



## ISPITIVANJE FIZIČKIH I MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA ZA ZIDANE KONSTRUKCIJE

prof dr sc **Zlatko Langof**, dipl.ing.građ.

**Sažetak:** U svim slučajevima nove izgradnje ili rekonstrukcije zidanih konstrukcija, potrebno je raspolagati sa podacima o fizičkim i mehaničkim svojstvima materijala. Materijali koji se koriste kod zidanih konstrukcija su kamen, malteri, razne ispune, opeke, a često i kombinacija ovih materijala. Za manje građevine ove podatke možemo usvojiti na bazi komparativnih iskustava, međutim, za veće moramo izvršiti određena ispitivanja. Vrsta i obim ispitivanja također zavise od karaktera objekta, te tako za jednostavnije slučajeve koristimo standardne metode ispitivanja, a za složene objekte, koristimo i neka nestandardna, odnosno, usmjerena ispitivanja. U ovom radu daje se pregled osnovnih vrsta standardnih ispitivanja, i nekih nestandardnih, koja su provedena za Stari most u Mostaru i Gradsku vijećnicu u Sarajevu.

**Ključne riječi:** standardne i nestandardne metode, zidane konstrukcije

## TESTING OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS FOR MASONRY STRUCTURES

**Abstract:** In all cases of new construction or reconstruction of masonry structures, it is necessary to have the data on physical and mechanical properties of materials. The materials used in masonry structures are stone, mortars, various fills, bricks, and often combinations of these materials too. For smaller buildings we can adopt this data based on comparative experiences, but for larger ones we must conduct some tests. The type and scope of the tests depend also on the character of the structure, and thus for simpler cases we use standard test methods, and for complex structures we use also some non-standard or the so-called focused tests. This paper provides an overview of basic types of standard tests, and some non-standard ones, which were conducted for the Old Bridge in Mostar, and the City Hall in Sarajevo.

**Key words:** standard and non-standard test methods, masonry structures



## 1. STANDARDNE METODE ISPITIVANJA

### 1.1. Osnovni cilj ispitivanja

Ispitivanja se izvode za dva osnovna cilja:

- da se utvrdi da li su materijali pogodni za gradnju
- da li ispunjavaju zahtijevane projektne kriterije

Kod definiranja osnovnih ciljeva, ističu se posebno slijedeći osnovni zahtjevi:

- visoke čvrstoće kod jače opterećenih konstrukcija
- otpornost na mraz za vanjske konstrukcije
- otpornost na habanje kod podnih površina

### 1.2. Izbor reprezentativnih uzoraka za ispitivanje

Od posebnog je značaja, da se izvrši pravilan izbor uzoraka za laboratorijska ispitivanja. Kod ovih radnji, mora se detaljno poznavati strukturna grada u kamenolomu, zatim, način obrade konačnih blokova za ugradnju, heterogenost materijala, i vrijeme relaksacije blokova.

Kod izbora uzoraka, moraju se uzeti i najlošiji i najbolji, a ne samo prosječni uzorci. To je bitno, jer i mala količina loših blokova može da dovede konstrukciju u nestabilno stanje. Posebna problematika izbora se postavlja kod stijenske mase koja sadrži veći broj pukotinskih sistema, od kojih se neki često ne mogu odmah ni uočiti.

Pored ovih poteškoća, postoji i problem razmjere, jer blokovi koji se ugrađuju imaju znatno veće dimenzije od uzorka za ispitivanje. Blokovi su nekad i metarskih veličina, a uzorci za ispitivanje imaju dimenzije svega 5x5x5 cm kod standardnih metoda. Ovo znači, da se u nekim uzorcima mogu naći i pukotine i mikro prsline, a drugi da budu potpuno homogeni. Rezultat ovoga su i veoma različite vrijednosti koje se dobiju kod ispitivanja.

Česta je praksa, da se ekstremno niske i ekstremno visoke vrijednosti ne uzimaju u obzir, i da se traže prosječne vrijednosti, što je u potpunosti loša procjena.

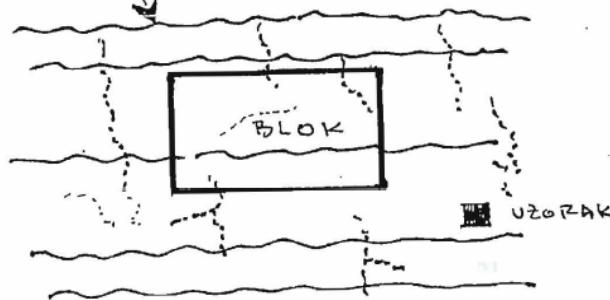
Potrebno je ukazati i na još jednu lošu praksu, da se uzorci ne vežu precizno za prostorne koordinate, te da se ne preciziraju smjerovi opterećenja uzoraka. Iz ovih razloga, ne može se definirati ni anizotropija mehaničkih karakteristika, koja je često zastupljena, a naročito kod sedimentnih stijena. Očigledno je i logično, da su čvrstoće znatno veće ako je smjer opterećenja normalan na slojevitost ili pukotinske sisteme ili ako je paralelan.

