

## RE-forMS

rammed earth for modelling and standardization  
in seismically active areas



**HRZZ**

Hrvatska zaklada  
za znanost

Eksperimentalno ispitivanje zidova i uzoraka od nabijene zemlje	
Naziv projekta:	Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima
Akronim:	RE-forMS
Šifra projekta:	UIP-2020-02-7363
Ustanova s kojom je sklopljen ugovor o financiranju:	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Partnerske ustanove:	Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
Voditelj:	izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus
Izveštajno razdoblje:	3. razdoblje
Oznaka izvještaja:	D4
Sadržaj:	Opis provedenog ispitivanja zidova od nabijene zemlje na djelovanje u ravnini i van ravnine. Svojstva materijala ispitana na probnim tijelima.
Autori izvještaja:	Ana Perić Fekete, izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, doc. dr. sc. Marin Grubišić, dr. sc. Jelena Kaluđer
Datum:	19. 12. 2023.

Ovaj je materijal sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363. Sadržaj ili preporuke navedene u ovom materijalu odnose se na autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost.



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
**Fakultet agrobiotehničkih  
znanosti Osijek**



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
**Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**  
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek  
**Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek**



Sveučilište  
u Rijeci  
**Građevinski  
fakultet**

## Sažetak:

Izrađena su četiri zida od nabijene zemlje tradicijskim tehnikama, pomoću kojih je ispitana otpornost na djelovanje potresnih sila u ravnini zida. Dva su zida (W5 i W6) izrađena primjenom samo mješavine tla, dok su preostala dva zida (W7 i W8) izrađena primjenom mješavine tla uz dodatak vlakana industrijske konoplje između slojeva. Nadalje, zid W5 izrađen je primjenom sačuvanog materijala od kojega su ispitani zidovi W1 i W2, u prethodnom izvještajnom razdoblju, kako bi se provjerilo kako ponovna uporaba istog materijala utječe na odgovor konstrukcije. Sve zemljane mješavine rabljene za izradu zidova W5-W8 svojim sastavom odgovaraju mješavinama od kojih su izgrađene tradicijske kuće od nabijene zemlje s područja Istočne Hrvatske. Uočeno je da dodavanje industrijske konoplje utječe na odgovor ispitano g zida te da „recikliranjem“ zemljanog materijala možemo postići veću nosivost zida od nabijene zemlje.

Uz zidove su izrađeni i uzorci za ispitivanje materijalnih i fizikalnih svojstava. Uočeno je da veličina uzorka utječe na vrijednost tlačne čvrstoće, pri čemu manji uzorci (prizme) pokazuju znatno veću tlačnu čvrstoću u odnosu na uzorke kocaka i valjaka. Osim toga, uočen je pad tlačne čvrstoće ukoliko su u uzorke kocaka i valjaka bila ugrađena vlakna konoplje.

Ispitana su i svojstva na uzorcima koji su izrađeni u prethodnom razdoblju projekta te su čuvani u laboratorijskim uvjetima godinu dana. Na taj se način provjerio utjecaj starenja na uzorke, odnosno razvoj čvrstoće nakon razdoblja od godinu dana. Utjecaj starenja zabilježen je na vrijednost tlačne čvrstoće na gotovo svim uzorcima, osim onima s dodatkom vapna na koje starenje nije imalo nikakvog utjecaja te su rezultati istovjetni onima određenima nakon sušenja tijekom 28 dana.

**Ključne riječi:** zidovi od nabijene zemlje, ponašanje u ravnini zida, potresno ponašanje, mehanička svojstva, fizikalna svojstva

*Ovaj materijal sufinancirala je Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363. Sadržaj ili preporuke navedene u ovom materijalu odnose se na autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost.*

*Imajte na umu da je izvođenje testova zahtijevalo znatan napor istraživačkog tima RE-forMS, djelatnika Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek i partnerskih institucija. Ako ostvarite vrijedne rezultate iz ovih podataka, molimo navedite referencu na relevantne publikacije.*

*Popis svih publikacija proizašlih iz okvira aktivnosti provedenih na projektu RE-forMS moguće je vidjeti na sljedećoj internetskoj stranici:*

<https://www.croris.hr/projekti/projekt/5837>

*U slučaju bilo kakvih nedoumica i/ili ako u izvještaju nedostaju određene informacije koje bi vam mogle biti od koristi prilikom primjene dostupnih podataka proizašlih iz projekta RE-forMS, molimo kontaktirati voditelja projekta RE-forMS: dr. sc. Ivan Kraus, [ikraus@gfos.hr](mailto:ikraus@gfos.hr).*

**Abstract:**

Four walls were made of rammed earth using traditional techniques, which were used to test the resistance to earthquake forces in the plane of the wall. Two walls (W5 and W6) were made using only the soil mixture, while the remaining two walls (W7 and W8) were made using the soil mixture with the addition of hemp fibres between the layers. Furthermore, wall W5 was made using the preserved material from which walls W1 and W2 were tested, in the previous project period, in order to check how the reusing of the same material affects the response of the structure. All the soil mixtures used for the construction of W5-W8 walls correspond in their composition to the mixtures used to build traditional rammed earth houses from the area of eastern Croatia. It was observed that the addition of hemp affects the response of the tested wall and that by "recycling" the soil material, we can influence a higher bearing capacity of the rammed earth wall.

Rammed earth samples were made as well, for testing mechanical and physical properties. It was determined that sample size affects compressive strength value, with smaller samples appearing to have higher compressive strength values. However, that should be checked further on more samples in the following project years.

The characterization of samples that were made in the previous period of the project and kept in laboratory conditions for one year was also performed. In this way, the influence of aging on the samples, i.e., the development of strength after a period of one year, was checked.

**Key words:** rammed earth walls, in-plane behaviour, seismic behaviour, mechanical properties, physical properties

*This material was co-financed by the Croatian Science Foundation under the project UIP-2020-02-7363. The content or recommendations in this material are those of the author and do not necessarily reflect the views of the Croatian Science Foundation.*

*Please note that conducting the tests required a significant effort from the RE-forMS research team, the staff of the Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek and the partner institutions. If you derive valuable results from this data, please cite the relevant publications.*

*The list of all publications resulting from the activities within the RE-forMS project can be found on the following website:*

*<https://www.croris.hr/projekti/projekt/5837>*

*If you have any doubts and/or if certain information is missing from the report that could be useful to you in applying the available data from the RE-forMS project, please contact the RE-forMS project leader: Dr. sc. Ivan Kraus, [ikraus@gfos.hr](mailto:ikraus@gfos.hr).*

## Sadržaj

Uvod.....	5
Opis zidova od nabijene zemlje .....	5
Izgradnja zidova od nabijene zemlje.....	7
Opis eksperimentalnog ispitivanja .....	11
Rezultati ispitivanja zidova od nabijene zemlje .....	13
Ispitivanje materijalnih svojstava .....	18
Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka zida W5.....	20
Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W5 .....	21
Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W6 .....	24
Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W6 .....	26
Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W7 .....	27
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W7 .....	29
Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W8 .....	31
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W8 .....	32
Zaključak .....	35
Literatura.....	37
Prilog 1: Ispitivanje materijalnih svojstava od nabijene zemlje na 6 grupa uzoraka – ispitivanje nakon 12 mjeseci .....	38
A. Ispitivanje uzoraka W1-W2 .....	38
B. Ispitivanje uzoraka W3-W4 .....	44
C. Ispitivanje uzoraka s vapnom.....	49
D. Ispitivanje uzoraka s industrijskom konopljom.....	54
E. Ispitivanje uzoraka s pšenicom .....	57
F. Ispitivanje uzoraka s recikliranim materijalom .....	59
G. Usporedba rezultata ispitivanja zemljanih mješavina .....	64

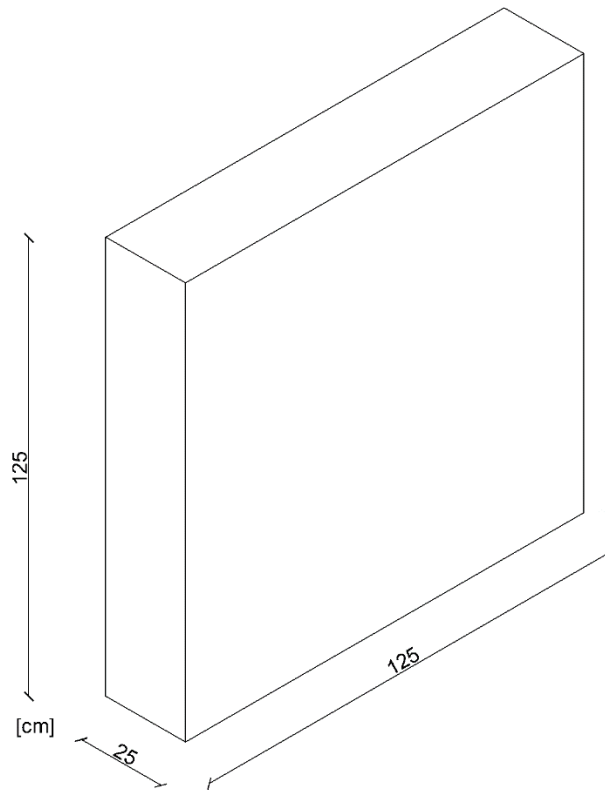
## Uvod

Provedena je izgradnja četiri zida od nabijene zemlje primjenom tradicijskih mješavina. Zid W5 izrađen je primjenom „reciklirane“ mješavine tla od koje su izrađeni zidovi W1 i W2, ispitani u prošlom razdoblju projekta. Preostala tri zida (W6, W7 i W8) izrađeni su primjenom iste mješavine tla koja sastavom odgovara zemljanim mješavinama pronađenima u kućama od nabijene zemlje s područja istočne Hrvatske. Zidovi su izgrađeni tradicijskom tehnikom nabijanja ručnim nabijačima. Nakon sušenja zidova tijekom 60 dana u laboratorijskim uvjetima, zidovi su ispitani na ciklička djelovanja u ravnini. Uz zidove su izrađena i probna tijela primjenom istih zemljanih mješavina na kojima su određena materijalna svojstva. Osim toga, ispitana su i materijalna svojstva na godinu dana starim uzorcima od nabijene zemlje.

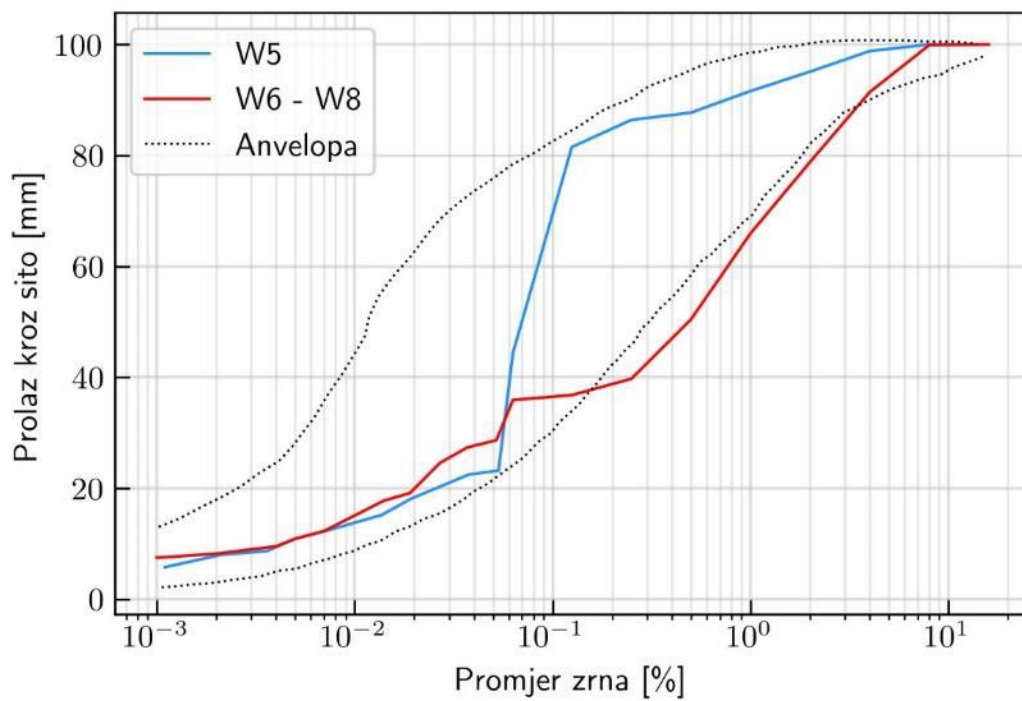
## Opis zidova od nabijene zemlje

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, izrađena su četiri modela zida od nabijene zemlje u mjerilu 1:2. Budući da u prethodnom izvještajnom razdoblju nije uočen značajan utjecaj sastava mješavine na odziv zida od nabijene zemlje uslijed ciklički promjenjivog opterećenja, promjenjivi čimbenik u ovom izvještajnom razdoblju bila je prisutnost vlakana industrijske konoplje u slojevima zida od nabijene zemlje. Prema tome, zidovi W6, W7 i W8 izrađeni su primjenom iste zemljane mješavine. Međutim, zid W6 izrađen je bez dodavanja vlakana industrijske konoplje između slojeva zida od nabijene zemlje te je služio kao referentni uzorak. Zid W7 izrađen je s dodatkom vlakana industrijske konoplje između svakog drugog sloja zida od nabijene zemlje u količini cca. 300 g/m<sup>2</sup>. Konačno, zid W8 izrađen je s vlaknima industrijske konoplje u svakom drugom sloju, u količini kao i zid W7. Međutim, u zidu W8 je na rubovima, u dužini cca. 25 cm, dodano duplo više industrijske konoplje, kako bi se imitiralo ponašanje vertikalnih AB serklaža na rubovima zida od opeke.

Geometrijska svojstva istovjetna su za sva četiri ispitana modela zida te su prikazana na slici 2.1. Provedbom terenskih istraživanja, utvrđeno je da visina zidova u konstrukcijama od nabijene zemlje na području Istočne Hrvatske uglavnom ne prelazi 2.5 m. Prema tome je visina modela zidova ispitanih ovim istraživanjem, poštujući mjerilo 1:2, definirana u iznosu od 1.25 m. Radi jednostavnosti izvedbe i ispitivanja, duljina zida je također definirana u istom iznosu. Nadalje, obilaskom kuća od nabijene zemlje, utvrđeno je da debljina nosivih zidova uglavnom iznosi 50 cm. Stoga je debljina modela zidova od nabijene zemlje definirana u iznosu od 25 cm. Geometrijska svojstva zidova W5 – W8 ispitanih u ovom razdoblju projekta istovjetna su svojstvima zidova W1 – W4 ispitanih u prethodnom razdoblju projekta. Time je olakšana usporedba ponašanja zidova od nabijene zemlje tijekom oba izvještajna razdoblja.



Slika 0.1 Dispozicija modela zidova od nabijene zemlje



Slika 0.2 Granulometrijski sastav rabljenih mješavina

## Građenje zidova od nabijene zemlje

Modeli zidova izrađeni za potrebe ovog istraživanja, rađeni su primjenom tradicionalne tehnike te su zbijani ručno, pomoću čeličnih nabijača. Zbog primjene tradicionalnih tehnika, potrebna vlažnost materijala nije egzaktno određena unaprijed nego je kontrolirana primjenom drop testa (Walker i dr. 2005; Minke 2012.; Krahn 2019.). Međutim, za svaki model zida određen je postotak vlažnosti materijala pri kojem je izrađen te su isti prikazani u tablici 3.1. Zemljani je materijal miješan strojno, pomoću građevinske mješalice, nakon što je prosijan kroz sito promjera 16 mm. Tlo je prije miješanja osušeno u sušioniku na temperaturi 105 °C, kako bi se dodavanju vode u mješavinu moglo pristupiti s visokom razinom preciznosti. Voda je u zemljani materijal dodana u količini određenoj prema provedenom drop testu.

Tablica 0.1 Vlažnost materijala prilikom izrade modela zidova

Model zida	W5	W6	W7	W8
Vlažnost pri izradi (%)	14,62	9,57	9,82	10,15



Slika 0.1 Priprema materijala za izradu zidova

Kako bi proces ispitivanja i premještanje modela zidova unutar laboratorija bilo jednostavnije, zidovi su izrađeni na betonskim gredama dimenzija 25 x 45 x 250 cm. Prije izvedbe zida, na betonskoj je gredi izliven tanki sloj vapnenog morta (slika 3.2) u omjeru 1:3, kako bi se osiguralo bolje povezivanje zemljanog zida sa betonskom gredom („temeljem“). Potom je postavljena drvena oplata koja je bila osigurana drvenim kosnicima (slika 3.3).





Slika 0.2 Postavljanje vapnenog morta na betonskoj gredi



Slika 0.3 Priprema drvene oplata za izgradnju zidova od nabijene zemlje

Modeli zidova od nabijene zemlje bili su sačinjeni od slojeva debljine od 5 do 7 cm, a za izradu svakog modela bilo je potrebno nekoliko sati grupi od 3 radnika. U svaki je sloj dodano dvije kante pripremljenog zemljanog materijala zapremnine 15 L. Materijal je prije nabijanja poravnan te je potom uslijedilo zbijanje metalnim nabijačima (slika 3.4), do zbijenosti 98 %, prema preporuci u literaturi (Walker i dr., 2005.). Kako bi se osigurala stalna razina vlage u zemljanom materijalu, tlo do usipavanja u drvenu oplatu čuvano u zatvorenim PVC vrećama. U zidove W7 i W8 dodana su vlakna industrijske konoplje prema unaprijed određenoj količini (Slika 3.5).





Slika 0.4 Metalni nabijač korišten prilikom izrade zemljanih zidova



Slika 0.5 Vlakna industrijske konoplje dodavana između slojeva nabijene zemlje

Kako bi se spriječilo puzanje zbog razmjerno velike vlastite težine, oplata je zadržana na modelima zidova u prosjeku tjedan dana nakon završetka izvedbe (slika 3.6). Potom su modeli zidova čuvani u laboratorijskim uvjetima tijekom 60 dana (slika 3.7), nakon čega je provedeno ispitivanje.

Zidovi su njegovani tijekom 60 dana, zbog lakše usporedivosti s zidovima iz prethodnog razdoblja. Osim toga, temeljem razine vlažnosti u ispitanim zidovima W1-W4, uočeno je da je 60 dana dostatno za postizanje dovoljno niske razine vlažnosti u zidovima od nabijene zemlje. Prema tome, te u skladu s pregledanom literaturom (Perić et al, 2021) i prethodnim iskustvima drugih istraživača u području konstrukcija od nabijene zemlje (Miccoli et al, 2016, 2017, El-Nabouch et al, 2016, 2017).



