavanja i odmrzavanja došlo je do pojave pukotina. Uzorci, 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.

Ispitivanje kapilarnog podizanja pokazalo se da je do zasićenja uzoraka *tenelije* došlo već nakon 30 minuta, kao posljedica njene poroznosti i povezanosti pora unutar stijene.

Male razlike između potpunog i kapilarnog zasićenja ukazuju na to da se kamen *tenelija* pri kapilarnom izdizanju vode, gotovo potpuno zasiti vodom, što je bilo značajno za daljnja izučavanja ponašanja same konstrukcije Starog mosta pri promjenama vodostaja rijeke Neretve. Na istim uzorcima, nakon njihovog potpunog kapilarnog zasićenja, vršeno je promatranje otpuštanja vode iz uzorka na temperaturi od oko 23°C, vaganjem uzoraka svakih pola sata, uz bilježenje razlike u masi. Utvrđeno da i nakon 24 sata (zadnje mjerenje) uzorci ne dostižu masu koju su imali prije početka opita kapilarnog zasićenja, odnosno uzorci nisu otpustili svu upijenu vodu, što znači da se kamen *tenelija* vrlo brzo kapilarno zasiti, a relativno sporo otpušta upijenu vodu iz kapilara.

Jednoaksijalna tlačna čvrstoća je ispitivana u suhom stanju, VZ stanju (rjeđe) i nakon 25 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja (puno rjeđe). U nekim slučajevima, ispitivanja su vršena nanošenjem opterećenja i okomito i paralelno stratigrafiji, iako se u većini slučajeva nije vodilo računa o tome, ili to nije istaknuto u izvještajima o ispitivanjima. Nema značajnih odstupanja u čvrstoći ovisno o pravcu opterećivanja (za razliku od *miljevine*). Ipak, u ispitivanjima razlike prosječnih vrijednosti čvrstoće okomito i paralelno stratigrafiji su bile oko 12,7% (RGGF), odnosno oko 13,3% (LGA).

Srednje vrijednosti ispitivanja tlačne čvrstoće u suhom stanju su se kretale u širokom rasponu od 20,40-38,16 MPa, uz vrlo velike varijacije pojedinačnih rezultata. Jedan od ciljeva ovih ispitivanja bilo je utvrditi mogući utjecaj veličine ispitivanog uzorka na dobivenu čvrstoću. Na većim uzorcima dobiveni su različiti rezultati srednjih vrijednosti čvrstoća, a ovakav odnos je



karakterističan za većinu stjenskih materijala, odnosno, čvrstoća istog materijala je manja kod odnosa $d:h=1:2$ nego kod odnosa $1:1$. Kod ispitivanja manjih uzoraka ovaj odnos je drugačiji, pri čemu se *tenelija* ne ponaša kao ostali materijali. Razlike u rezultatima ispitivanja na različitim dimenzijama uzoraka variraju u malom rasponu (kod nekih stijena variranje može doseći i 50%), bez neke zakonitosti, na temelju čega se može zaključiti da veličina ispitivanog uzorka ne utječe značajno na vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće. Ovaj zaključak se može izvesti i promatranjem uzoraka istih dimenzija, gdje se primjećuje veliko rasipanje rezultata.

Na RGGF (2003) su kroz opite bez razaranja materijala (određivanje brzine prostiranja longitudinalnih valova i određivanje suhe prostorne mase) i opiti sa razaranjem materijala (jednoosna tlačna čvrstoća i modul elastičnosti) pokušali utvrditi korelacijske veze pojedinih parametara sa brzinom prostiranja longitudinalnih valova kroz kamen, kako bi se bez korištenja razornih metoda mogla odrediti njegova jednoosna tlačna čvrstoća. Međutim, zbog rasipanja rezultata, nije utvrđena čvrsta korelacijska veza ovih parametara. Raspon vrijednosti je bio relativno veliki, bez obzira da li je tlačna čvrstoća određena paralelno ili okomito slojevitosti. Ovo je bio važan podatak jer se kod slaganja blokova kamena *tenelija* u Stari most nije moralo strogo voditi računa o orijentaciji slojevitosti u ugrađenom bloku u most, u odnosu na karakteristike čvrstoće ugrađenog materijala. Nije utvrđena ni korelacija suhe prostorne mase i brzine longitudinalnih valova da bi se na temelju brzine odredila masa svakog bloka složene forme koju je trebalo ugraditi u most.