Važno je znači, uzorke precizirati po položaju, te odrediti smjer opterećenja. Ukoliko se radi na primjer o jasno uslojenoj stijeni, onda je potrebno izvršiti ispitivanja normalno i paralelno sa slojevitošću. U tom slučaju, referentne ravni za prostornu orijentaciju mogu biti pravci pružanja slojevitosti.



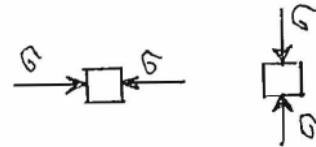
«A»

slojevitost



«B»

uzorci



Slika 1. Utjecaj razmjere i izbor uzoraka

«A» odnos bloka i uzorka,  
«B» orijentacija i opterećenje uzorka

### 1.3. Osnovne fizičko mehaničke karakteristike i klasifikacije

#### ČVRSTOĆA NA PRITISAK

Osnovni podatak koji karakterizira kvalitetu građevinskog kamena je čvrstoća na pritisak, te se ona redovito i određuje. Ovo proizlazi iz činjenice, da kamen koji ima visoke čvrstoće na pritisak, ima najčešće i ostale osobine visoke.

Važno je i istaći, da je ispitivanje čvrstoća na pritisak jedna od najjednostavnijih metoda, te je stoga njena primjena u praksi veoma česta.

Na osnovu dobivenih vrijednosti čvrstoća, a također i ostalih vrijednosti, moguća je i klasifikacija kamena, po raznim parametrima, kako je to vidljivo iz danog prikaza u nastavku.

Orijentacione, prosječne, čvrstoće na pritisak za neke vrste kamena date su u slijedećoj tablici:



## STIJENE

## ČVRSTOČA NA PRITISAK ( Mpa )

**MAGMATSKE**

graniti.....	180
sijeniti.....	200
dioriti.....	200
bazalti.....	150

**METAMORFNE**

gnajsevi.....	160
kvarciti.....	400
mermeri.....	100
kristalasti {krijlji.....	150

**SEDIMENTNE**

kvarcni pješčari.....	200
krečnjaci.....	100
krečnjački pješčari.....	50
pješčari.....	100
laporci.....	10

Na osnovu osobina kamena date su i određene kategorizacije arhitektonskog kamena, od kojih se jedna daje u nastavku:

**Kategorizacija na osnovu čvrstoće na pritisak**

## Čvrstoća na pritisak ( Mpa )

## Kategorija čvrstoće

veća od 280.....	vrlo visoka
280 – 180.....	visoka
180 - 80.....	srednje visoka
80 - 40.....	niska
manja od 40.....	vrlo niska

( Stari most u Mostaru..... čvrstoće između 15 i 29, prosjek 22 Mpa )



### Kategorizacija na osnovu otpornosti na habanje po Bohmeu

Otpornost na habanje ( cm <sup>3</sup> / 50 cm <sup>2</sup> )	Kategorija
Manje od 5 .....	izrazito tvrd
5-10.....	vrlo tvrd
10-20.....	tvrd
20-30.....	umjereno tvrd
30-40.....	mekao
veće od 40.....	izrazito mekan

### Kategorizacija prema zapreminskoj težini

Zpreminska težina KN/m <sup>3</sup>	Kategorija
Manja od 10.....	izrazito lagan
10-15.....	lagan
15-25.....	srednje težak
25-30.....	težak
veća od 30.....	izrazito težak

( Stari most u Mostaru ..... 19 KN/m<sup>3</sup> )

### Kategorizacija prema porozitetu

Porozitet ( % )	Kategorija
manje od 1,0.....	kompaktan
1,0 – 2,5.....	slabo porozan
2,5 – 5,0.....	umjereno porozan
5,0 –10,0.....	porozan
10,0 –20,0.....	jako porozan
veća od 20,0.....	ekstremno porozan

( Stari most u Mostaru..... 20 % )



### Kategorizacija prema upijanju vode

Upijanje vode ( % )	Kategorija
Manje od 0,5.....	vrlo malo
0,5 –1,0.....	malo
1,0 –2,5.....	umjereno
2,5 –5,0.....	osjetno
5,0 –15,0.....	veliko
veće od 30,0.....	iznimo veliko

## POSTOJANOST NA MRAZU

Postojanost na mraz određuje se eksperimentalno različitim metodama, i na različitim veličinama uzoraka. Metode nisu uvijek siguran pokazatelj otpornosti. Osnovna greška može da bude u izboru reprezentativnih uzoraka, i veličine uzoraka.

Ako su uzorci malih dimenzija, tada se može desiti, da oni u sebi ne sadrže slabo vidljive mikro prsline, te se dobiju povoljni rezultati. Stoga je čest slučaj u praksi, da i pored činjenice da su rezultati ispitivanja pozitivni, da veći blokovi nisu otporni, odnosno, dolazi do raspadanja kamena uslijed djelovanja mraza.