Slika 0.6 Trenutak nakon uklanjanja drvene oplata



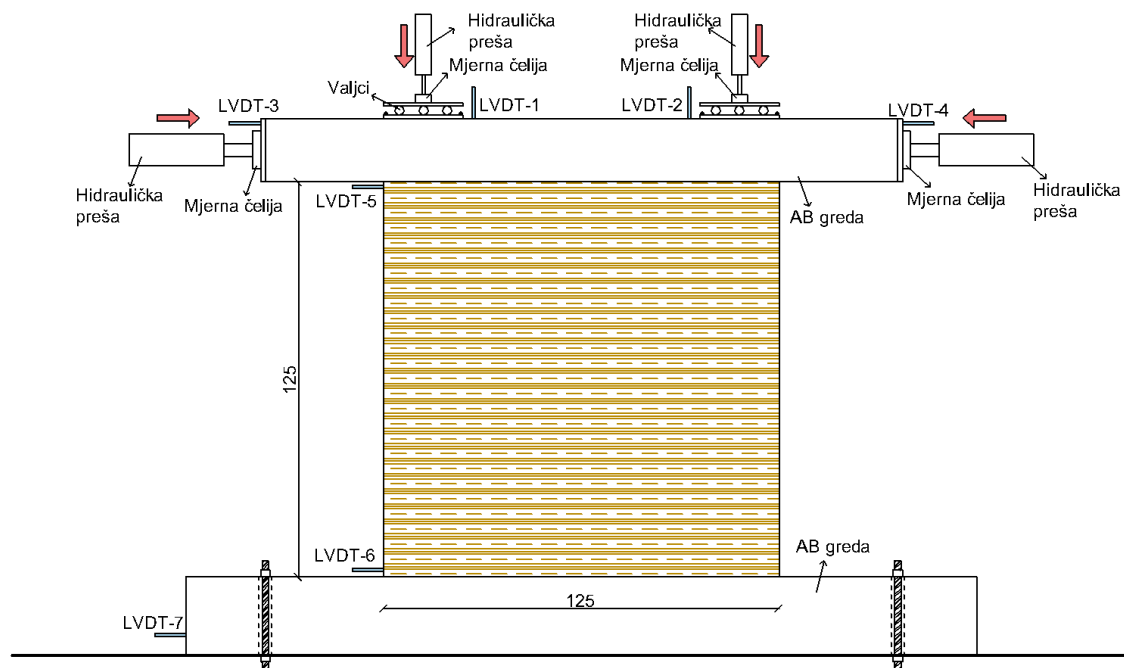
Slika 0.7 Modeli zidova par dana nakon uklanjanja oplata

Nakon sušenja, gornja ploha zidova poravnata je tankim slojem vapnenog morta, kako bi se osigurala bolja povezanost gornje betonske grede i zida od nabijene zemlje. Mort je nanesen tjedan dana prije provedbe ispitivanja, kako bismo bili sigurni u suhoću morta prije pričvršćivanja gornje betonske grede.

Za potrebe određivanja tlačne i vlačne čvrstoće materijala od kojeg su izrađeni zidovi, za vrijeme izgradnje zidova, izrađeno je i tri uzorka kocke, tri uzorka valjaka te tri uzorka prizmi. Uzorci su izrađeni od istog materijala, pripremljenog na isti način. Pritom su uzorci kocke dimenzija 15 x 15 x 15 cm, uzorci valjaka dimenzija 15 x 30 cm, a uzorci prizmi 4 x 4 x 16 cm. Uzorci su pohranjeni u komoru sa kontroliranom vlažnosti prostora  $50 \pm 5 \%$  pri temperaturi  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  te su njegovani tijekom 28 dana nakon čega su ispitani.

## Opis eksperimentalnog ispitivanja

Potresna otpornost modela zidova od nabijene zemlje ispitana je eksperimentalno pomoću ciklički promjenjivog opterećenja. Model zida je zbog prijenosa unutar laboratorija te lakšeg učvršćivanja prilikom ispitivanja bio postavljen na betonsku gredu, kako je već spomenuto u poglavlju 3. Osim toga, betonska greda dimenzija 20 x 35 x 200 cm bila je postavljena i na vrh modela zida kako bi se olakšalo nanošenje opterećenja tijekom eksperimenta. Postav eksperimenta prikazan je na slici 4.1.

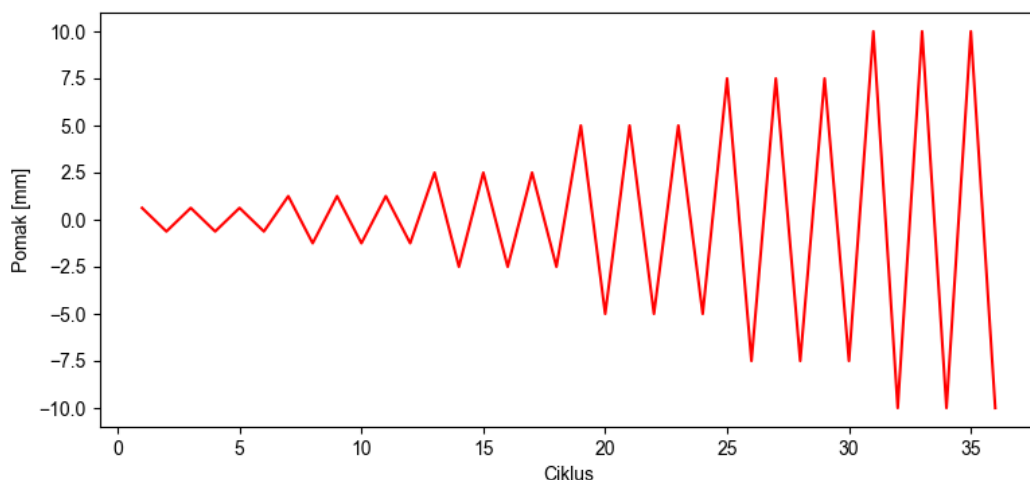


Slika 0.1 Postav eksperimenta

Na model zida prvo je nanoseno vertikalno opterećenje u ukupnom iznosu cca. od 0.19 MPa. Iznos vertikalnog opterećenja određen na temelju težine drvene građe i dijelova tradicionalnog krovišta te uporabnog opterećenja u vidu skladištenja žitarica. Uz to, svrha vertikalnog opterećenja je dvostruka. Osim što predstavlja stalno i uporabno opterećenje, ujedno i osigurava dobro povezivanje betonskih greda i modela zida te umanjuje klizanje između grede i modela zida prilikom nanošenja horizontalnog pomaka. Valja napomenuti da je zbog ručne kontrole nanošenja opterećenja, tijekom provedbe eksperimenta došlo do postepenog opadanja vertikalnog opterećenja s povećanjem horizontalnog pomaka vrha zida, tj. gornje betonske grede.

Idući korak u provedbi eksperimenta odnosio se na nanošenje horizontalnog pomaka u ciklusima koji se tri puta ponavljaju prije povećanja pomaka. Kako bi se zabilježilo i linearno područje ponašanja modela zida, prva dva seta ciklusa imaju manji korak, a potom je korak između setova ciklusa povećan na 2.5 mm. Program nanošenja horizontalnog pomaka grafički je prikazan na slici 4.2, a određen je po uzoru na pregledanu literaturu (Miccoli i dr. 2016., 2017., Ramezanzpour i dr. 2021). Za razliku od zidova ispitanih u prethodnom razdoblju projekta (W1-W4), odrađen je i jedan dodatni ciklus horizontalnog pomaka u iznosu od  $\pm 10$  mm, kako bi se postigao značajniji pad krutosti. Ispitivanje je prekinuto kada je kritički ocijenjen pad horizontalne sile uz daljnji porast pomaka. Valja još napomenuti i da je pomak nanošen u osi gornje betonske grede pomoću ručno kontroliranih hidrauličkih preša.





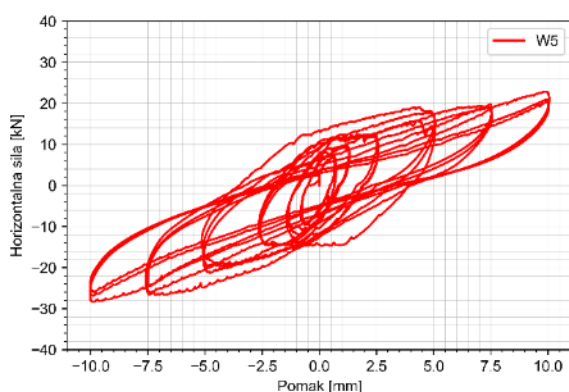
Slika 0.2 Program opterećivanja modela zida horizontalnim pomakom

Tijekom provedbe eksperimenta, odziv modela zidova mjereno je pomoću LVDT-ova, pozicioniranih kako je prikazano na slici 4.1., te ARAMIS sustava. Osim pomaka gornje betonske grede, mjereno je i relativni pomak betonskih greda u odnosu na model zida, kao i pomak donje betonske grede u odnosu na tlo. Na taj je način izmjereno zanemarivo proklizavanje betonske grede u odnosu na podlogu za sva četiri modela zida.

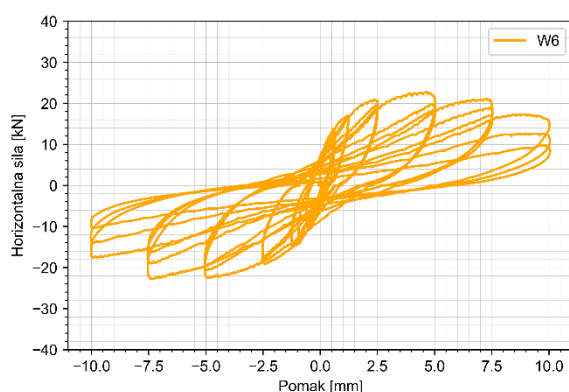
## Rezultati ispitivanja zidova od nabijene zemlje

Histerezne petlje ispitanih zidova prikazane su na slici 5.1. Navedeni podaci prikupljeni su LVDT-ima postavljenim u smjeru djelovanja horizontalnog opterećenja.

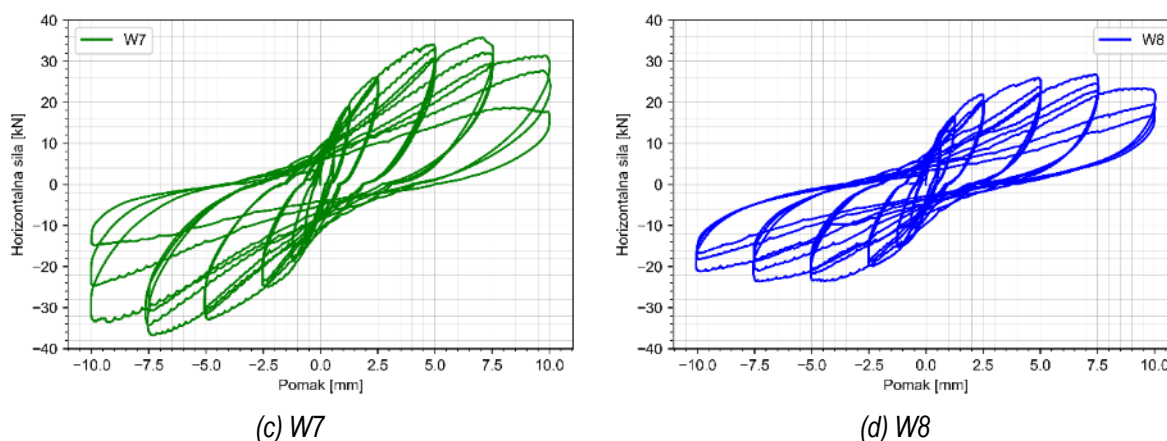
Može se uočiti da je ponašanje zidova uglavnom simetrično u oba smjera (*push* i *pull*). Izgled histerezne petlje je približno isti za zidove W6, W7 i W8, dok je histerezna petlja određena ispitivanjem zida W5 izgledom drugačija te nije „uštinuta“ u sredini.



(a) W5

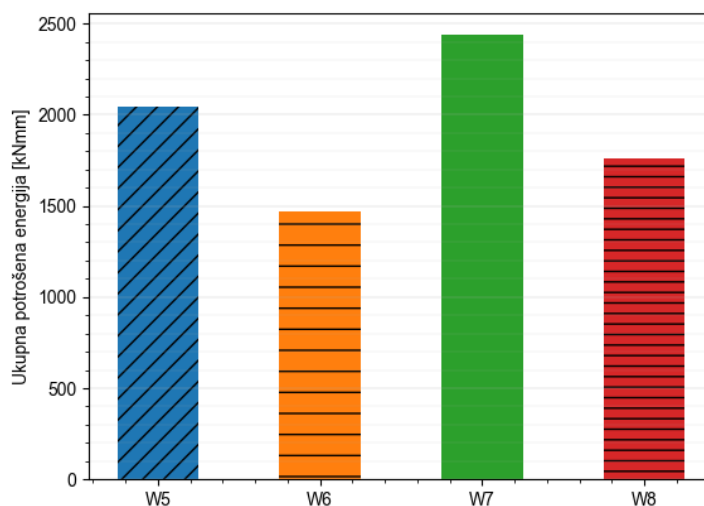


(b) W6



Slika 0.1 Histerezne petlje dobivene cikličkim ispitivanjem zidova od nabijene zemlje u njihovoj ravnini

Slika 5.2 daje grafički prikaz ukupne potrošene energije tijekom provedenog cikličkog opterećivanja zidova W5 – W8. Vidljivo je kako je dodatkom industrijske konoplje znatno povećan kapacitet potrošnje energije unutar zida od nabijene zemlje. Međutim, prema rezultatima se čini da dodatkom veće količine industrijske konoplje u rubove zida, kapacitet potrošnje energije opada, no i dalje je veći u odnosu na „prazni“ zid (bez dodatka vlakana industrijske konoplje).



Slika 0.2 Ukupna potrošena energija

Slika 5.3 daje prikaz sva četiri ispitana zida na kraju ispitivanja s formiranim pukotinama. Međutim, zbog stohastičkog crno bijelog uzorka kojim je prednje lice zida oslikano, sve pukotine nisu vidljive na fotografijama. Stoga slika 5. daje shematski prikaz svih pukotina koje su se pojavile, a koje su određene na temelju Von Mises-ovih naprezanja prikupljenih snimanjem ARAMIS sustavom (slike 5.4 i 5.5). Sva četiri ispitana zida pokazala su izražene vertikalne pukotine, vjerojatno pod utjecajem načina na koji je izvedena oplata. Unatoč tome, svi su zidovi pokazali veću nosivost u odnosu na onu zabilježenu na zidovima od nabijene zemlje ispitanim u prethodnom izvještajnom razdoblju.





(a) W5



(b) W6

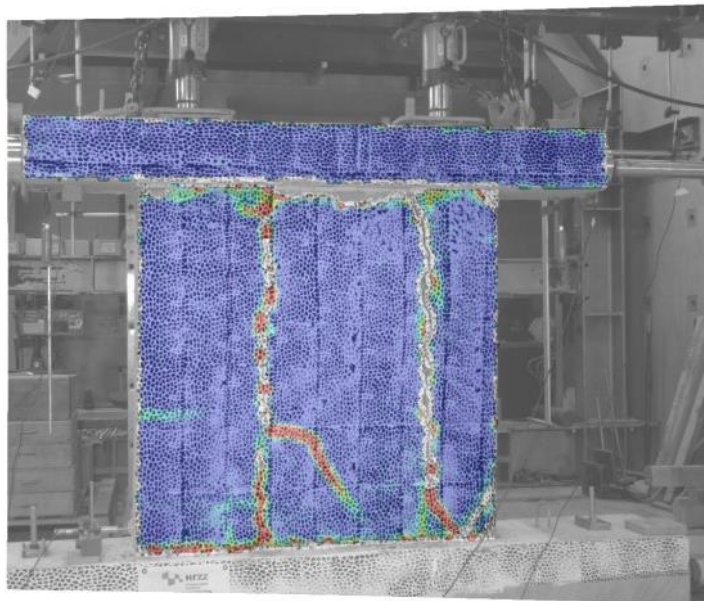


(c) W7

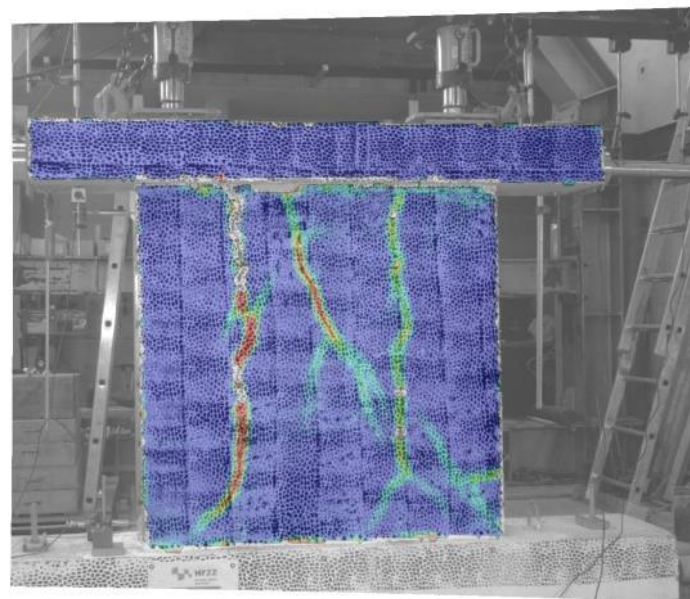
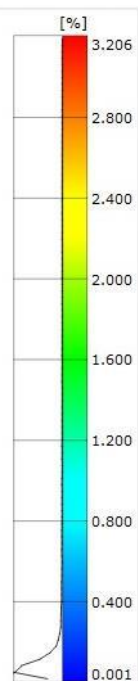


(d) W8

Slika 0.3 Pukotine na zidovima od nabijene zemlje formirane do kraja cikličkog ispitivanja