Veliko upijanje vode ima izravan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u uvjetima kvašenja i na otpornost prema mrazu. Broj raspoloživih rezultata ispitivanja jednoaksijalne tlačne čvrstoće u VZ stanju je nešto manji, a rezultati su se kretali u rasponu od 16,8-29,8 MPa. što pokazuje da voda ima značajan utjecaj na čvrstoću *tenelije* i da bitno mijenja njene fizikalno-mehaničke karakteristike (čvrstoća u suhom stanju 21,5 MPa). Već je rečeno da je ustanovljeno da povećanjem prostorne mase VZ uzorka raste i njegova čvrstoća. Ovakvi rezultati mogu biti posljedica djelovanja vode u porama kao privremenog veziva, preko kojeg čestice djeluju jedna na drugu i tako ostvaruju jače veze koje se odupiru djelovanju vanjskih sila, odnosno, voda „homogenizira“ materijal. Dakle, voda djeluje na čestice pri čemu smanjuje trenje između njih, ali isto tako utječe i na bolje povezivanje čestica i prenošenje napona između njih. Na temelju ovoga se može zaključiti da, zbog velike poroznosti materijala, voda ispunjava sve pore i sam osnovni materijal, što značajno utječe na čvrstoću, odnosno kod VZ *tenelije* voda eliminira utjecaj drugih čimbenika i preostaje kao jedini utjecajni čimbenik na čvrstoću. Istodobno, nisu dobivene korelacije prostorne mase u suhom stanju i čvrstoće, a ispitivanjima je potvrđeno da oblik i dimenzije ispitnih uzoraka nisu imali nekog značajnijeg utjecaja na dobivene vrijednosti rezultata.

Smanjenje tlačne čvrstoće uslijed prisutnosti vlage u kamenu izraženo je koeficijentom razmekšanja, kao omjerom čvrstoće u VZ i suhom stanju. Kod *tenelije* je ovaj koeficijent blizu 0,80 ili iznad (kod *miljevine* je ispod te vrijednosti, čak i do 0,60, što pokazatelj neprikladnosti njene primjene u uvjetima izloženosti kvašenju). Analizom raspoloživih rezultata dobili smo da se koeficijent kreće u rasponu od 0,78 do 0,87 (po LGA Institutu - iznad 0,80).

Osim što veliko upijanje vode ima izravan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u uvjetima kvašenja, isto ima izravan utjecaj i na otpornost *tenelije* prema mrazu. Dobiveni koeficijent otpornosti na djelovanje mraza („IGH“ d.d. Zagreb, 1998), kao omjer čvrstoće na djelovanja mraza i čvrstoće u VZ stanju (26,1/27,5), iznosio je 0,95, što je veće od zahtjevanih 0,75, pa bi zaključak trebao biti da je *tenelija* otporna na djelovanje mraza. Prema izvještaju, nakon 25 ciklusa smrzavanja utvrđeno je da se kamen pod prstima pjeskuljavo trusi, te da su ponegdje bridovi kamena zaoblili.

Ispitivanjima „*nove tenelije*“ dobiveni su kontradiktorni rezultati da je „postojana na mraz“, „da nije postojana na mraz“, te da je „slabo postojana na mraz“ (J. Hahamović). Ovakve ocjene se



u praksi trebaju uzeti s rezervom jer su dane za uzorke svježe izvađene iz stjenske mase („*nova tenelija*“). Iako su na svježe izvađenim uzorcima kamena iz stjenske mase dobiveni nepovoljni rezultati postojanosti *tenelije*, o svojstvima i trajnosti *tenelije* ipak najbolje svjedoči ugrađeni kamen u brojne građevine iz bliže i daljnje prošlosti.

Određivanjem postojanosti na mraz na RGGF (2006) nakon 25 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja utvrđene su pukotine koje bitno utječu na otpornost kamena, pa je zaključeno da *tenelija* nije postojana na mraz, pa se, kao građevinski kamen, može koristiti samo u Hercegovini gdje nema velikih kolebanja temperature i do granice smrzavanja.