Stoga se preporučuje, da se koriste i komparativna iskustva, i da se sagleda ponašanje i stanje već ugrađenog kamena u objekte. Pored toga, korisno je da se ispitivanja izvrše na većim blokovima, a ne samo na malim kockama, jer veći blokovi sadrže sigurno i mikro pukotine, što ne mora biti slučaj sa malim kockama. Nedovoljno otporan kamen, može kroz relativno kratko vrijeme biti razoren od mraza, te se iz tih razloga, ovoj osobini treba posvetiti posebna pažnja.

Na kraju treba još i napomenuti, da i kvalitetan kamen, može se znatno oštetiti, ukoliko se na adekvatan način ne ugradi u objekt. Takvih je slučajeva veoma mnogo bilo u praksi, te i ovom problemu mora da se posveti izuzetna pažnja. (Ova problematika je razmatrana od strane istog autora u drugom prilogu)

## 2. NESTANDARDNE METODE ISPITIVANJA

### 2.1. Uvod

Kod složenijih objekata, često nisu dovoljna osnovna tzv. standardna ispitivanja, nego je potrebno provesti i tzv. usmjerena ispitivanja, odnosno, nestandardna.

To su ustvari ispitivanja, koja se usmjeravaju prema određenom projektnom cilju, odnosno, prema određenim problemima.



Tako na primjer, kod Starog mosta u Mostaru, za izradu projekta injektiranja svoda od ključnog je značaja bilo poznavati vodopropusnost kamenih blokova te mogućnost i efekte injektiranja. Zbog velikog i znatno opterećenog luka, tu je potrebno odrediti i deformacione karakteristike kompleksa, kamen -malter -kamen.

U slučajevima izrazite heterogenosti kamena, važno je da se odredi i stupanj anizotropije u pogledu čvrstoća.

Slična problematika se javlja i kod zidanih konstrukcija od opeke, te je stoga, u ovom radu dat primjer provedenih metoda ispitivanja za Gradsku vijećnicu u Sarajevu. Metode koje su tu korištene mogu se u potpunosti primijeniti i kod kamenih konstrukcija.

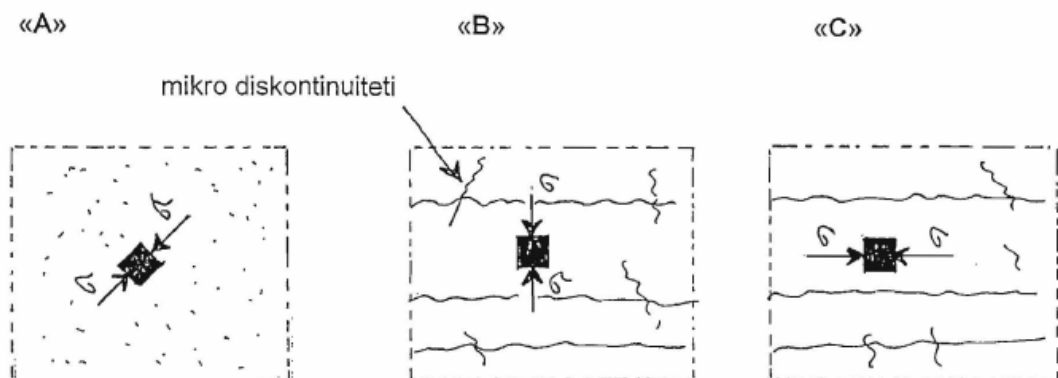
## 2.2. Anizotropija u pogledu monoaksijalne čvrstoće na pritisak osnovne stijene

Monoaksijalna čvrstoća na pritisak predstavlja osnovni pokazatelj mehaničkih karakteristika osnovne stijene, odnosno, monolita. Pod monolitom se smatra dio stijenske mase, odnosno, mali dio koji u sebi ne sadrži vidljive pukotine i prsline.

Standardnim postupkom vrše se ispitivanja na serijama kocki dimenzija 5x5x5 cm o pravcima opterećenja i orijentacijama ovakvih kocki u odnosu na ležište u kamenolomu, i pravcima glavnih diskontinuiteta i međuslojnica, obično se ne vodi računa, osim, kada je škrljavost i slojevitost jasno izražena.

Poseban problem nastaje u slučajevima ispitivanja čvrstoća kamena, kada nisu jasno izraženi diskontinuiteti, a za pravce opterećenja ne primjenjuje se nikakav kriterij.

Da bi se istakla važnost pravca i orijentacije opterećenja, treba podsjetiti na činjenicu, da je osnovna stijena, (kamena kocka), koja je i pored toga što je litološki homogena, skoro redovito ispresijecana obično teško uočljivim mikro diskontinuitetima, različitih orijentacija, koji mogu biti otvoreni ili zatvoreni.