(a) W5 – maksimalna deformacija

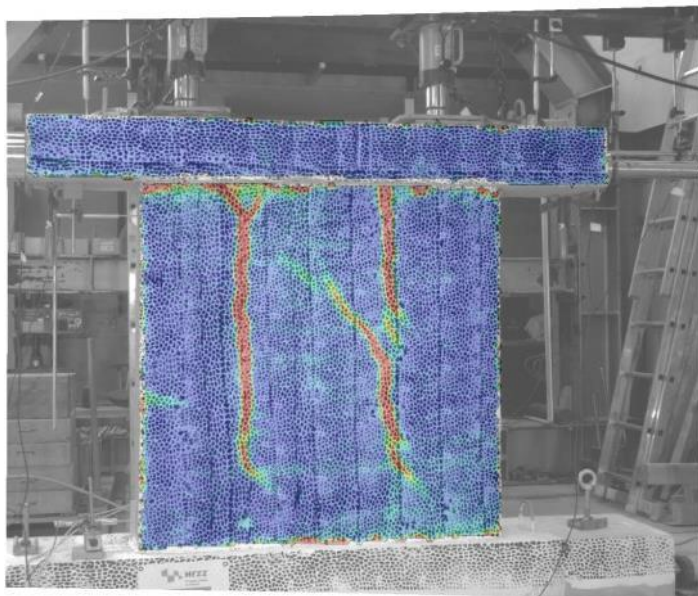


(b) W6 - maksimalna deformacija

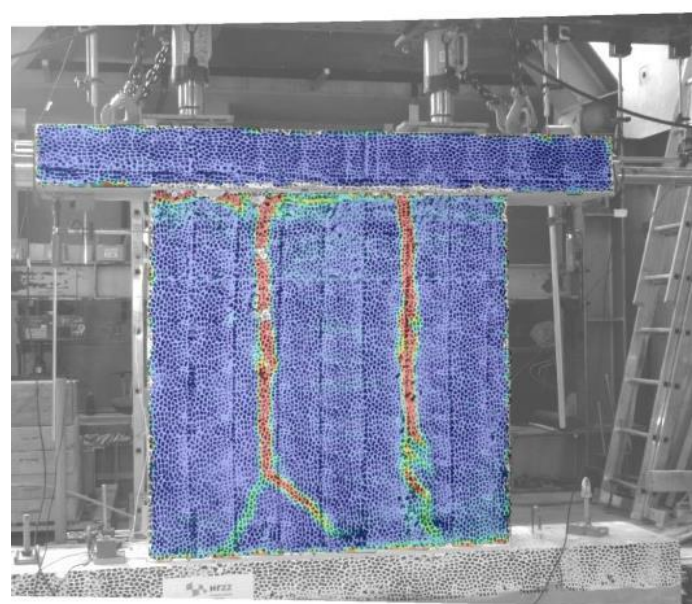
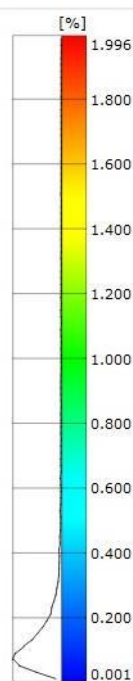


Slika 0.4 Deformacije (Von Mises) zabilježene Aramis sustavom

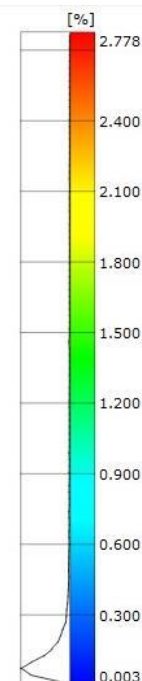




(a) W7 - maksimalna deformacija



(b) W8 - maksimalna deformacija

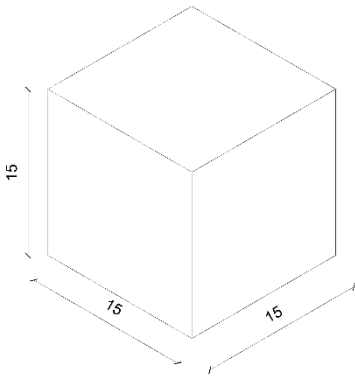
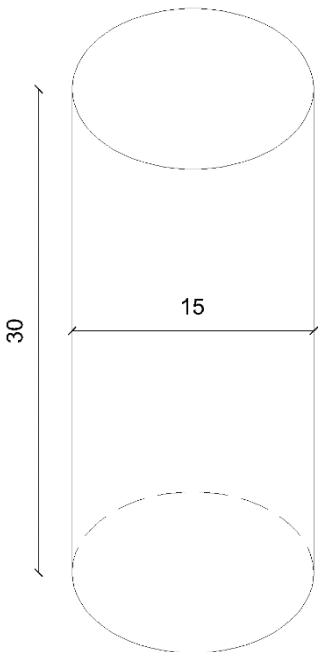


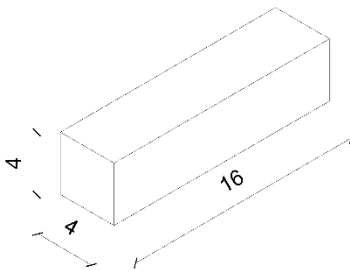
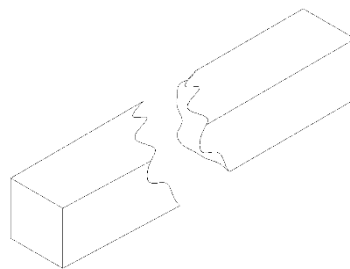
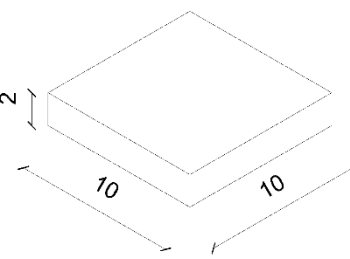
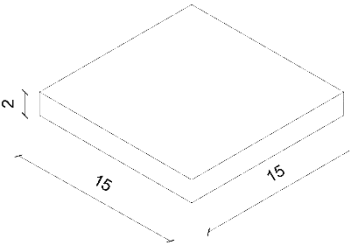
Slika 0.5 Deformacije (Von Mises) zabilježene Aramis sustavom

## Ispitivanje materijalnih svojstava

Prilikom izrade zidova, od istog materijala rabljenog za izradu zidova, izrađeni su i uzorci za ispitivanje materijalnih svojstava. Svojstva su ispitana na po tri istovjetna uzorka koji su nakon zbijanja čuvani u kalupima 24 sata nakon čega su raskalupljeni i premješteni u komoru za sušenje uzoraka. Tijekom 28 dana, uzorci su negovani na temperaturi  $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $\text{RH } 65 \pm 5 \%$ . Budući da za sada još ne postoji standardizirani postupak njege uzoraka od nabijene zemlje prethodno ispitivanju, po uzoru na ostale istraživače u području nabijene zemlje (Lilley i Robinson, 1995.; Ciancio i Augarde, 2013. Shrestha i sur., 2020), i u ovome su istraživanju praćeni postupci njege za betonske uzorke. Svrha njege uzoraka tijekom 28 dana je postizanje vlažnosti u uzorku koja odgovara prirodnoj vlažnosti u konstrukciji od nabijene zemlje. Prema do sada provedenom terenskom istraživanju u okviru projekta, opisanom u izvještajima u prethodnom razdoblju, prirodni udio vlažnosti materijala ugrađenog u zidove od nabijene zemlje na području Slavonije i Baranje kreće se u granicama od 2 do 4 %. Oblik i broj ispitanih uzoraka prikazan je u Tablici 6.1.

Tablica 0.1 Opis ispitnih uzoraka

Svojstvo	Oblik uzorka	Dimenzije [cm]	Broj ispitanih uzoraka
Tlačna čvrstoća		15 x 15 x 15	3
Tlačna čvrstoća		15 x 30	3

Vlačna čvrstoća na savijanje	4 x 4 x 16	3
		
Tlačna čvrstoća		6 polovica
		
Posmična čvrstoća	10 x 2 x 10	3
		
Koeficijent toplinske propusnosti	15 x 2 x 15	3
		

Tlačna je čvrstoća ispitana na tri različita oblika uzorka (kocka, valjak i prizma) kako bi se, nakon ispitivanja uzoraka u narednim razdobljima projekta, mogao provjeriti utjecaj oblika i/ili veličine ispitnog uzorka na iznos tlačne čvrstoće nabijene zemlje. Nadalje, vlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima prizmatičnog oblika prikazani u tablici 6.1..

Ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće je provedeno koristeći uređaj Shimatzu AG-X kapaciteta 300 kN. Unos opterećenja proveden je kontrolom pomaka 1 mm/min, za uzorke oblika kocke i valjka na kojima je ispitana tlačna čvrstoća. Vlačna čvrstoća na savijanje ispitana je uz polagani prirast opterećenja brzinom  $50 \pm 10$  N/s do sloma, dok je tlačna čvrstoća na uzorcima prizmi ispitana uz polagani porast opterećenja brzinom  $2400 \pm 200$  N/s do sloma, prema BS EN 196-1:2005. Prije ispitivanja, svaki je uzorak precizno izmjereno kako bi se mogla odrediti čvrstoća prema izrazima (1) i (2). Uz to, iz sredine svakog ispitnog uzorka izdvojeno je nešto više od 100 grama materijala, za potrebe određivanja vlažnosti prilikom ispitivanja.

$$f_c = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$f_{t,f} = \frac{1.5 \cdot F_{max} \cdot l}{b^3} \quad (2)$$

gdje je:  $f_c$  – tlačna čvrstoća,  $F_{max}$  – najveća postignuta sila prilikom ispitivanja,  $A$  – površina plohe na koju djeluje sila,  $f_t$  – vlačna čvrstoća,  $l$  duljina uzorka, a  $b$  širina uzorka.

Modul elastičnosti proračunan je na temelju 30 % vrijednosti tlačne čvrstoće (Silva et al. 2013; 2016; 2018), prema Hookeovom zakonu (3)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

gdje je:  $E$  – modul elastičnosti,  $\sigma$  – tlačna čvrstoća,  $\varepsilon$  – deformacija

## Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka zida W5

Za zid W5 ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika 6.1) i tri uzorka valjka (slika 6.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika 6.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika 6.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



a) b) c)

Slika 0.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W5



a) b) c)

Slika 0.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – W5





a)



b)



c)

Slika 0.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama – W5



a)



b)

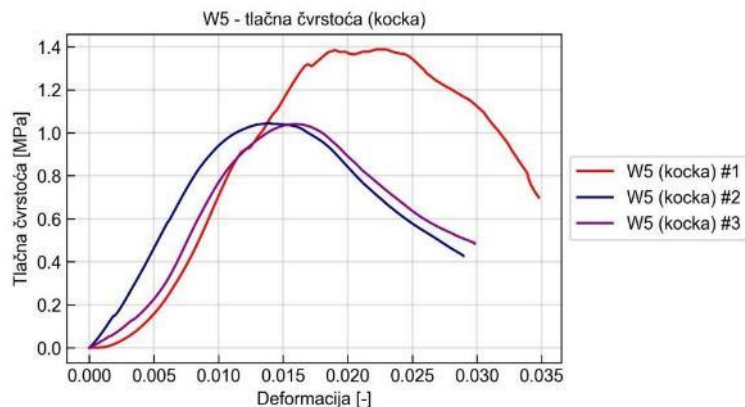


c)

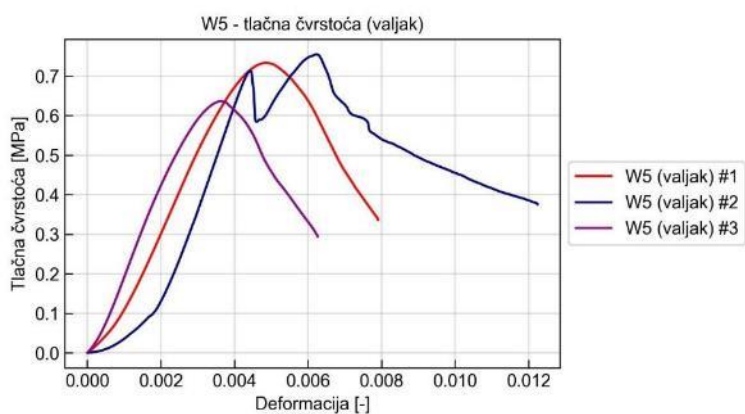
Slika 0.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama – W5

## Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W5

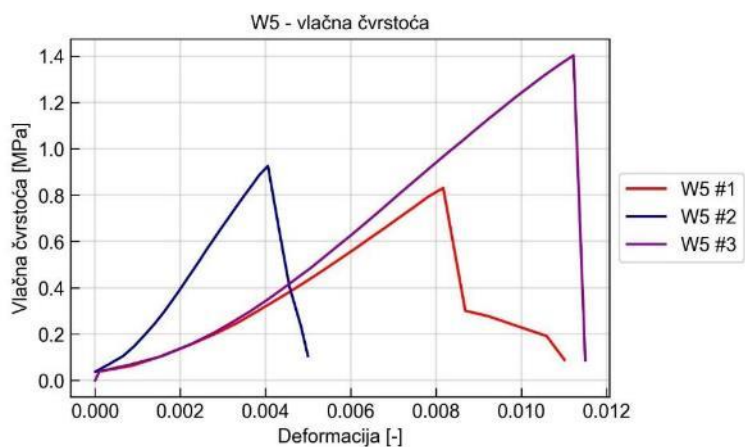
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.5 i 6.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama 6.7 (vlačna čvrstoća) i 6.8 (tlačna čvrstoća). U tablici 6.2 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici 6.3 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



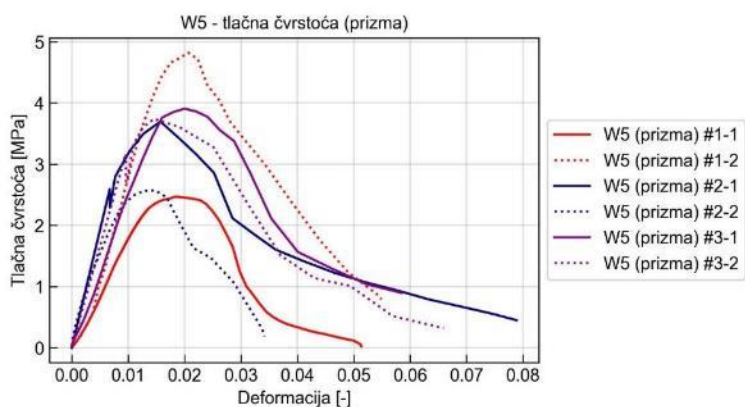
Slika 0.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W5



Slika 0.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W5



Slika 0.7 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W5



Slika 0.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – W5

Tablica 0.2 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W5

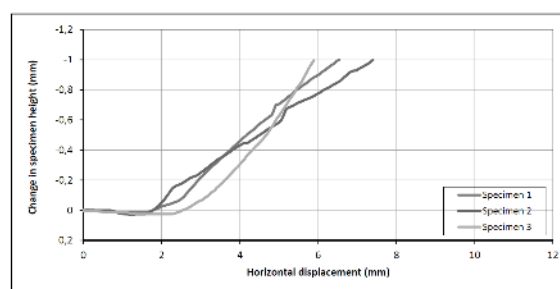
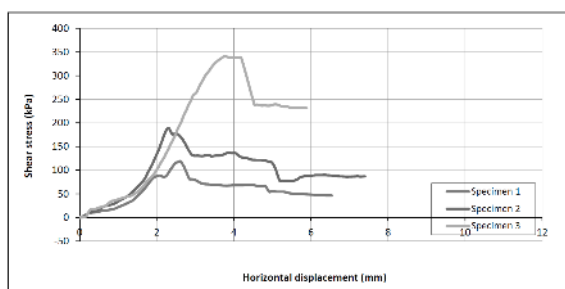
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,39	1,04	1,04
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,16	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,73	0,75	0,64
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		0,71	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,83	0,93	1,40
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,05	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,47	4,82	3,70
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	3,64	3,13	3,82
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	53,27	85,27	51,77
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		63,44	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	136,43	91,82	190,55
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		139,60	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	195,16	199,57	222,85
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		205,86	

Tablica 0.3 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W5

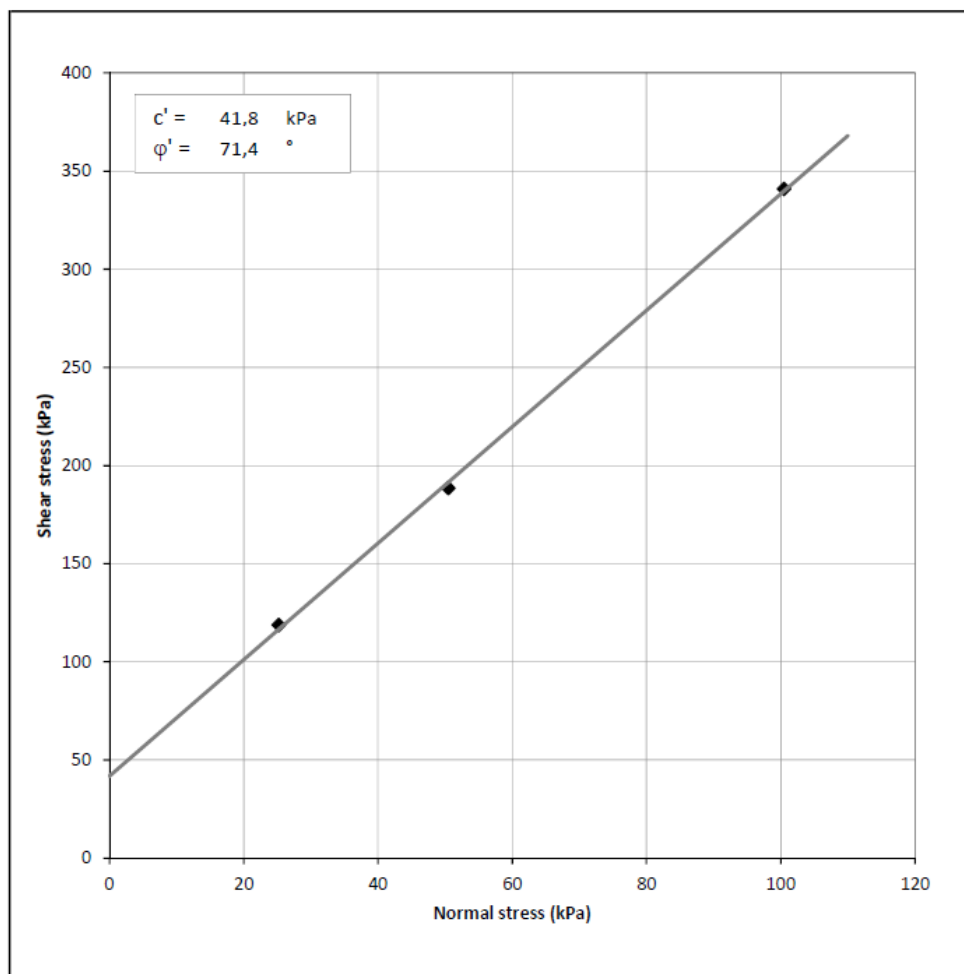
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,06	2,28	2,33
Prosječna vlažnost (%)		2,22	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,12	2,16	2,03
Prosječna vlažnost (%)		2,10	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,92	1,90	2,02
Prosječna vlažnost (%)		1,95	

## Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W5

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama 6.9 i 6.10.