U cilju određivanja mehaničkih karakteristika, izvršena su ispitivanja posmične čvrstoće na površinama uzoraka 100x100 mm (vršna i rezidualna). Prema ranijim ispitivanjima uzoraka *tenelije* dobivene su vršne ($\varphi=52^{\circ}$ i $c=3$ MPa) i rezidualne ($\varphi=32^{\circ}$; $c=0$) vrijednosti kuta trenja (φ) i kohezije (c). Na RGGF su dobiveni rezultati puno bliži stvarnom rezultatu, nego kut od $\varphi=70^{\circ}$, koji je dobiven ispitivanjima LGA. Vršne vrijednosti kuta trenja od $\varphi=52^{\circ}$ i $\varphi=70^{\circ}$ su nepostojeće vrijednosti kuta trenja, što ukazuje na to da su ili ispitivanja izvedena pogrešno ili je greška nastala u interpretaciji dobivenih podataka. Rezidualni kut trenja, koji je određen ovim opitima, značajan je za promatranje međudjelovanja blokova koji su ugrađeni u konstrukciju Starog mosta.

Tenelija spada u izrazito mekan kamen, odnosno slabu otpornost na habanje. Rezultat otpornosti na habanje prema Böhme-u iznosio je $48 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ (prema Hrvatoviću i Đuloviću $45,57 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$), 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.

I na koncu, u poglavlju 4.3. dani su rezultati najnovijih ispitivanja iz dva susjedna ležišta na lokalitetu „Mukoša“. Ne govori se izričito o *teneliji*, već o prirodnom kamenu, a dobiveni rezultati fizikalno-mehaničkih ispitivanja sugeriraju da se radi o rezultatima ispitivanja *miljevine*. Tako na pr. za treći uzorak u Tablici 3 dobiven je koeficijent razmekšavanja kvašenjem od 0,61, a koeficijent razmekšavanja smrzavanjem (za tlačne čvrstoće) od samo 0,58 (<0,75), dok je isti koeficijenti za savojnu čvrstoću bili 0,72 i 0,41. Usput, dobivena otpornost na habanje za sva 3 uzorak prikazana u tablici je bila oko $65 \text{ cm}^3/30 \text{ cm}^2$, što je puno više od navedene vrijednosti dobivene za *teneliju*.

Zbog velike varijabilnosti rezultata ispitivanja, kod uzimanja uzoraka iz ležišta, treba voditi računa o mjestu odakle se uzima pojedini uzorak, odnosno posebnu pozornost treba posvetiti odabiru kamena u odnosu na vizualno uočljive varijacije u građi, poroznosti ili boji.

7. LITERATURA

1. Hajdarević, I., Brkić, E., Šerifović, E. (2016): „*Mogućnosti upotrebe jezerskih krečnjaka neogene starosti sa područja Bosne i Hercegovine kao arhitektonsko-građevinskog kamena*“, Zbornik radova broj 3 Udruge „Zvuk kamena“, Posušje, XII. 2016.
2. Čičić, S. (1998): „*Karbonatne facije u geološkoj građi Bosne i Hercegovine*“, „Naš krš“, XVIII, 31, str. 2-37, 1998.
3. Nametak, A. (1939): „*Islamski kulturni spomenici turskog perioda u Bosni i Hercegovini*“, Sarajevo, 1939.
4. Zvonić, Z. (2000): „*Tenelija - kamen Mostara*“, Časopis „Most“, godina XXVI., broj 130 (41 - nova serija), Mostar, IX. 2000.
5. Šaravanja, K., Čolak, I. (2005): „*Kamen za obnovu Starog mosta u Mostaru*“, I. Sabor hrvatskih mostograditelja, Brijuni, Hrvatska, VI. 2005.