Slika 2. Mogući pravci opterećenja u odnosu na orijentaciju mikro diskontinuiteta



«A» homogena struktura, neovisna od orijentacije opterećenja

«B» opterećenje normalno na diskontinuitete

«C» opterećenje paralelno sa diskontinuitetima (znatno niže vrijednosti čvrstoća nego u slučaju «B» za istu vrstu materijala)

U zavisnosti od pravca opterećenja u odnosu na orijentaciju i učestalost mikro diskontinuiteta, mogu da se jave veoma velike razlike u vrijednostima čvrstoća na pritisak. Naročito velike razlike mogu se dobiti kod jače izraženih diskontinuiteta, kada se javlja i problem pravilne interpretacije rezultata ispitivanja. Obično se tada vrijednosti koje više odstupaju od prosjeka smatraju «slučajnim» i ne uzimaju se u obzir, i ako su one realne, a posljedica su postojanja određenih diskontinuiteta sa različitim vrijednostima čvrstoća. To znači, da se kod osnovne stijene može javiti anizotropija u pogledu čvrstoća, kao posljedica genetskih uvjeta, iiii različite prostorne orijentacije mikro diskontinuiteta.

Iz ovakvog pogleda na ovaj problem, proizišao je poseban postupak ispitivanja, od strane autora, na takozvanim «orijentiranim» uzorcima.

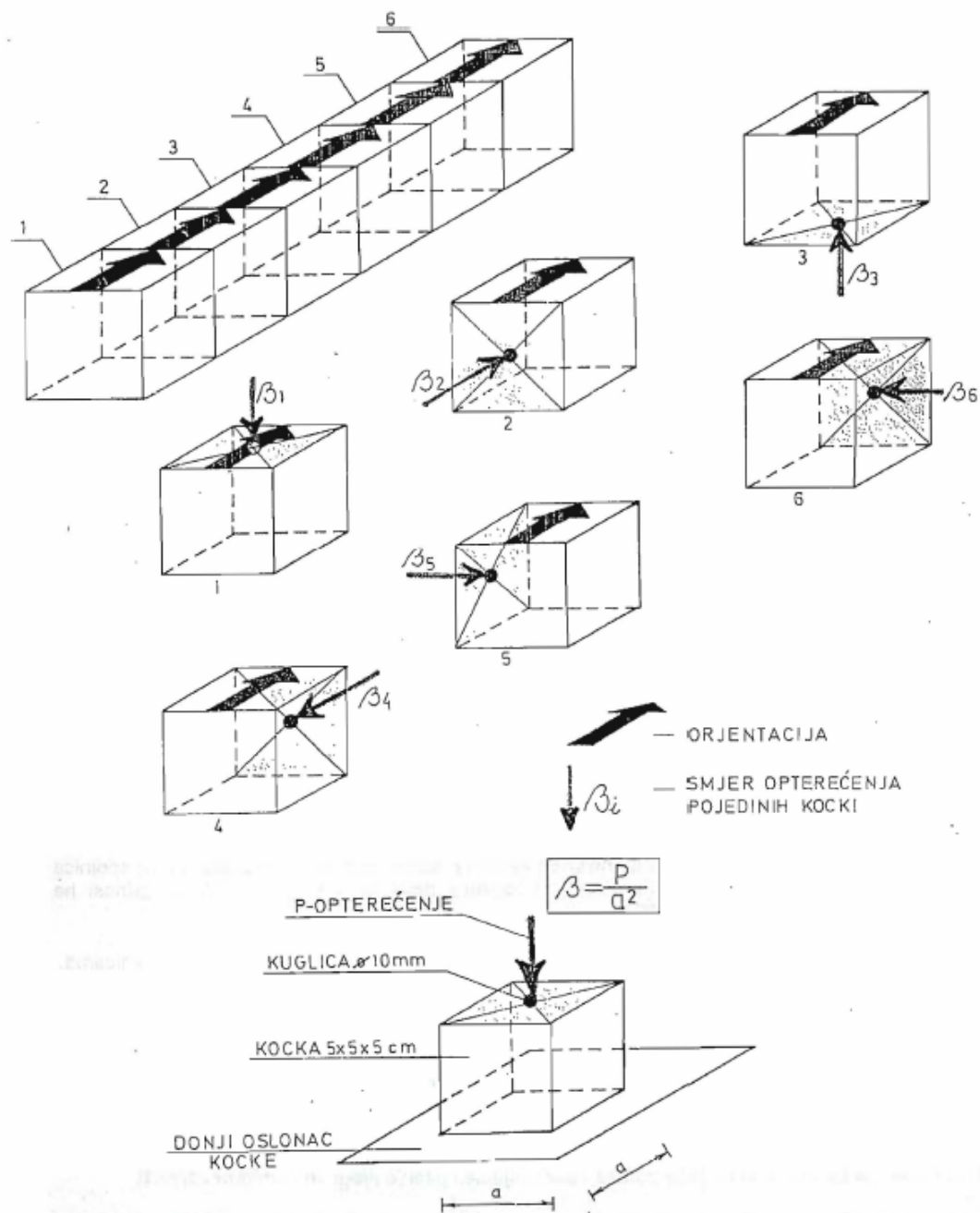
Orijentirani uzorak ima početni oblik u vidu prizme, iz koje se isječe šest kocki, sa tačno označenom repnom orijentacijom na svakoj kocki. Svaka kocka opterećuje se u drugom smjeru, čime se dobije šest vrijednosti čvrstoća, odnosno, po dvije vrijednosti u tri osnovna međusobno okomita pravca. Dobiju se po dvije vrijednosti u svakoj osovinu (x,y,z,) što omogućava kontrolu rezultata ispitivanja (slika 3.)