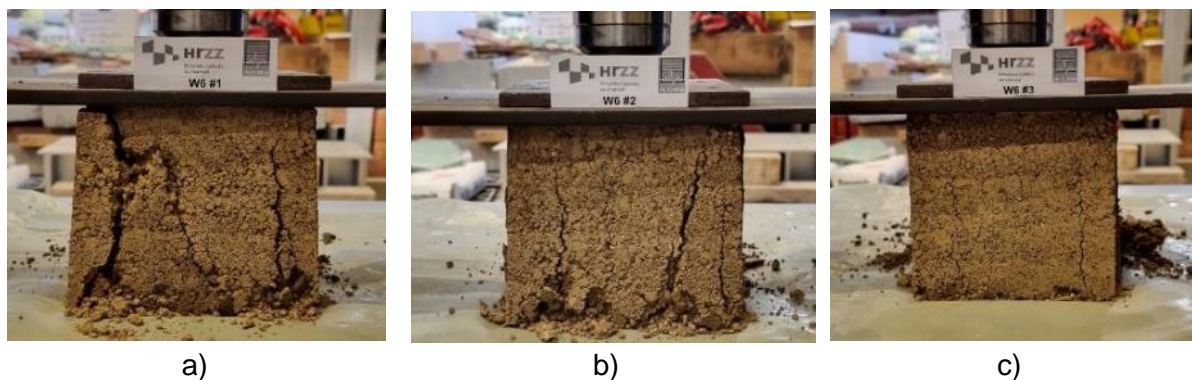
Slika 0.9 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W5: promjena posmičnog napreznja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog napreznja (desno)



Slika 0.10 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W5: kut unutarnjeg trenja i kohezija

### Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W6

Za zid W6 ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika 6.11) i tri uzorka valjka (slika 6.12), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika 6.13) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika 6.14), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



Slika 0.11 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W6





a)



b)



c)

Slika 0.12 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – W6



a)



b)

NEDOSTAJE  
FOTOGRAFIJA

c)

Slika 0.13 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama – W6



a)



b)

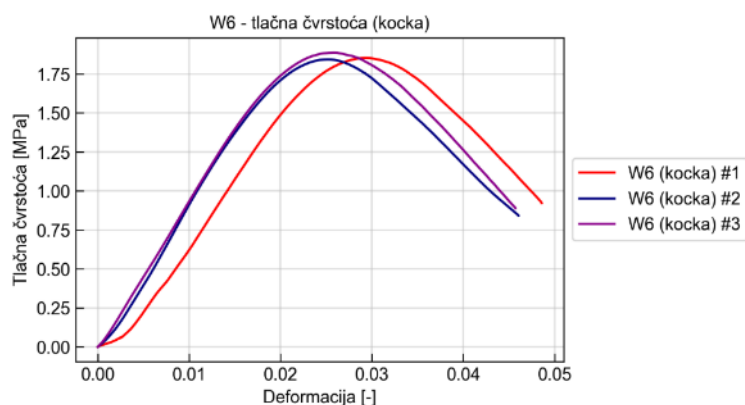


c)

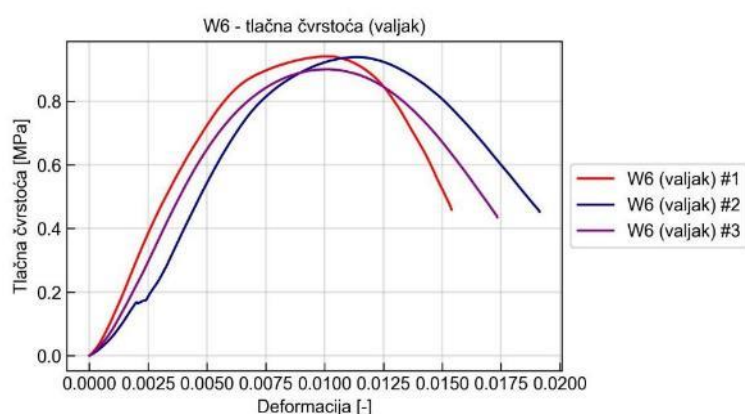
Slika 0.14 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama – W6

## Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W6

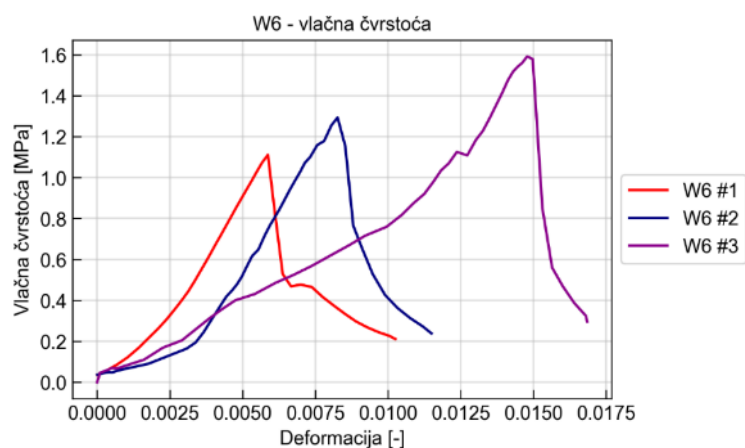
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.15 i 6.16. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama 6.17 (vlačna čvrstoća) i 6.18 (tlačna čvrstoća). U tablici 6.4 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici 6.5 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika 0.15 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W6

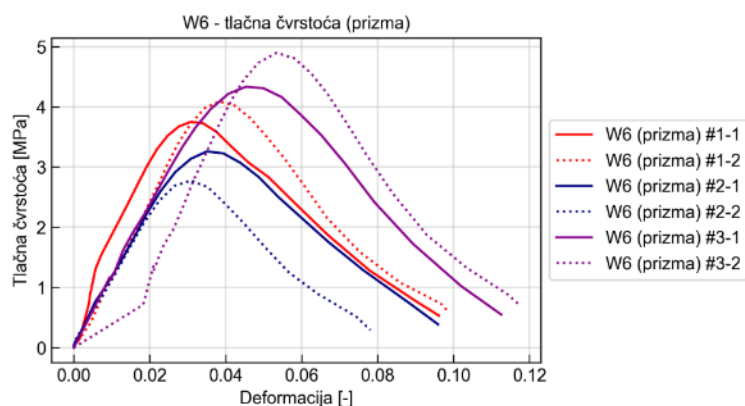


Slika 0.16 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W6



Slika 0.17 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W6





Slika 0.18 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – W6

Tablica 0.4 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W6

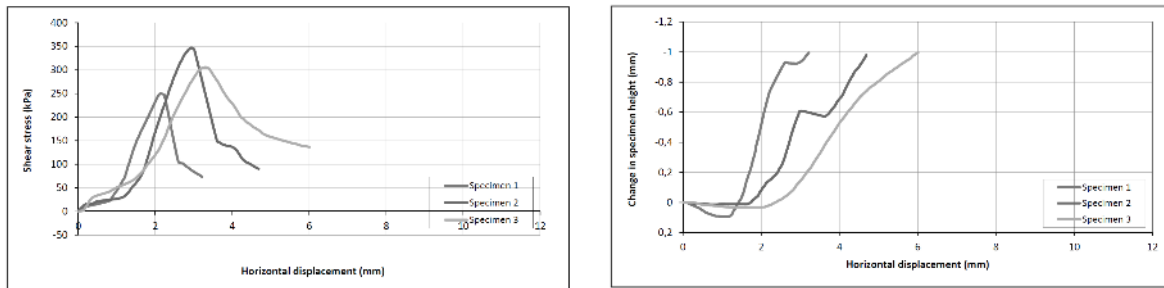
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,83	1,84	1,89
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,86	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,94	0,94	0,90
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		0,93	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,11	1,29	1,59
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,33	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,75	4,09	3,26
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	3,92	3,02	4,62
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	60,33	83,78	90,21
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		78,11	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	147,41	86,00	115,76
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		116,39	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	167,50	118,61	92,05
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		126,05	

Tablica 0.5 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W6

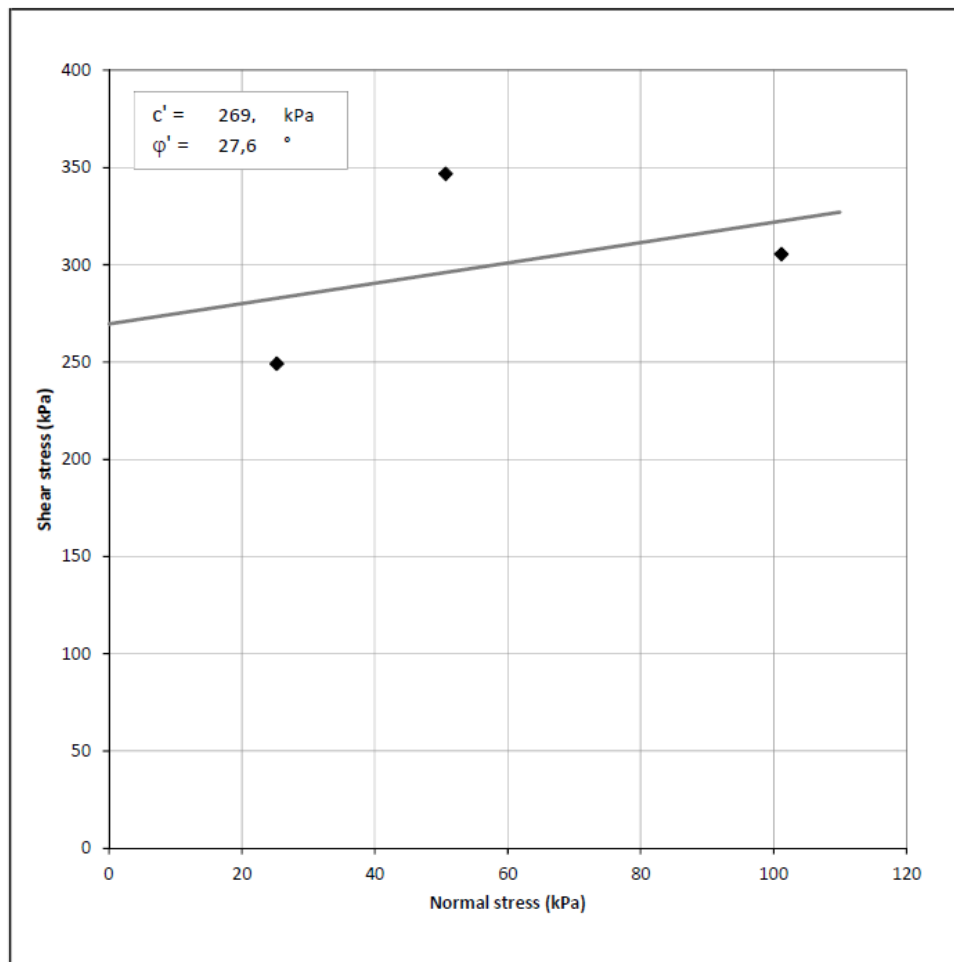
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,458	2,56	2,47
Prosječna vlažnost (%)		2,5	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,35	2,24	2,25
Prosječna vlažnost (%)		2,28	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	2,02	2,13	2,13
Prosječna vlažnost (%)		2,09	

## Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W6

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama 6.19 i 6.20.



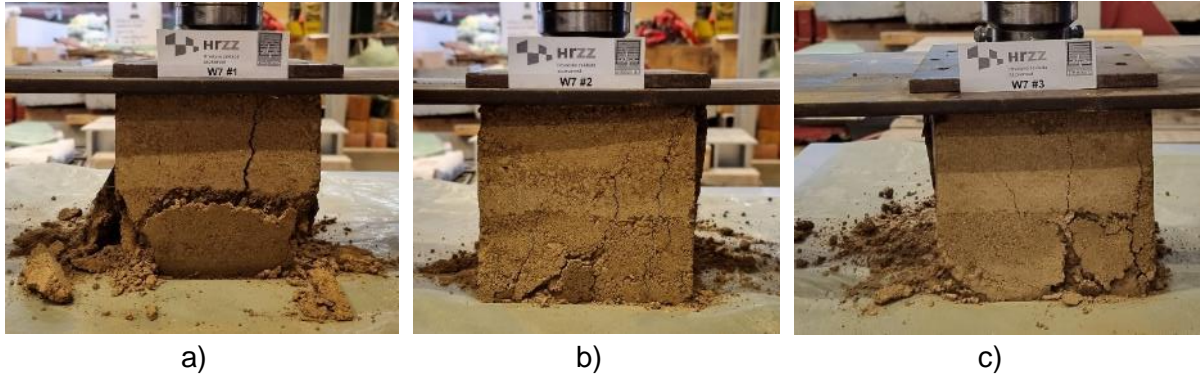
Slika 0.19 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W6: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)



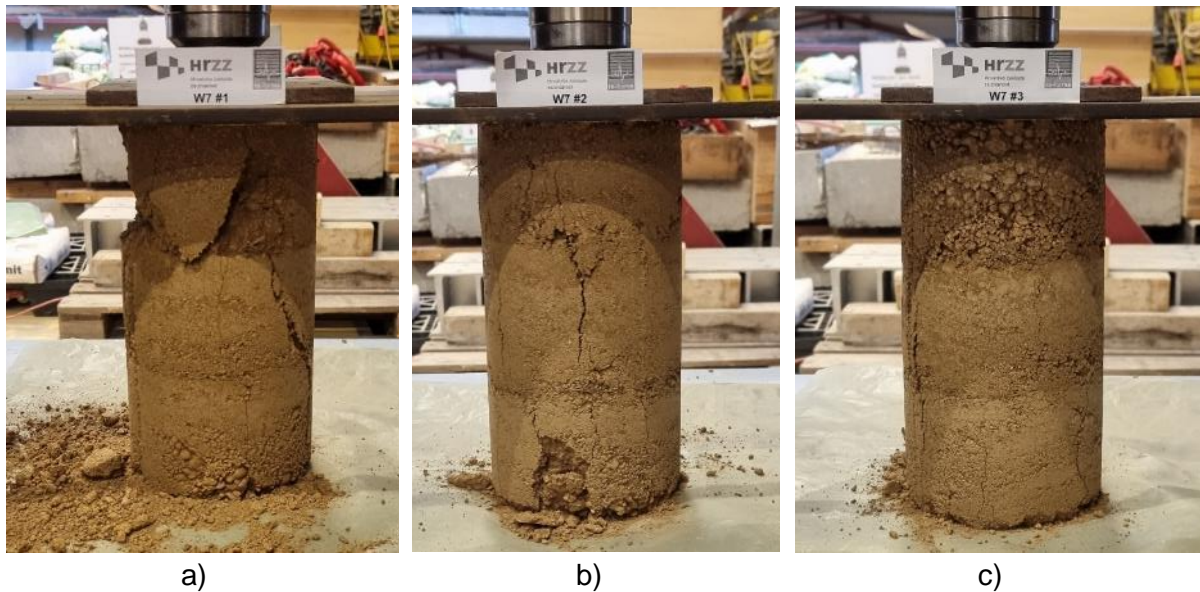
Slika 0.20 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W6: kut unutarnjeg trenja i kohezija

## Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W7

Za zid W7 ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika 6.21) i tri uzorka valjka (slika 6.22). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog nemogućnosti ugrađivanja vlakana konoplje u uzorke prizmi dimenzija 4 x 4 x 16 cm, što bi dalo smislene rezultate.



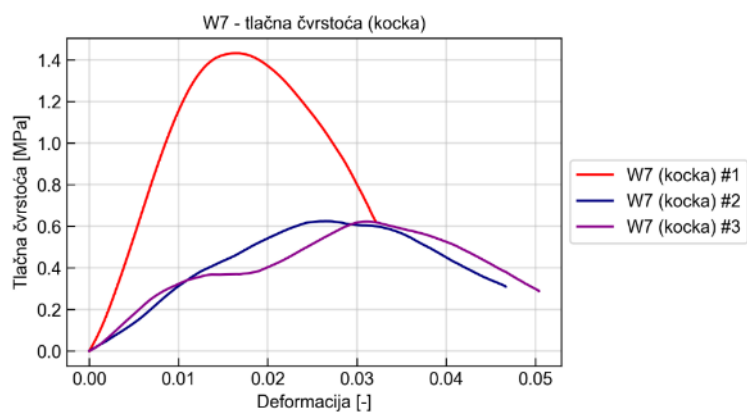
Slika 0.21 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W7



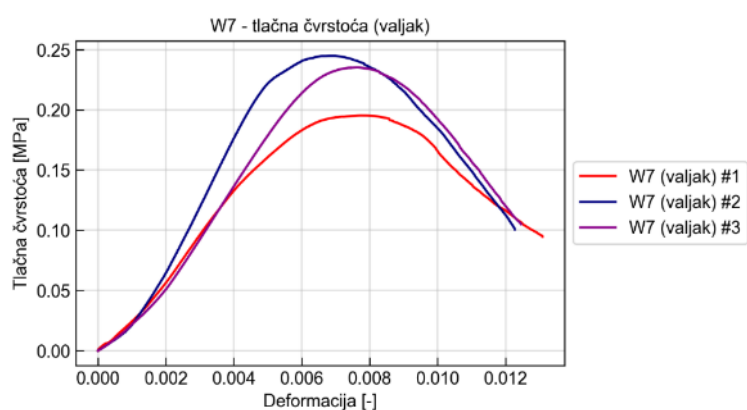
Slika 0.22 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – W7

### Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W7

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.23 i 6.24. U tablici 6.6 sažeto su prikazane čvrstoće uzorka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzorka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici 6.7 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika 0.23 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W7



Slika 0.24 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W7

Tablica 0.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W7

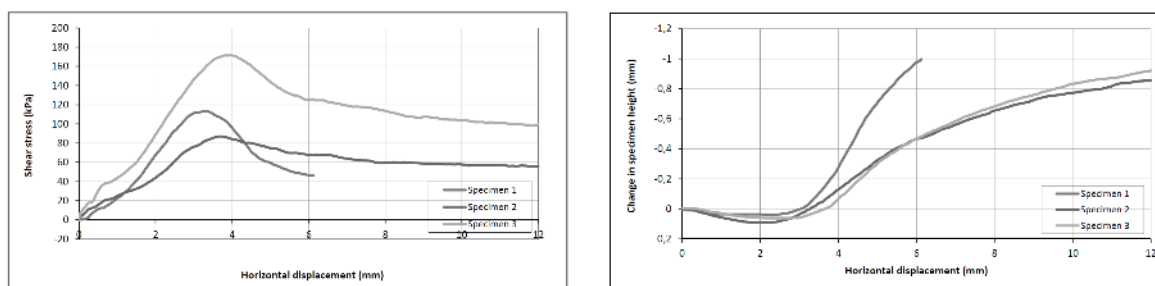
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,43	0,62	0,62
Srednja tlačna čvrstoća – kocka (MPa)		0,89	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,20	0,24	0,24
Srednja tlačna čvrstoća – valjak (MPa)		0,23	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	105,23	23,61	35,62
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		54,82	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	28,41	33,71	28,30
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		30,14	

Tablica 0.7 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W7

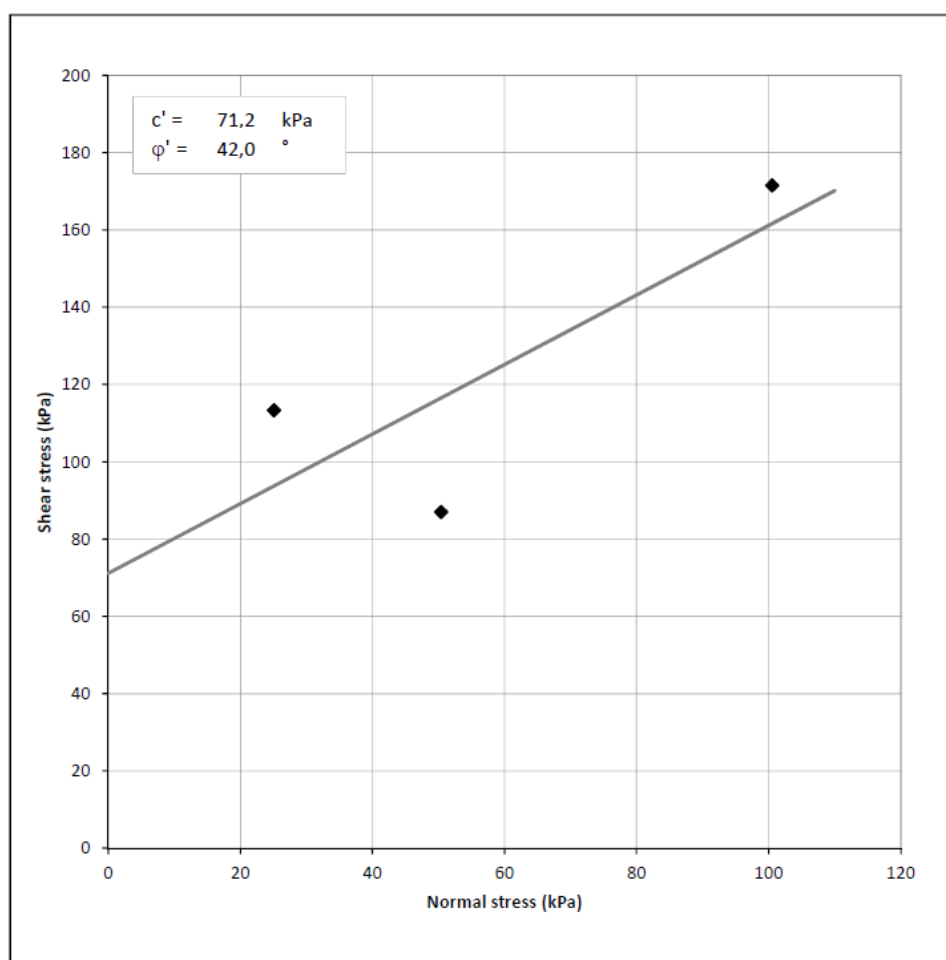
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,69	2,86	2,69
Prosječna vlažnost (%)		2,75	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,74	2,70	2,33
Prosječna vlažnost (%)		2,59	

## Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W7

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama 6.25 i 6.26.