6. Čolak, I. (2007): „*Kratki prikaz revitalizacije lokaliteta Starog mosta*“, Časopis UKI-Udruge konzultanata inženjera Bosne i Hercegovine „TTI (Transport i transportna infrastruktura)“, God. 1, broj 1, Sarajevo, 2007.
7. Šaravanja, K. (2007): „*Kontrola kvalitete pri obnovi Starog mosta*“, Časopis UKI-Udruge konzultanata inženjera Bosne i Hercegovine „TTI (Transport i transportna infrastruktura)“, God. 1, broj 1, Sarajevo, 2007.
8. Šaravanja, K., Čolak, I. (2009): „*Mostovi Mostara - od rimskih mostova do Starog mosta*“, Zbornik radova 2. BiH Kongresa o cestama, UKI BiH (Udruga konzultanata inženjera Bosne i Hercegovine) i RRC (Regional Cooperation Council), Sarajevo, Sarajevo, IX. 2009.
9. Hrvatović, H., Đulović, I.: „*Kamen za obnovu Starog mosta u Mostaru*“, www.geologija.ba
10. Ivanković, T. (2004): „*Utjecaj vanjskih faktora na oolitički vapnenac 'tenelija'*“, Proceedings of European Conference on Raw Materials and Coal - New Perspectives, Sarajevo, V. 2004.
11. LGA-Projekt; „*Mostar: Eine Brücke für die Ewigkeit?*“
12. (2001): „*Pilot Cultural Heritage Project: Reconstruction of the Old Bridge over the Neretva in Mostar, Laboratory testing of ancient and new building materials; Sampling and testing of Stones (Ancient and new Stones) - Stone Testing Attachment 5 'Tenelija stones - Microscopic Studieis'*“, LGA - Geotechnical Institute - Historical Bridges Group, Nürnberg, 26.01.2001.
13. Marić, L. (1972): „*O kamenu od koga je sadjelan Stari most u Mostaru*“, „Prosvjeta“, Zagreb, 1972.
14. Mandžić, K. (2006): „*Inžinjerskogeološka i geotehnička svojstva kamena Tenelija*“, magistarski rad, Rudarsko-geološko-građevinski fakultet u Tuzli, IV. 2006.
15. (2001): „*Pilot Cultural Heritage Project: Reconstruction of the Old Bridge over the Neretva in Mostar, Laboratory testing of ancient and new building materials; Sampling and testing of Stones (Ancient and new Stones)*“, LGA - Geotechnical Institute - Historical Bridges Group, Nürnberg, 26.01.2001.
16. (1998): „*Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji i proračunu zaliha arhitektonsko-građevnog kamena oolitičnog vapnenca (tenelije i miljevine) na istražnom prostoru „Mukoša“ u Mostarskom polju*“, „DENT“ Istraživanje, eksploatacija i obrada kamena, Mostar, XII. 1998.
17. Bilopavlović, V., Pekić, S., Šaravanja, K. (2002): „*Ispitivanje petrografskih i fizičko-mehaničkih svojstava kamena tenelije i miljevine*“, Rudarsko-geološki glasnik, br. 5-6, str. 109-115, Mostar, 2002.
18. Pekić, S. (2002): „*Prilog izučavanju svojstava kamena tenelije i kamena miljevine korištenih u izgradnji i obnovi građevina u Mostaru*“, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, 2002.
19. Šaravanja, K., Čolak, I. (2005): „*Kamen za obnovu Starog mosta u Mostaru*“, I. Sabor hrvatskih mostograditelja, Brijuni, Hrvatska, VI. 2005.
20. (2004): „*Mostarart A, Bridge Story*“, World Bank, UNESCO, PCU - Project Coordination Unit City of Mostar, VII. 2004.
21. Šaravanja, K., Galić, A. (2001): „*Resursi i svojstva građevnog kamena Hercegovine za obnovu graditeljske baštine*“, Seminar on Restoration Principles in Počitelj, The Swedish Foundation for Cultural Heritage without Borders, Počitelj-Čapljina, IX. 2001.
22. Šaravanja, K., Bilopavlović, V. (2002): „*Prikaz rezultata ispitivanja kamena s područja Hercegovine*“, „Rudarsko-geološki glasnik“, broj 5-6, str. 163-168, XI. „Hrvatsko rudarsko-geološko društvo“, Mostar, XI. 2002.
23. Šaravanja, K., Marijanović, P. (2004): „*Architectural and techical stones in Herzegovina region (plenary paper)*“, Proceedings of European Conference on Raw Materials and Coal - New Perspectives, Sarajevo, str. 189-202, V. 2004.
24. Bilopavlović, V., Pekić, S., Šaravanja, K. (2004): „*Characteristics of 'Tenelija' and 'Miljevina' stones*“, European Conference on Raw Materials and Coal - New Perspectives, Sarajevo, V. 2004.



25. Šaravanja, K., Šaravanja, V., Marić, T, Radić Kustura, J. (2012): "*Prikaz rezultata ispitivanja arhitektonsko-građevnog i tehničko-građevnog kamena*", Zbornik broj 2 Udruga "Zvuk kamena", Posušje, XII. 2012.
26. Langof, Z. (2002): "*Ispitivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika za zidane konstrukcije, Standardne i nestandardne metode ispitivanja*", Mostar, I. 2002.