Opterećenje se može nanositi preko «pune» površine, što je uobičajeni način opterećenja, a može se nanositi preko «kuglice» odnosno, koncentrirano.

Drugi način daje veoma slikovitu prirodu sloma, odnosno, pukotine idu jasno po najslabijim površinama. Ukoliko je stupanj anizotropije jasnije izražen, tada su pravilniji lomovi, a ako je uzorak homogen, tada nema jasnih i pravilnih lomova.

Ova ispitivanja omogućuju da se dobije stupanj anizotropije, pri čemu se jedna osovina uzme kao referentna, (y-y) te se u odnosu na nju izraze razlike u vrijednostima čvrstoća.





Slika 3. « Orjentirani » uzorak, način obilježavanja, smjerovi opterećenja, i proračun stupnja anizotropije



### 2.3. Deformacijske karakteristike kamena

U cilju što kompleksnijeg uvida u mehaničke karakteristike kamena, odnosno, tzv. «osnovne stijene», potrebno je ispitati i deformacijske karakteristike na uzorcima bez diskontinuiteta ili sa diskontinuitetima.

Ove vrijednosti su od ključnog značaja kod kamenih mostova, jer se na osnovu tih vrijednosti računaju nadvišenja skela. Ova ispitivanja su od posebnog značaja ako su vrijednosti modula deformacija niske, kao što je to slučaj kod Starog mosta u Mostaru.

Ispitivanja se vrše u ciklusima, a vrijednost modula je odnos napona i pripadajuće deformacije (slika 4). Radi usporedbe, kakve mogu biti razlike u modulima deformacija, kod pojedinih vrsta kamena, navodi se primjer Starog mosta u Mostaru, gdje za kamen Temelija ova vrijednost iznosi u prosjeku oko 15 000 MPa, a za monolitne krečnjake, ove vrijednosti su oko 100 000 MPa.

### 2.4. Laboratorijska ispitivanja otpornosti na smicanje

Ova ispitivanja vrše se na uzorcima monolitnog kamena, zatim, duž diskontinuiteta, i duž spojnica sa malterom. Osnovne dispozicije uređaja i uzoraka dane su u prilogu, koji se odnosi na ispitivanjima za projekt «VIJEĆNICA».

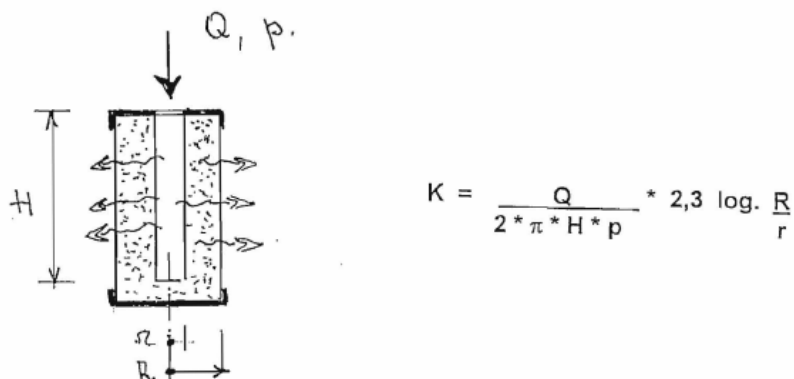
Vrijednosti otpornosti na smicanje su od posebnog značaja kada se radi o malterima u spojnicama.

### 2.5. Ispitivanje vodopropusnosti kamena

U slučajevima kada je kamen jače porozan postavlja se i pitanje njegove vodopropusnosti.

Ispitivanje vodopropusnosti se može izvesti na više načina, a jedan koji je razrađen od autora i realiziran za Stari most, prikazan je na slici br. 4.

Metoda se sastoji u ubrizgavanju vode pod pritiskom, kroz centralnu bušotinu, pri čemu su baze izolirane, tako da je isticanje moguće samo po omotaču.