Slika 0.25 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W7: promjena posmičnog napreznja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog napreznja (desno)

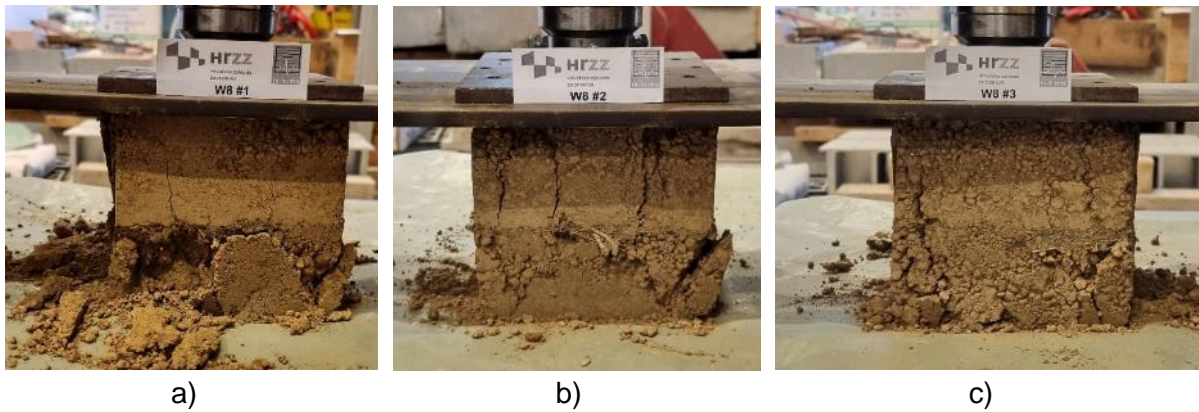


Slika 0.26 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W7: kut unutarnjeg trenja i kohezija

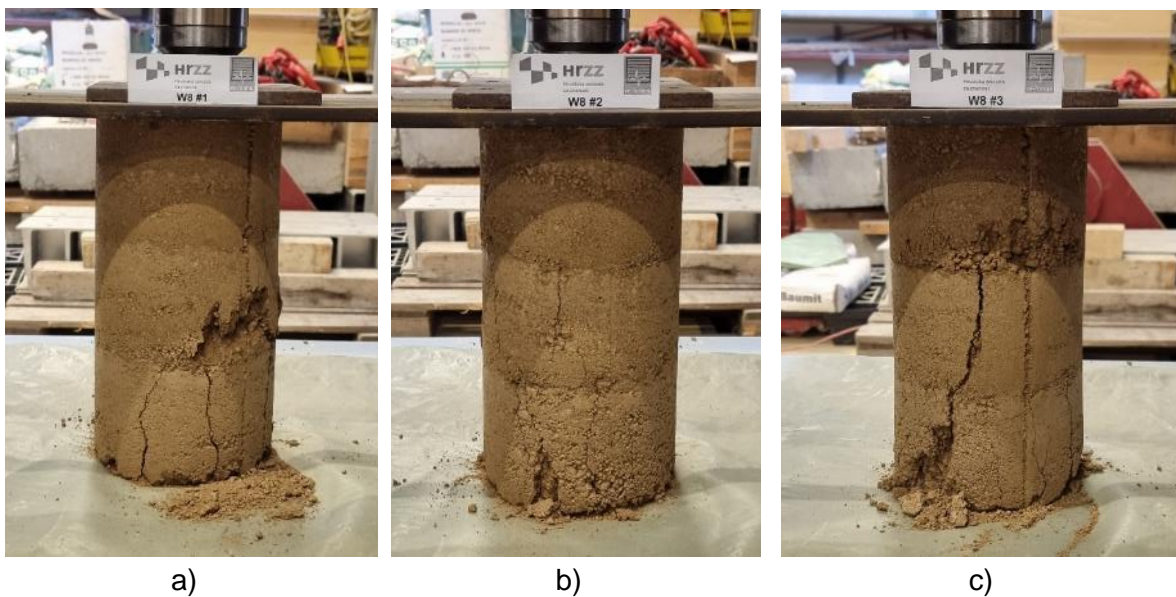
## Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W8

Za zid W8 ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika 6.27) i tri uzorka valjka (slika 6.28). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog otežanog ugrađivanja vlakana konoplje u uzorke prizmi dimenzija 4 x 4 x 16 cm.





Slika 0.27 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W8

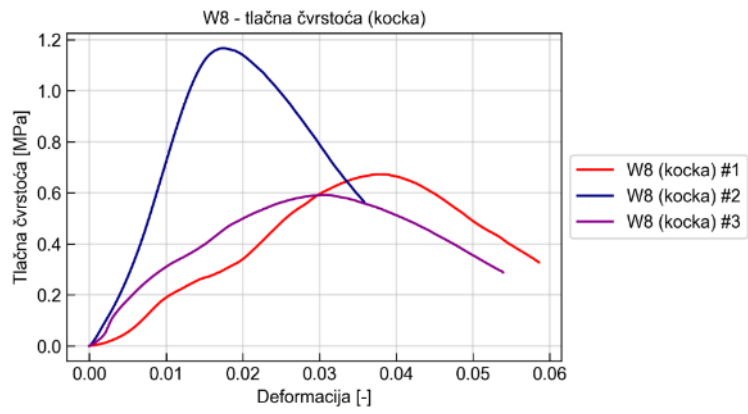


Slika 0.28 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – W8

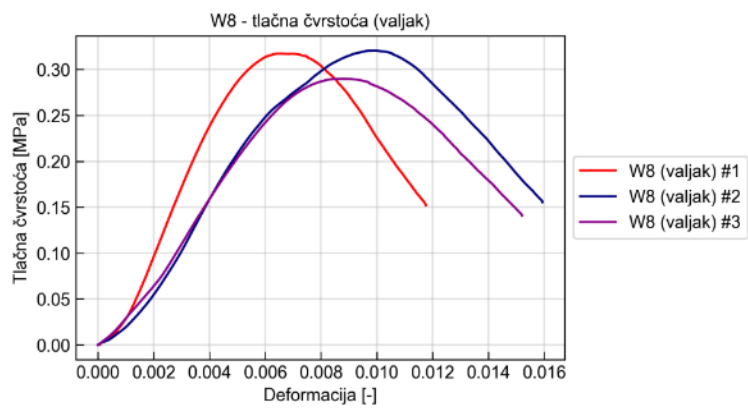
### Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W8

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.29 i 6.30. U tablici 6.8 sažeto su prikazane čvrstoće uzorka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzorka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici 6.9 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.





Slika 0.29 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W8



Slika 0.30 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W8

Tablica 0.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće – W8

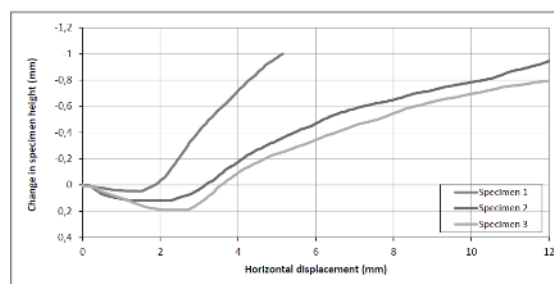
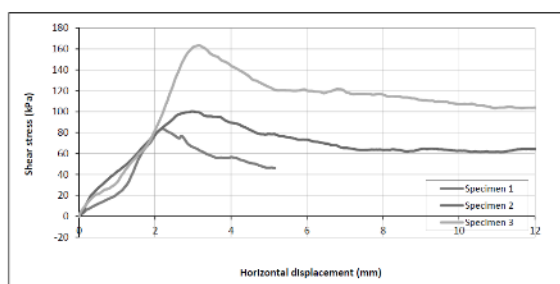
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	0,67	1,17	0,59
Srednja tlačna čvrstoća – kocka (MPa)		0,81	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,32	0,32	0,30
Srednja tlačna čvrstoća – valjak (MPa)		0,31	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	18,96	57,72	36,35
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		37,68	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	47,79	33,22	34,20
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		38,40	

Tablica 0.9 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W8

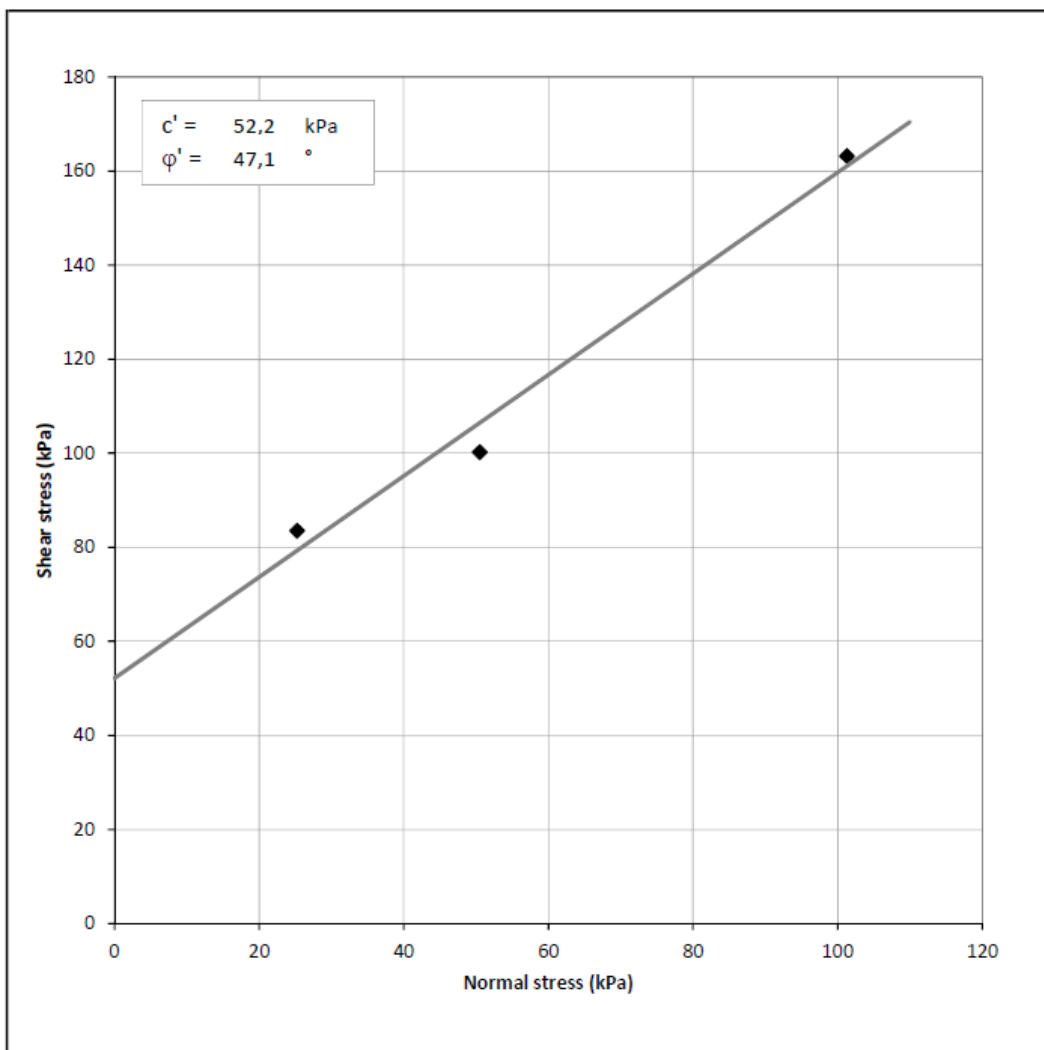
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,81	2,85	3,11
Prosječna vlažnost (%)		2,92	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,88	2,69	2,79
Prosječna vlažnost (%)		2,79	

## Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W8

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama 6.31 i 6.32.



Slika 0.31 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W8: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)



Slika 0.32 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W8: kut unutarnjeg trenja i kohezija

## Zaključak

U ovom projektnom razdoblju ispitano je četiri zida od nabijene zemlje na djelovanje u ravnini zida. Pritom je odlučeno izraditi zidove primjenom dvaju zemljanih mješavina, oznaka RE1 i RE2. Zemljane mješavine su sastavom prilagođene anvelopama određenima na temelju ispitanih uzoraka zemljanih mješavina prikupljenih tijekom terenskog istraživanja u prethodnom projektnom razdoblju. Zidovi su izrađeni primjenom tradicionalnih tehnika zbijanja ručnim nabijačem unutar drvene oplata, na betonskim gredama koje su imale ulogu temelja. Nakon izrade, zidovi su ostavljeni u oplati 5 dana te su potom njegovani tijekom dva mjeseca kada su ispitani. Prije ispitivanja, na vrh svakog zida postavljena je betonska greda koja je omogućila ravnomjerno nanošenje vertikalnog i horizontalnog opterećenja.

Ispitivanjem zidova od nabijene zemlje uočeno je da je „recikliranjem“ materijala, odnosno ponovnom upotrebom ranije zbijanog materijala, došlo do povećanja kapaciteta nosivosti. Nadalje, usporedbom referentnog zida W6 sa zidovima W7 i W8 u koje je dodana industrijska konoplja između slojeva nabijene zemlje, uočeno je da konoplja povećava kapacitet nosivosti

zidova na djelovanja u ravnini zida. Pri tom je zid W7, s manjim udjelom vlakana industrijske konoplje, pokazao nešto bolju nosivost.

Uz to, provedeno je i ispitivanje materijalnih svojstava svake skupine uzoraka, izrađenih od istih mješavina koje su primijenjene i za izradu zidova. Tlačna je čvrstoća ispitana na uzorcima kocaka, valjaka i prizmi te su uočene znatne razlike u vrijednostima čvrstoće, posebno između „velikih“ uzoraka (kocka i valjak) i „malih“ uzoraka (prizme), pri čemu su znatno veće vrijednosti tlačne čvrstoće uočene na manjim uzorcima. Osim toga, uočena je i izražena razlika u vrijednostima tlačne čvrstoće između referentne mješavine, koja odgovara zidu W6, te dodatka konoplje. Naime, dodatkom industrijske konoplje, tlačna je čvrstoća opala za 1 MPa, na uzorcima kocke te 0.6 – 0.7 MPa na uzorcima valjaka. Ovo je opažanje oprečno onome uočenom pri ispitivanju zidova, jer je dodatak industrijske konoplje povećao otpornost na opterećenje. Međutim, valja uzeti u obzir i razliku u prirodi opterećenja između provedbe testiranja tlačne čvrstoće i cikličkog opterećivanja zida u ravnini. Vlačna je čvrstoća ispitana na uzorcima prizmi, prema normi za ispitivanje morta. Vrijednosti vlačne čvrstoće iznosile su u prosjeku 1.05 MPa za mješavinu zida W5, odnosno 1.33 MPa za mješavinu zida W6.



## Literatura

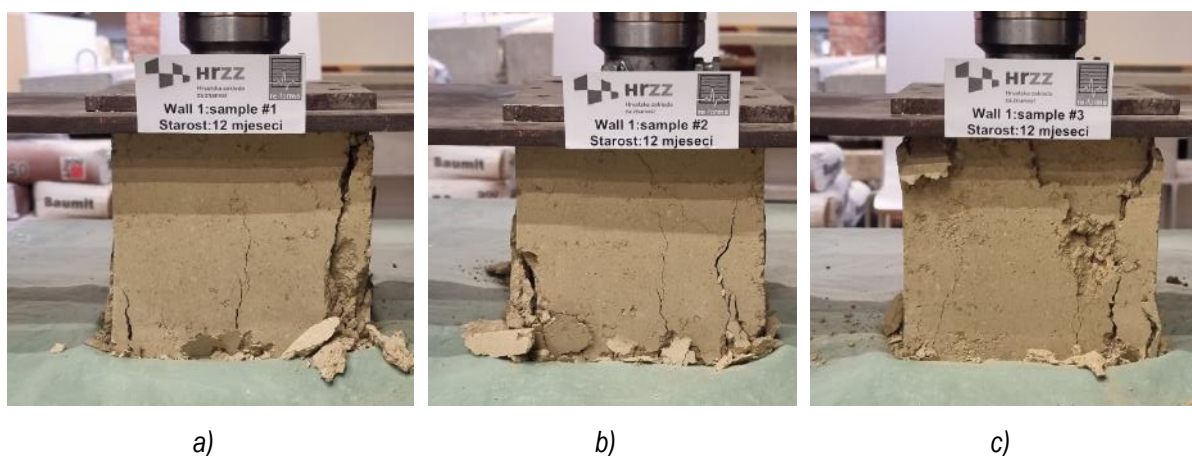
- Calvi, Gian Michele. 1999. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering* 3(3):411–38.
- Ciancio, D.; Beckett, C.T.S.; Carraro, J.A.H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. *Constr. Build. Mater.* 2014, 53, 59–65.
- EI-Nabouch, Ranime i dr. 2016. Seismic Assessment of Rammed Earth Walls Using Pushover Tests. *Procedia Engineering* 145:1185–92.
- EI-Nabouch, Ranime; Bui, Quoc-Bao; Plé, Olivier; Perrotin, Pascal. 2017. Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests. *Engineering Structures* 145:153–61.
- HRN EN ISO 17892-4:2016 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 4: Determination of particle size distribution (ISO 17892-4:2016; EN ISO 17892-4:2016).
- Krahn, T. (2019). RAMMED EARTH CONSTRUCTION the complete step-by-step guide.  
[www.newsociety.com](http://www.newsociety.com)
- Miccoli, Lorenzo; Drougkas, Anastasios; Müller, Urs. 2016. In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. *Engineering Structures* 125:144–52.
- Miccoli, Lorenzo; Müller, Urs; Pospíšil, Stanislav. 2017. Rammed earth walls strengthened with polyester fabric strips: Experimental analysis under in-plane cyclic loading. *Construction and Building Materials* 149:29–36.
- Minke, G, *Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture.* Birkhauser, 2006.
- Perić, Ana; Kraus, Ivan; Kaluđer, Jelena; Kraus, Lucija. 2021. Experimental campaigns on mechanical properties and seismic performance of unstabilized rammed earth—A literature review. *Buildings* 11(8).
- Ramezanpour, M., Eslami, A., & Ronagh, H. (2021). Seismic performance of stabilised/unstabilised rammed earth walls. *Engineering Structures*, 245.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112982>
- Walker, P., Keable, R., Martin, J., & Maniatidis, V. (2005). *Rammed earth : design and construction guidelines.* BRE Bookshop.