Slika 4. Izgled uzorka za ispitivanje vodopropusnosti kamena

## 2.6. Ispitivanja na fizičkim i numeričkim modelima

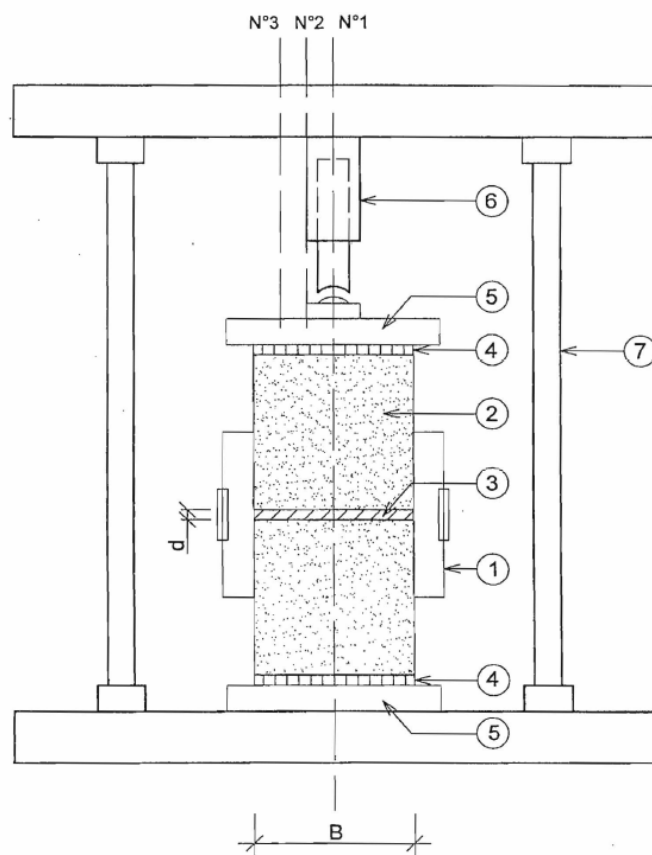
Kod zidanih konstrukcija često se postavljaju i pitanja, na koja nema jednoznačnih odgovora, i to zbog složenosti zajedničkih djelovanja pojedinih materijala.

Najsloženiji su slijedeći problemi:

- kriterij za određivanje zahtijevanih čvrstoća maltera
- utjecaj ekscentričnog djelovanja opterećenja s obzirom na teškoće njihovog rješavanja, optimalno je da se ovi problemi rješavaju na modelima u cilju dobivanja parametara za projekt Starog mosta u Mostaru, predviđena su ispitivanja na tri fizička i jednaka tri numerička modela.

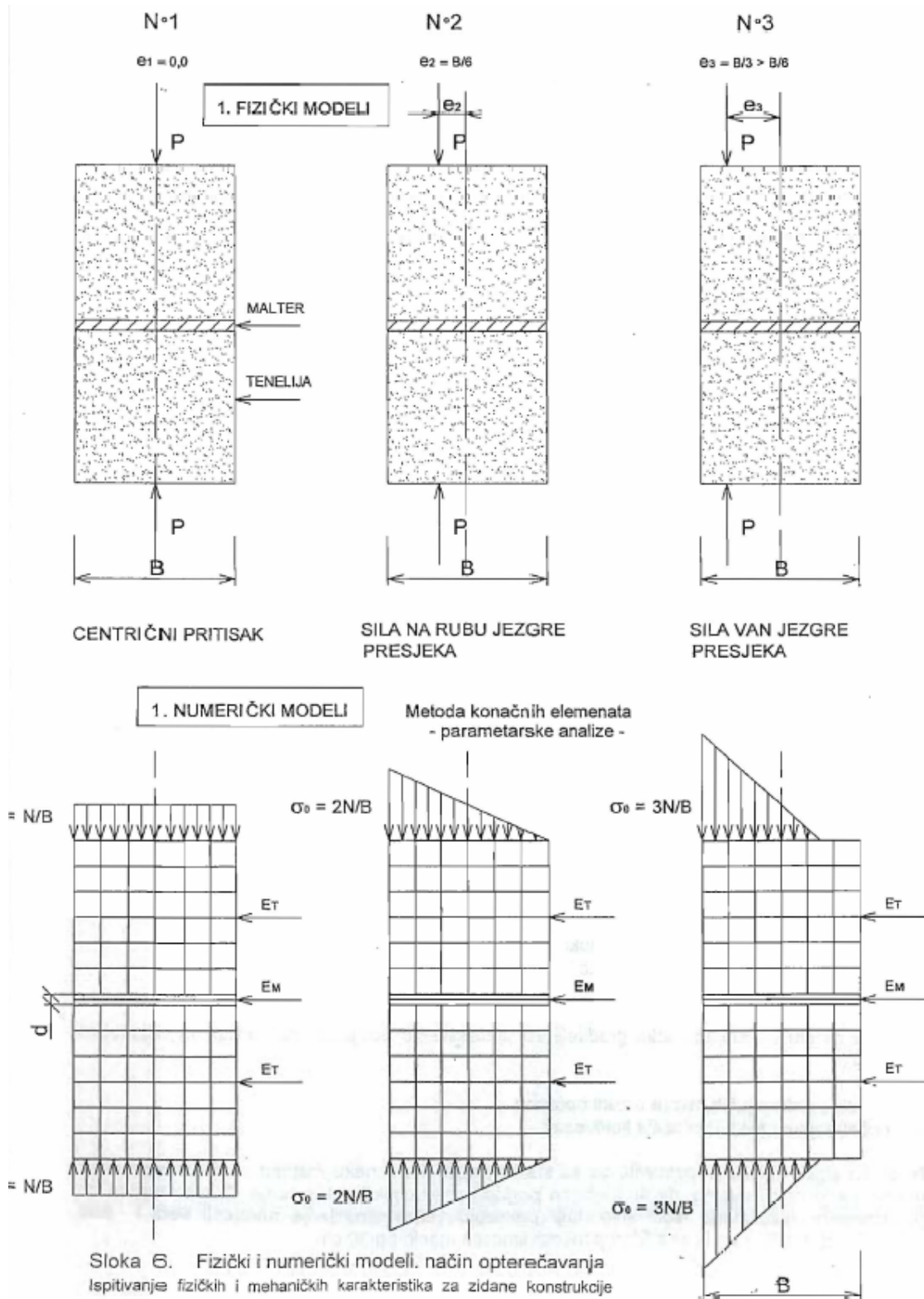
Fizički modeli se sastoje od po dva bloka kamena Tenelije, sa originalnim malterom između blokova. Dimenzije blokova su 40x40x40 cm. Svaki od tri bloka biti će opterećen na različite načine, a sile će se povećavati do sloma modela. Kod prvog modela sila je u centru, kod drugog na ivici « jezgra » a kod trećeg izvan ivice « jezgra ».

Odnosno, to je stanje sa pojavom napona zatezanja. Numerički modeli su istih dispozicija i opterećenja, i cilj je da se dobije naponska slika, te da se izvrše međusobna usporedba fizičkih i numeričkih modela. Očekuje se, da se na ovaj način utvrdi kinematika sloma, čvrstoće maltera u pravom ležištu, te utjecaj ekscentričnog djelovanja opterećenja.



1. Mjerni instrumenti
2. Blokovi tenelije  $B \geq 30$  cm
3. Malter -prema propisu
4. Tvrd guma perforirana debljine 15 -20 mm
5. Premosnik opterećenja -čelični
6. Hidraulična presa  $\geq 2500$  kN
7. Čelični okvir nosivosti  $> 2500$  kN

Slika 5. Dispozicija fizičkog modela



Slika 6. Fizički i numerički modeli, način opterećavanja



### 2.6.1. Rezultati ispitivanja na fizičkim modelima

Prema predviđenom programu koji je opisan u točki 2.6. izvršena su modelska ispitivanja u institutu LGA u Nurnbergu. Modeli su se sastojali od po dva bloka dimenzija 30x30x30 cm, spojena malterom, pri čemu je prvi bio centrično opterećen, drugi sa ekscentricitetom od  $e = B/6$  (5 cm), a treći sa  $e = B/3$  (10 cm).

Prema očekivanju, dobiveni su i različiti rezultati nosivosti, pri čemu su kod prva dva maksimalni naponi kod sloma bili približno veličinama čvrstoća kamena Tenelije, koja u prosjeku iznosi 20 MPa, a kod trećeg, dobivena je sila sloma veća od čvrstoća, vjerojatno zbog teže izvedbe modela s većim ekscentricitetom. (40,0) \*

Model	ekscentritet cm	sila sloma KN	naponi kod sloma Mpa
1.	$e = 0$	2250	25,5
2.	$e = B/6$ ( 5 cm )	1000	22,2
3.	$e = B/3$ ( 10 cm )	900	( 40, 0 * )

Iz ovog pregleda, može se zaključiti sljedeće :

- nosivost, odnosno, sila sloma se znatno smanjuje, ukoliko se kameni blokovi ekscentrično opterećuju, što je i logično, i u skladu je s osnovnim postulatima nosivosti.
- preneseno na kamene mostove, koji imaju odgovarajući oblik, to znači, ukoliko rezultirajući poligon nije stalno u centru luka, tada se nosivost smanjuje, odnosno, može doći do pojave lomova.

Ovo ujedno ukazuje, na izuzetnu važnost poštivanja ovog uvjeta, na Starom mostu u Mostaru, posto kamen Tenelija ima relativno male čvrstoće na pritisak, koje u prosjeku iznose oko 20,0 MPa.

Ovaj ključni uvjet stabilnosti može se kod kamenih lukova postići na tri osnovna načina :

- prilagođavanjem oblika luka, poligonu sila, što ne daje velike mogućnosti
- podešavanjem opterećenja iznad luka, daje veće mogućnosti
- kombiniranjem ove dvije mogućnosti

Kod Starog mosta u Mostaru, stari graditelji su podešavanje poligona sila postigli sa sljedećim elementima :

- izrada olakšavajućih otvora u zoni oporaca
- podešavanjem oblika i položaja kolovoza

Može se sa sigurnošću pretpostaviti, da su stari graditelji imali neku metodu za rješavanje ovog problema, jer je nevjerovatno, da su slučajno pogodili pravi oblik i opterećenje. Ovo se bazira na ovdje izloženim rezultatima ispitivanja, koji pokazuju veliko smanjenje nosivosti već i kod ekscentriciteta od  $e=B/3$ , koje bi kod Starog mosta iznosila manje od 30 cm.