## Prilog 1: Ispitivanje materijalnih svojstava od nabijene zemlje na 6 grupa uzoraka – ispitivanje nakon 12 mjeseci

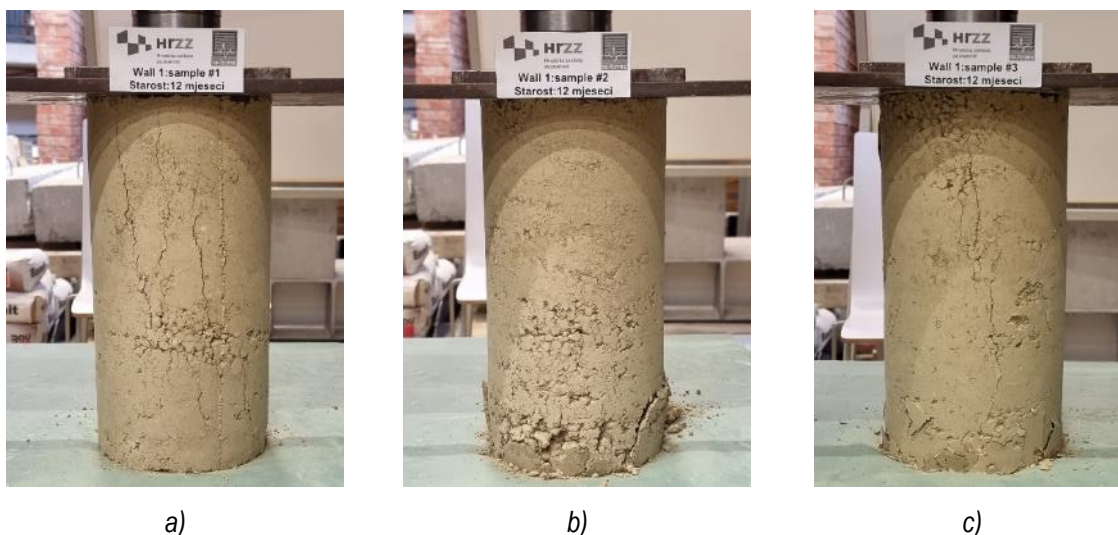
U prethodnom projektnom razdoblju, provedena je izrada šest različitih grupa uzoraka na kojima je provedeno ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava, koja su prikazana u nastavku. Pritom su dvije grupe uzoraka izrađene primjenom materijala kojim su izrađeni zidovi ispitani na djelovanja u ravnini (uzorci W1-W2 te W3-W4). Osim toga, provedena je izrada uzoraka primjenom „recikliranog“ materijala koji je prikupljen nakon ispitivanja zida na djelovanja okomito na ravninu. Konačno, preostale tri grupe uzoraka izrađene su s dodacima vapna (4% masenog udjela) te industrijske konoplje i pšenice između slojeva nabijene zemlje. Uzorci s dodacima (vapno, industrijska konoplja, pšenica) uspoređeni su s referentnom mješavinom (W3-W4). Svi su uzorci ispitani nakon njege u kontroliranim uvjetima ( $25 \pm 2 \text{ C}^\circ$ ,  $50 \pm 5 \text{ \% RH}$ ) tijekom 12 mjeseci. Provedena je usporedba rezultata s rezultatima ispitivanja uzoraka nakon njegovanja tijekom 28 dana, opisanih u prethodnom izvještajnom razdoblju.

### A. Ispitivanje uzoraka W1-W2

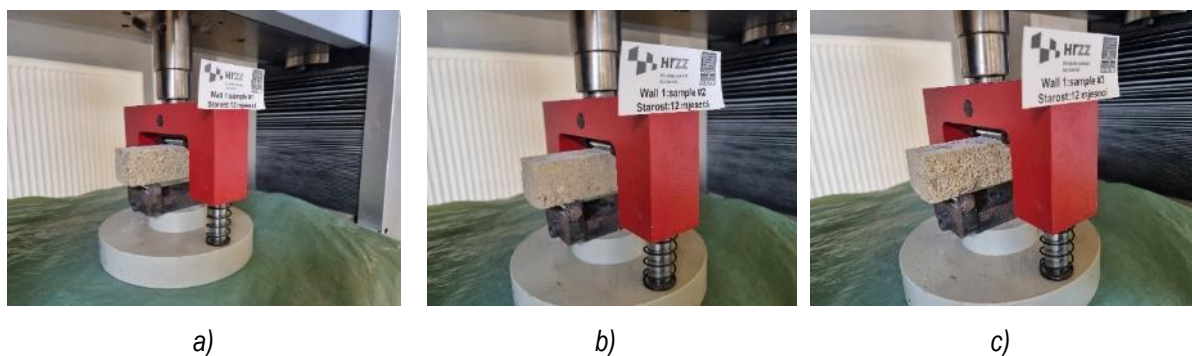
Primjenom materijala od kojega su izgrađeni zidovi W1 i W2 izrađeni su i uzorci za periodičko ispitivanje mehaničkih svojstava. Pritom je ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika A.1) i tri uzorka valjka (slika A.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika A.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika A.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



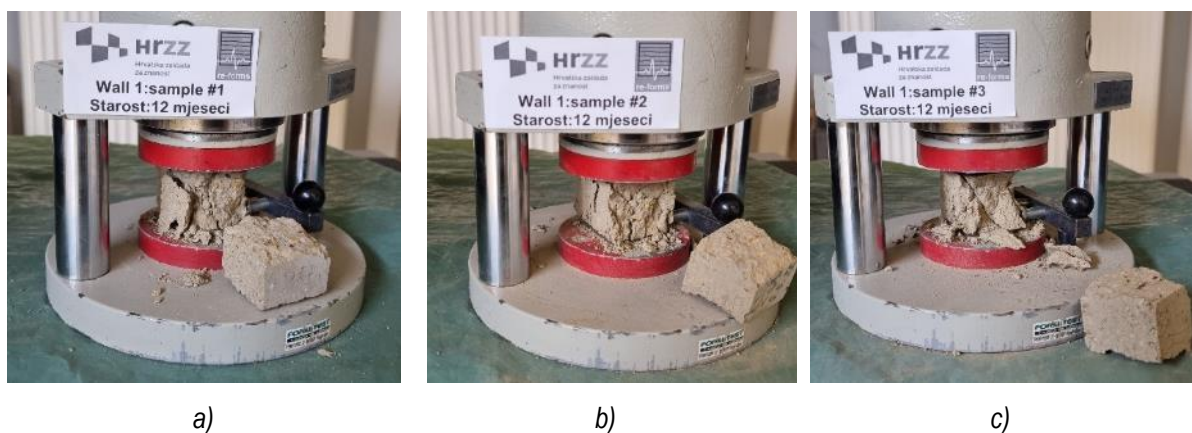
Slika A.33 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W1-W2



Slika A.34 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - W1-W2

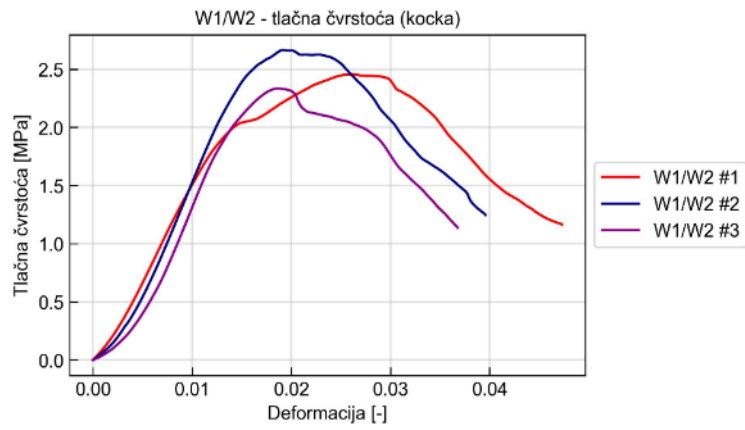


Slika A.35 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - W1-W2

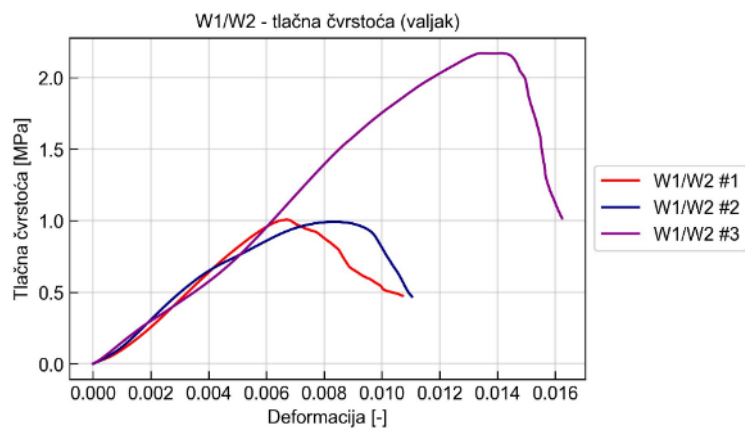


Slika A.36 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - W1-W2

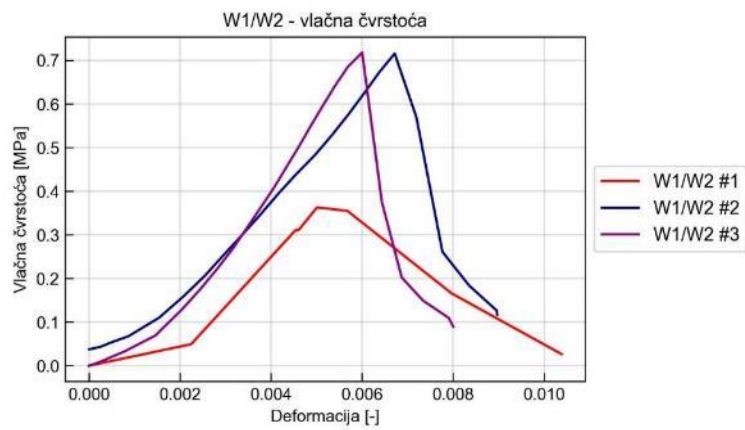
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama A.5 i A.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama A.7 (vlačna čvrstoća) i A.8 (tlačna čvrstoća). U tablici A.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici A.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika A.37 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W1-W2

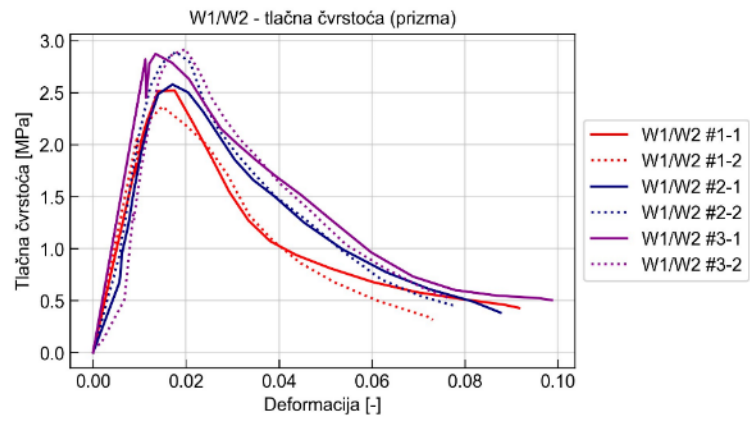


Slika A.38 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W1-W2



Slika A.39 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W1-W2





Slika A.40 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – W1-W2

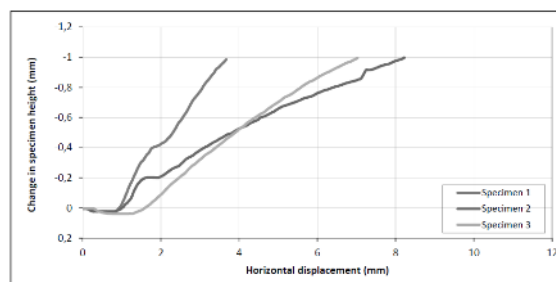
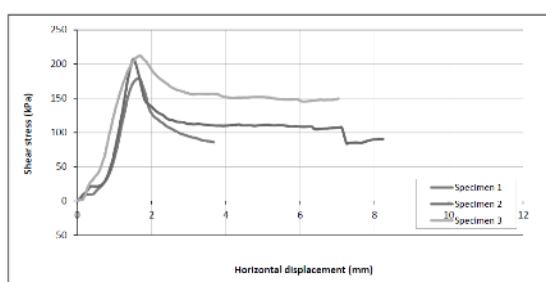
Tablica A.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W1-W2

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,46	2,66	2,34
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		2,49	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,01	0,99	2,17
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,39	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,44	0,72	0,76
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		0,64	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,52 2,37	2,58 2,89	2,87 2,92
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,44	2,74	2,90
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	135,41	124,39	100,09
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		119,96	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	133,59	152,64	145,14
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		143,79	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	207,50	147,66	182,89
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		179,35	

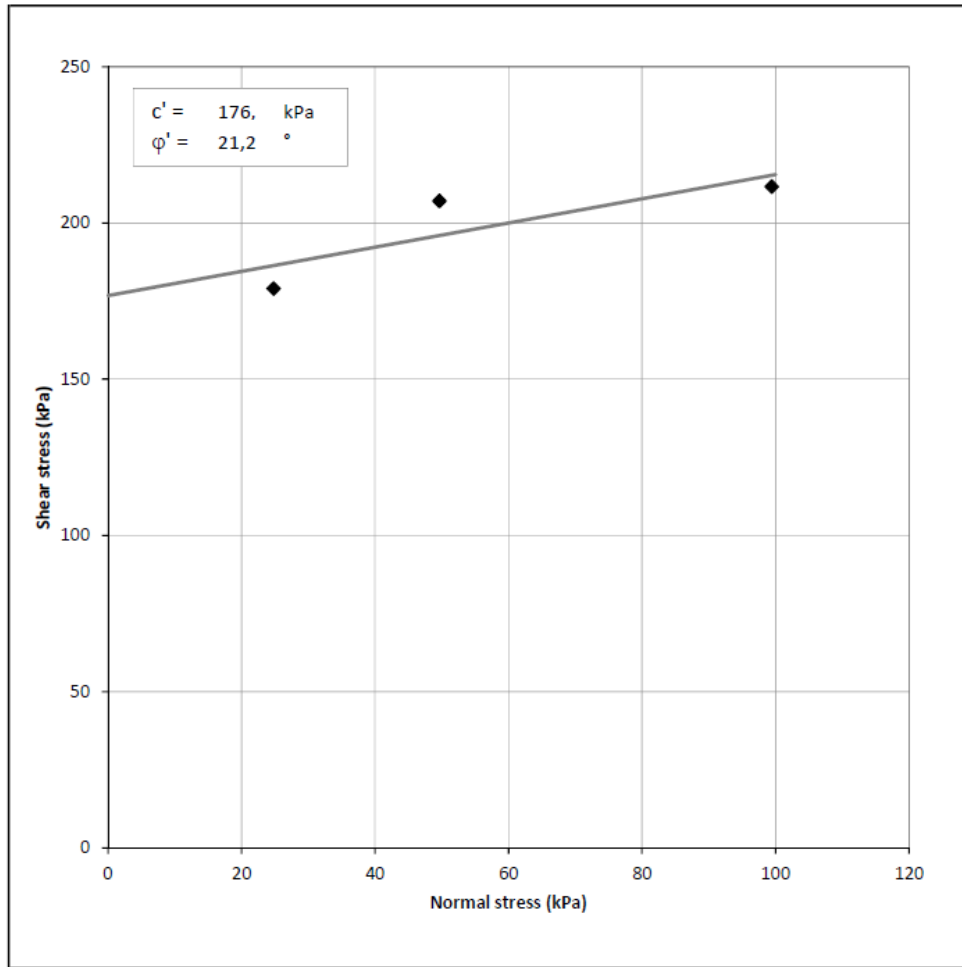
Tablica A.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W1-W2

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,09	2,04	2,01
Prosječna vlažnost (%)		2,05	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,07	2,03	2,09
Prosječna vlažnost (%)		2,13	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,68	1,80	1,72
Prosječna vlažnost (%)		1,74	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama A.9 i A.10.



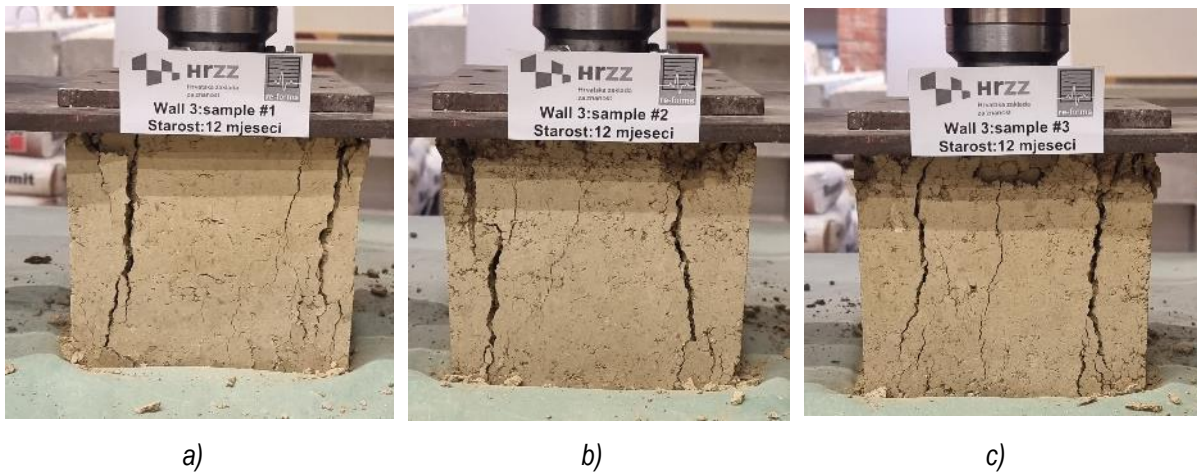
Slika A.41 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W1/W2: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)



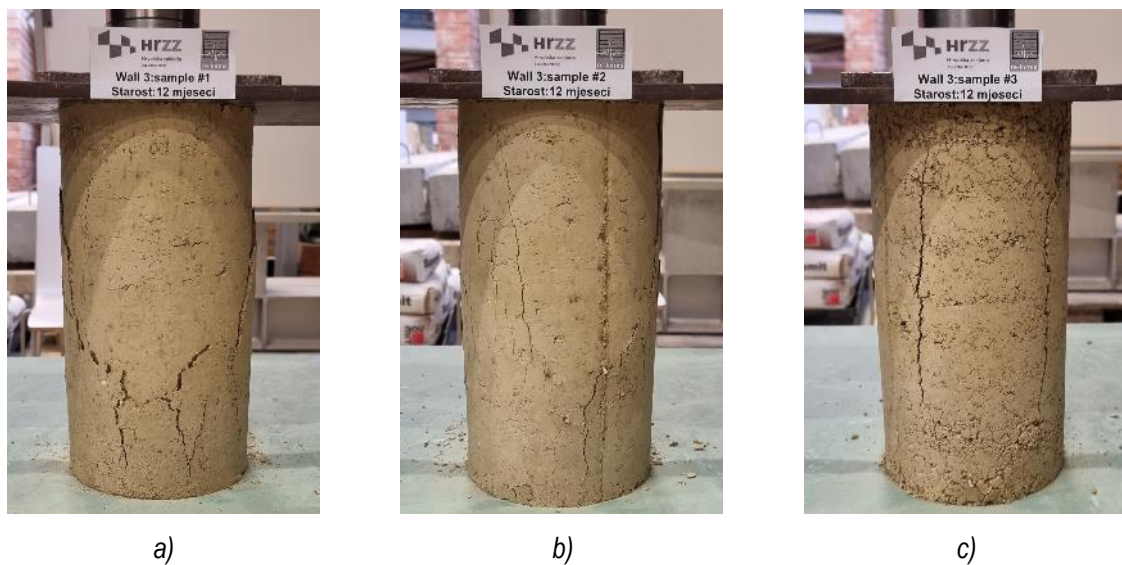
Slika A.42 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W1/W2: kut unutarnjeg trenja i kohezija

## B. Ispitivanje uzoraka W3/W4

Primjenom materijala od kojega su izgrađeni zidovi W3 i W4 izrađeni su i uzorci za periodičko ispitivanje mehaničkih svojstava. Pritom je ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika B.1) i tri uzorka valjka (slika B.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika B.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika B.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



Slika B.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W3/W4



Slika B.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - W3/W4





a)

b)

c)

Slika B.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - W3/W4



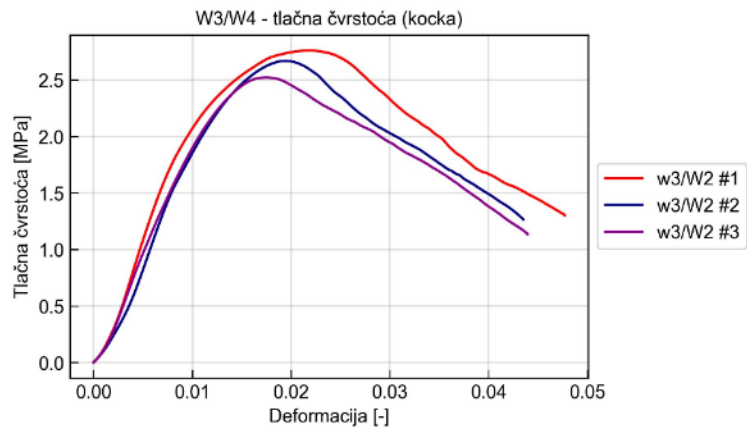
a)

b)

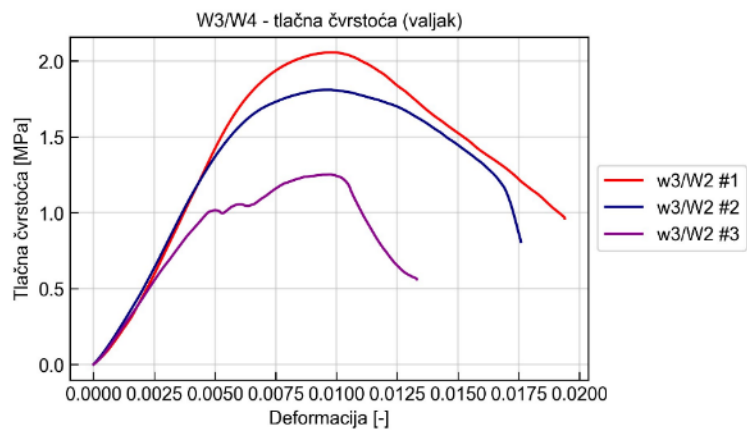
c)

Slika B.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - W3/W4

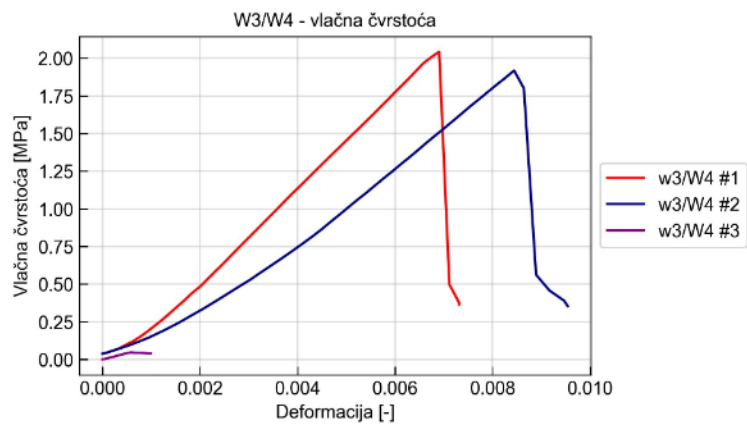
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama B.5 i B.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama B.7 (vlačna čvrstoća) i B.8 (tlačna čvrstoća). U tablici B.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici B.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



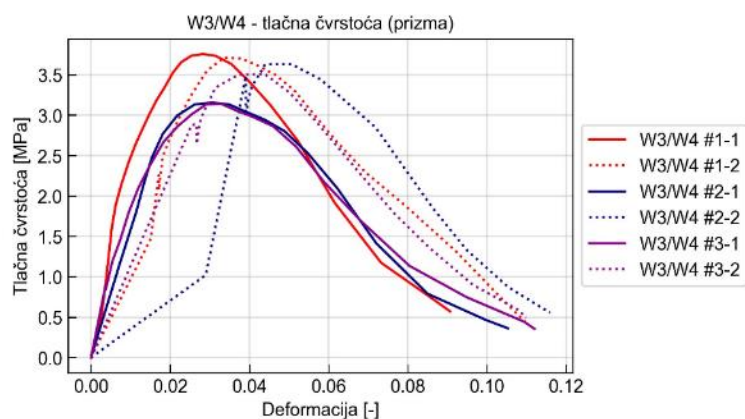
Slika B.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W3/W4



Slika B.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W3/W4



Slika B.7 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W3/W4



Slika B.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – W3/W4

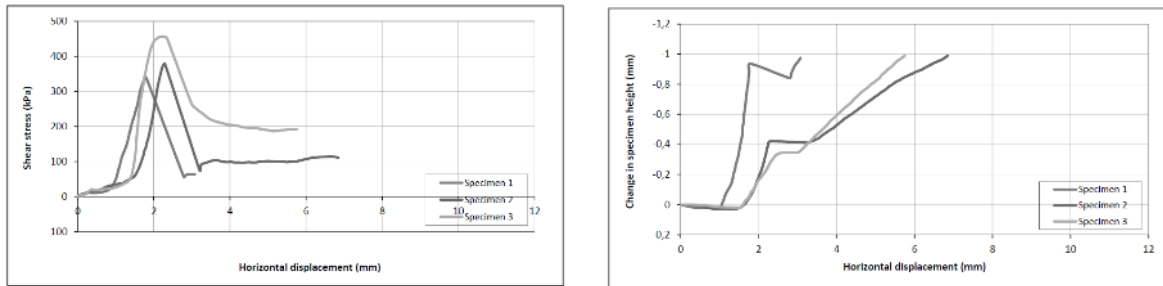
Tablica B.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W3/W4

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,76	2,67	2,52
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		2,65	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,06	1,81	1,25
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,71	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,04	1,92	0,05
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,34	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,76 3,71	3,15 3,63	3,14 3,51
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,73	3,39	3,33
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	202,87	162,23	186,02
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		183,70	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	240,21	246,47	212,18
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		232,95	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	184,12	98,63	169,24
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		150,66	

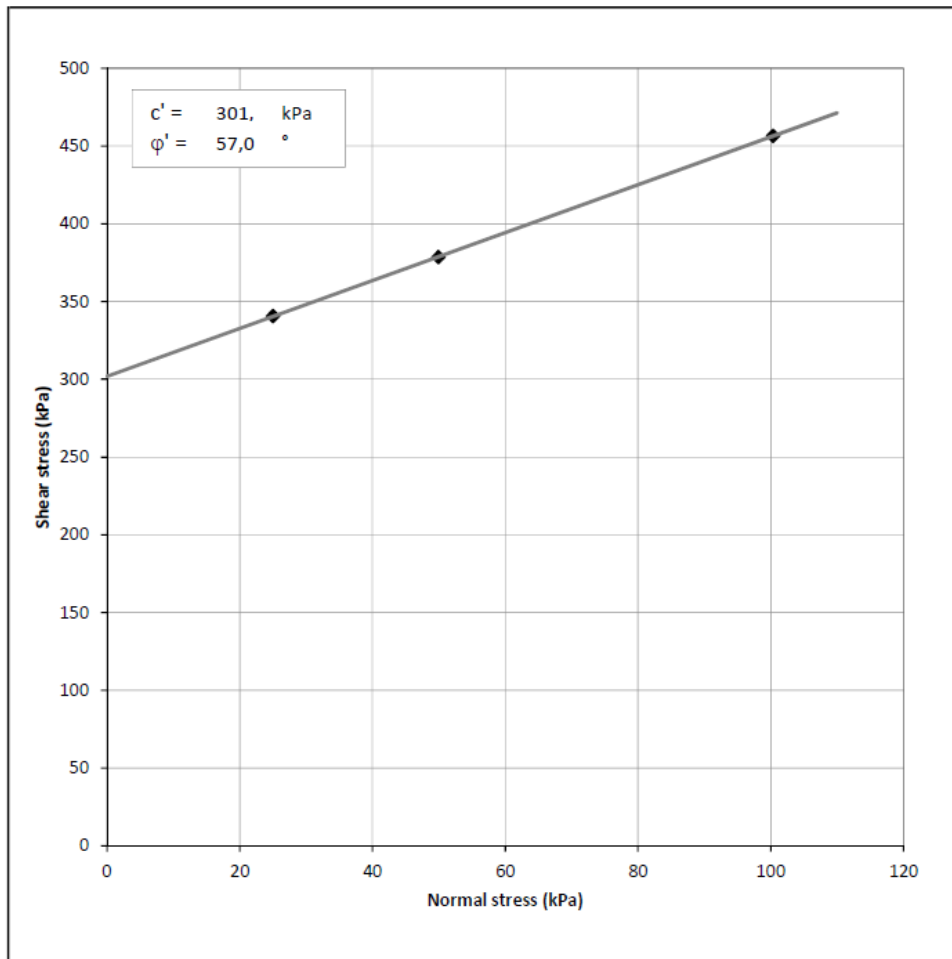
Tablica B.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W3/W4

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,12	2,12	2,20
Prosječna vlažnost (%)		2,15	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	1,93	1,95	2,03
Prosječna vlažnost (%)		1,97	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,66	1,67	1,76
Prosječna vlažnost (%)		1,70	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama B.9 i B.10.



Slika B.9 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W3/W4: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)

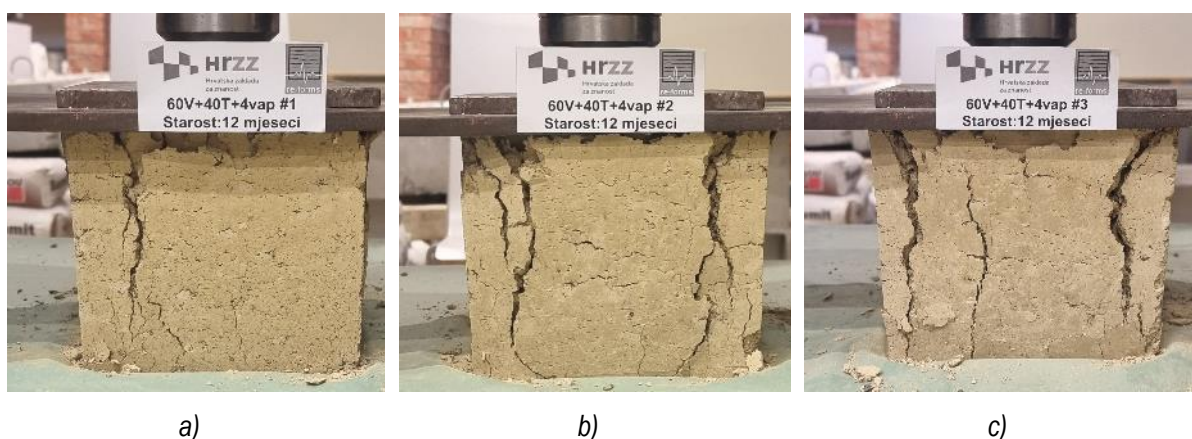


Slika B.43 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W3/W4: kut unutarnjeg trenja i kohezija

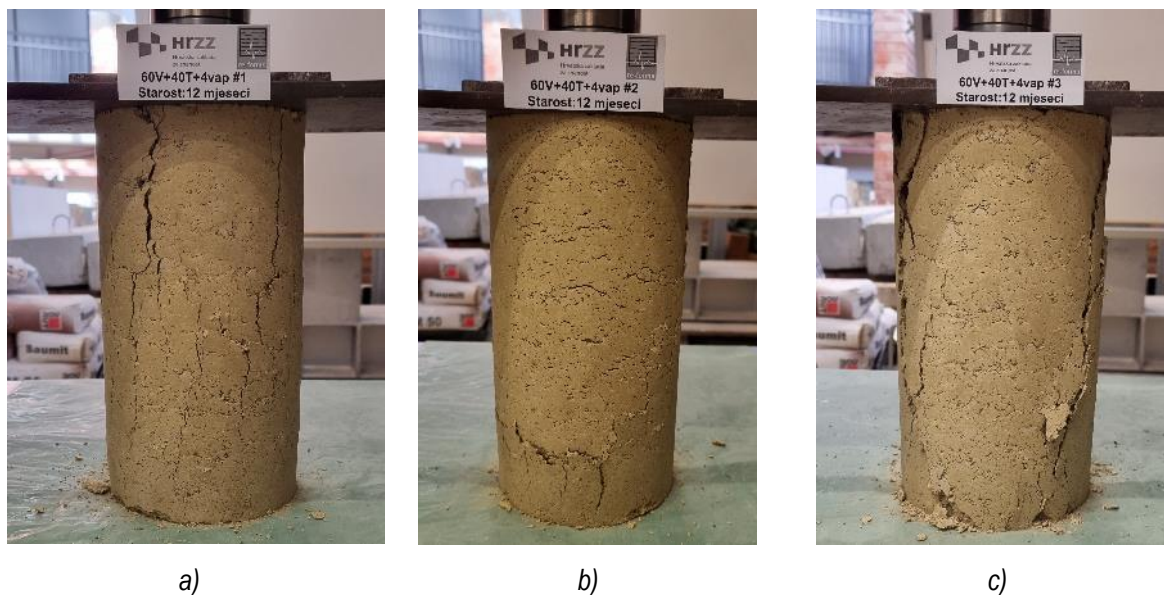


## C. Ispitivanje uzoraka s vapnom

Kako bi se provjerio utjecaj dodatka vapna u mješavinu, izrađeni su uzorci sa dodatkom vapna u masenom udjelu od 4 %, prema preporuci u literaturi (Ciancio i dr., 2014.). Pritom je kao referentna mješavina odabrana mješavina od koje su izrađeni zidovi W3 i W4, u sastavu 60 % zemljanog materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika C.1) i tri uzorka valjka (slika C.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika C.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika C.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



Slika C.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + 4 % vapno



Slika C.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + 4 % vapno





a)

b)

c)

Slika C.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - 60/40 + 4 % vapno



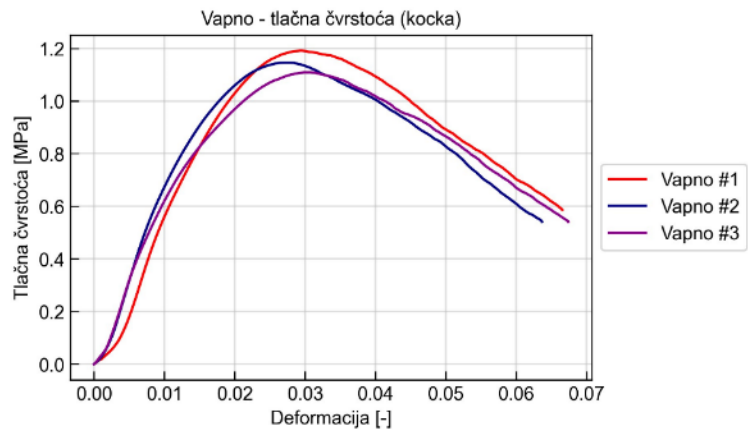
a)

b)

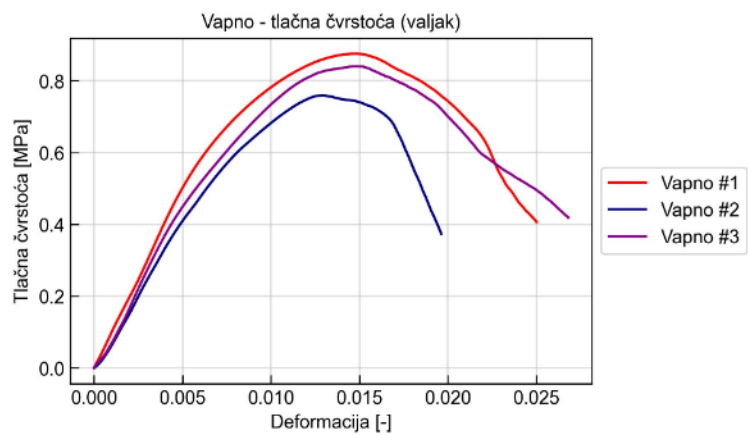
c)