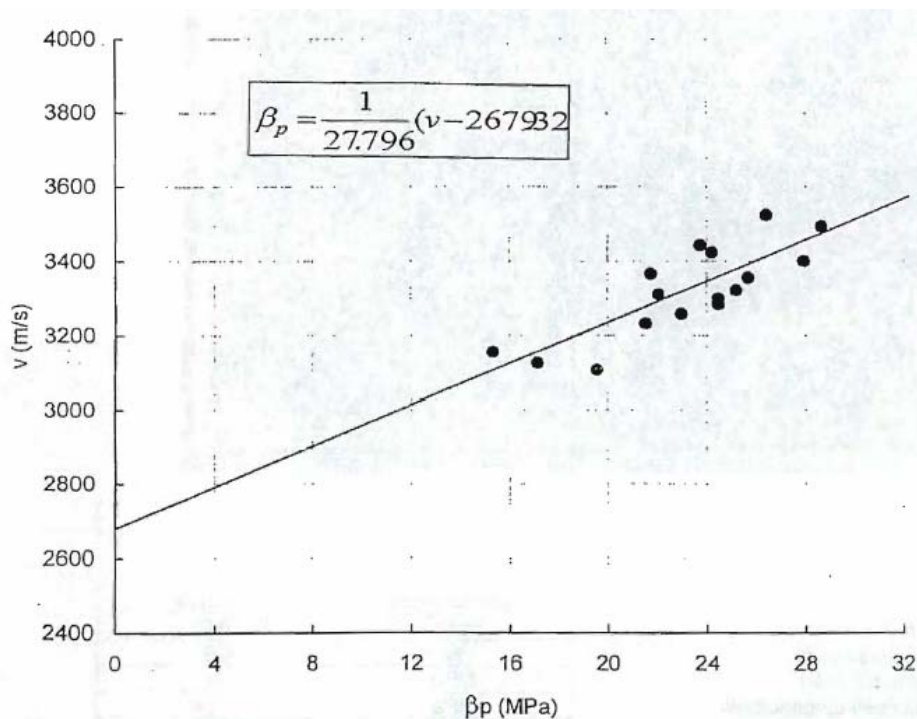
## 2.7. Ispitivanja ultrazvukom -korelacione zavisnosti

Ultrazvuk kao metoda ispitivanja koristi se pretežno za dijagnosticiranje oštećenja i tu ima puno opravdanje. Metoda se zasniva na mjerenju brzina prolaska ultrazvuka, te veličine brzina su u direktnoj vezi sa strukturnim i mehaničkim karakteristikama kamena.

Problem koji se može uspješno rješavati pomoću ultrazvuka, odnosi se na kontrolna ispitivanja na kamenim blokovima koje su predviđeni za ugradnju.

Da bi se ovaj problem riješio, procedura je sljedeća:

- vrši se ispitivanje čvrstoća na pritisak u laboratoriji, a prije sloma uzorka, izvrše se i mjerenja ultrazvukom
- na osnovu ovih ispitivanja, ustanovi se korelaciona zavisnost čvrstoća na pritisak -brzina
- na osnovu zahtijevane čvrstoće iz projekta, odredi se zahtijevana brzina (V -m/sec)
- na svakom pripremljenom bloku za ugradnju izvrši se mjerenje brzina, te se prihvate samo oni kameni blokovi koji imaju brzine veće od zahtijevanih. Ovakva metodologija sprovedi se za verifikaciju blokova za gradnju Starog mosta u Mostaru (slika 7).



Slika 7. Korelaciona zavisnost između čvrstoća na pritisak ( MPa) i brzina prolaska talasa ultra zvuka (m/sec), za kamen Tenelija, za Stari most u Mostaru ( zahtijevane čvrstoće 20 MPa minimalno potrebno brzina 3220 m/sec)



## PRILOG: KARAKTERISTIČNI PODACI ZA KAMEN

Objekat	Vijećnica
Mjesto uzimanja uzorka	Centralni stubovi na spratu
Lab. broj uzorka	41490
Komercijalni naziv	Rosa Beta
Petrografska definicija	Svijetli biotitski granit
Komercijalna klasa	Kamen

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE		
	jedinica mjere	vrijednost
masa jedinične zapremine	kg/m <sup>3</sup>	2542
koeficijent upijanja vode	‰	4,9
monoaksijalna čvrstoća	MPa	75
modul elastičnosti-tangencijalni	MPa	3714
modul elastičnosti-sekantni	MPa	2632
čvrstoća na zatezanje preko savijanja	MPa	3,1

Slika 8. Sadržaj «kartice» za karakteristične podatke, primjer gradske «Vijećnice» Sarajevo