Slika C.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - 60/40 + 4 % vapno

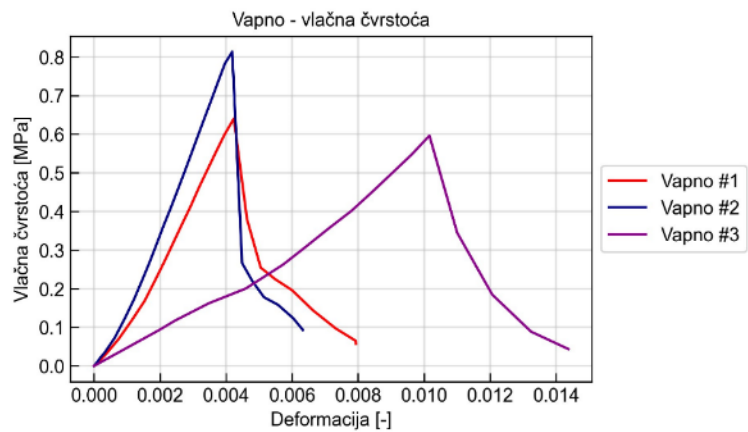
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama C.5 i C.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama C.7 (vlačna čvrstoća) i C.8 (tlačna čvrstoća). U tablici C.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzorka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici C.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



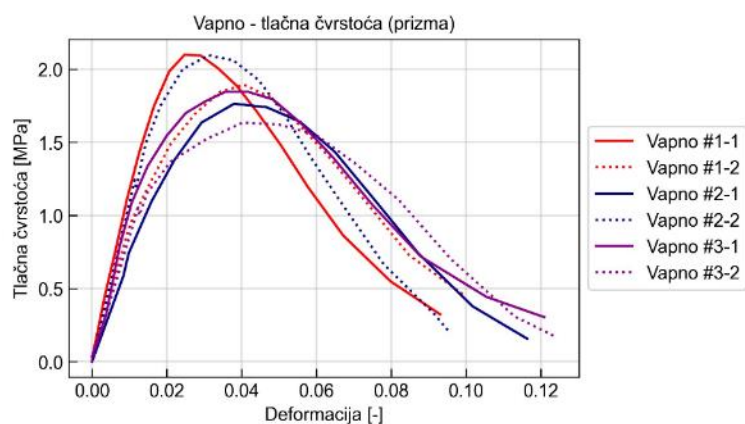
Slika C.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + 4 % vapno



Slika C.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + 4 % vapno



Slika C.7 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – 60/40 + 4 % vapno



Slika C.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – 60/40 + 4 % vapno

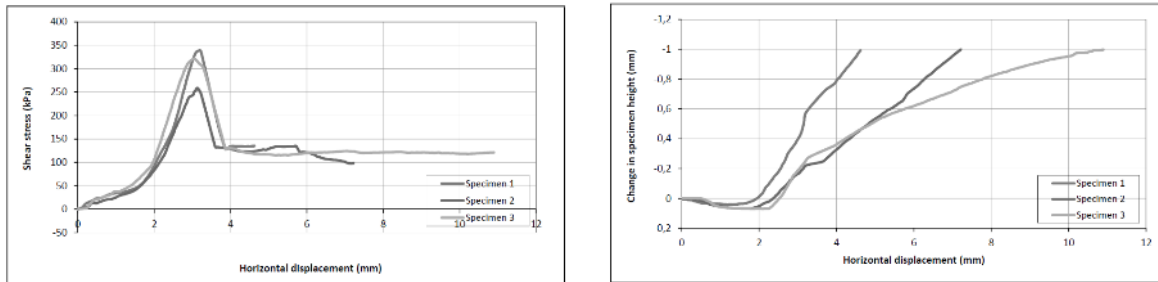
Tablica C.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – 60/40 + 4 % vapno

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,19	1,15	1,11
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,15	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,88	0,76	0,84
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		0,83	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,64	0,81	0,60
Srednja vlačna čvrstoća – prizma (MPa)		0,68	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,10 1,89	1,76 2,09	1,85 1,64
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	2,00	1,93	1,74
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	64,75	64,36	98,70
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		75,94	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	98,80	81,33	89,93
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		89,399	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	108,88	89,31	92,44
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		96,88	

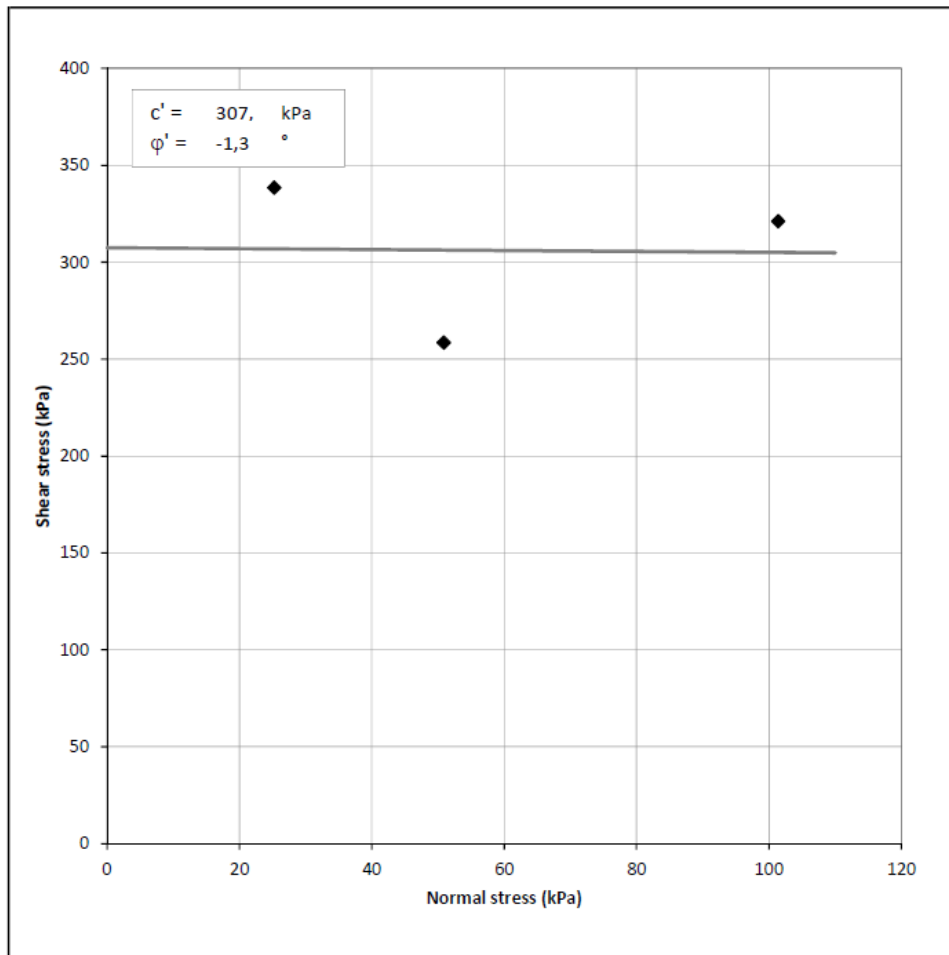
Tablica C.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - 60/40 + 4 % vapno

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	1,95	1,63	1,71
Prosječna vlažnost (%)		1,76	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	1,78	1,57	1,67
Prosječna vlažnost (%)		1,67	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,25	1,50	1,21
Prosječna vlažnost (%)		1,32	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama C.9 i C.10.



Slika C.9 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + 4 % vapno: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)



Slika C.44 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + 4 % vapno: kut unutarnjeg trenja i kohezija



## D. Ispitivanje uzoraka s industrijskom konopljom

Kako bi se provjerio utjecaj dodatka industrijske konoplje, izrađeni su uzorci sa dodatkom industrijske konoplje između slojeva nabijene zemlje. Pritom je kao referentna mješavina odabrana mješavina od koje su izrađeni zidovi W3 i W4, u sastavu 60 % zemljanog materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika D.1) i tri uzorka valjka (slika D.2). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog poteškoća pri izradi uzoraka prizama s dodatkom konoplje između slojeva, uzrokovana malim dimenzijama uzoraka.



a)

b)

c)

Slika D.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + industrijska konoplja



a)

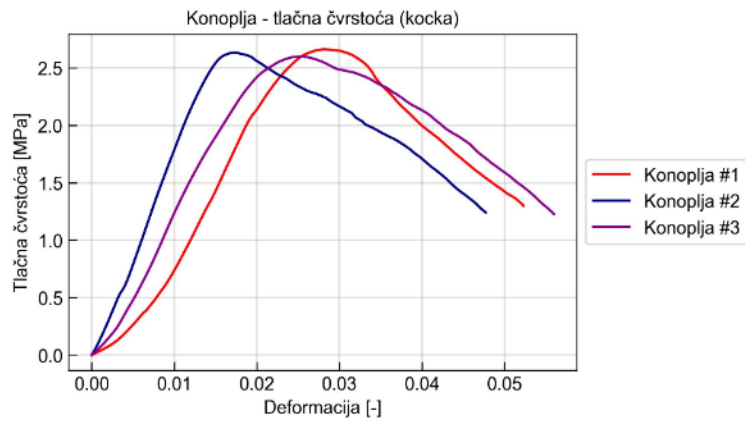
b)

c)

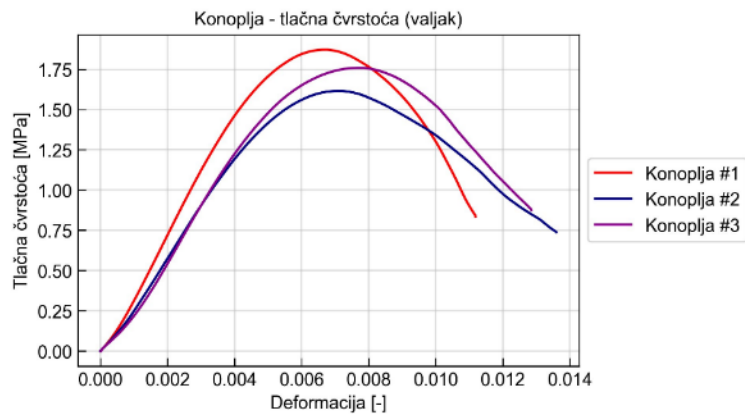
Slika D.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + industrijska konoplja

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama D.3 i D.4. U tablici D.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici D.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.





Slika D.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + industrijska konoplja



Slika D.4 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + industrijska konoplja

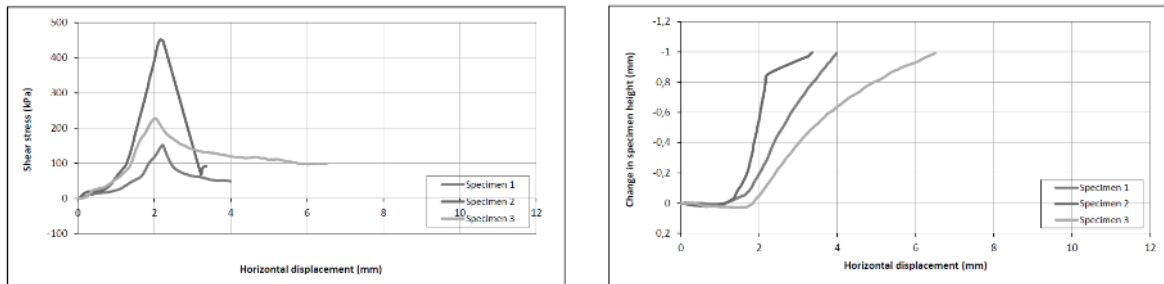
Tablica D.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – 60/40 + industrijska konoplja

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,66	2,63	2,60
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		2,63	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,87	1,62	1,76
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,75	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	76,17	156,82	108,63
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		113,88	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	347,83	279,09	268,73
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		298,55	

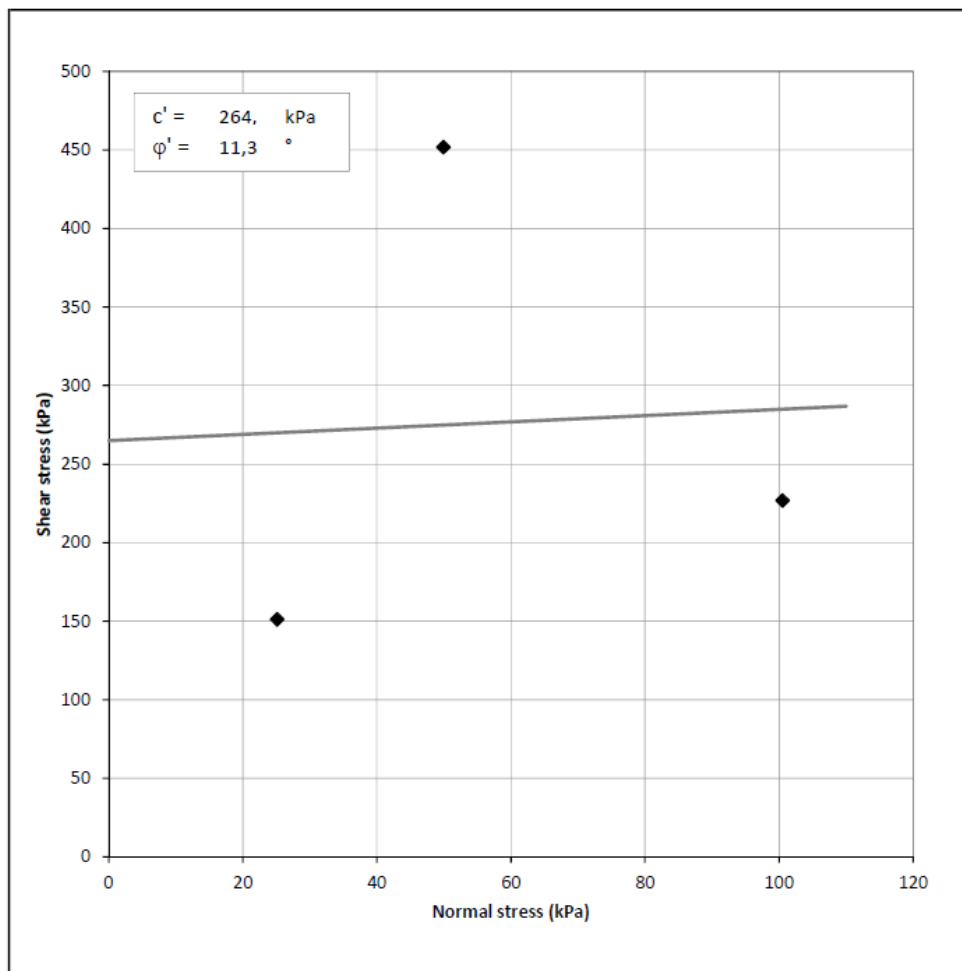
Tablica D.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - 60/40 + industrijska konoplja

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	1,96	1,95	1,99
Prosječna vlažnost (%)		1,96	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,06	1,84	1,90
Prosječna vlažnost (%)		1,93	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama D.9 i D.10.



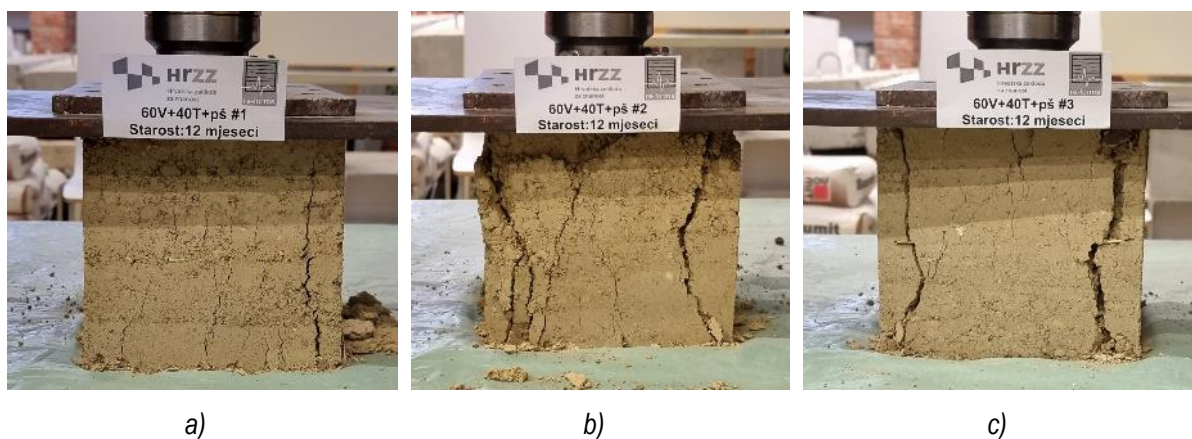
Slika D.9 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + industrijska konoplja: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)



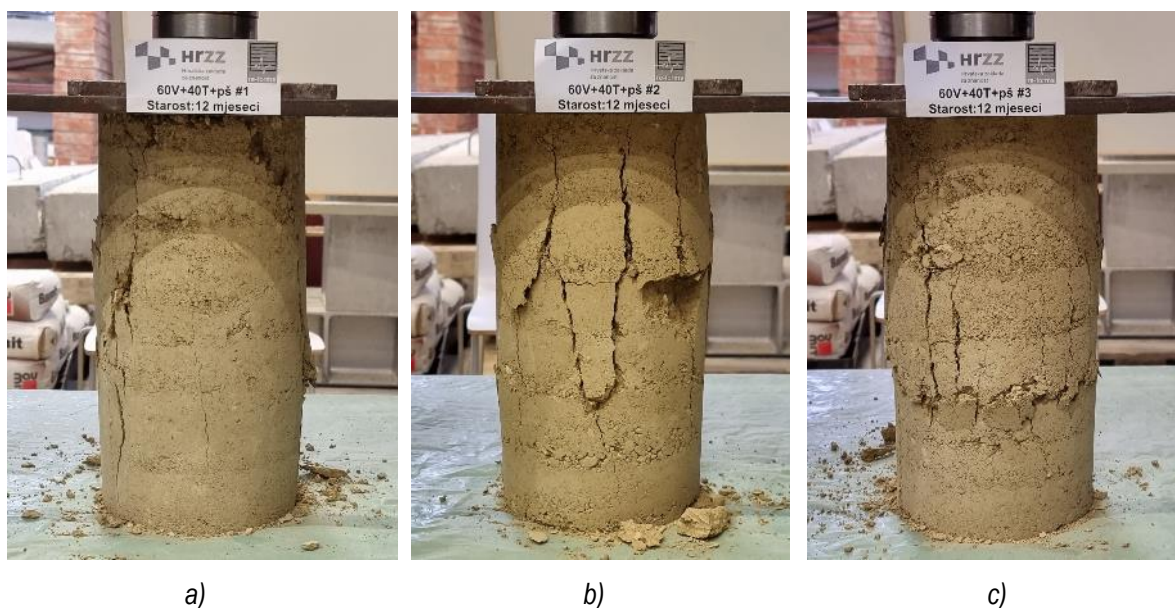
Slika D.45 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + industrijska konoplja: kut unutarnjeg trenja i kohezija

## E. Ispitivanje uzoraka s pšenicom

Kako bi se provjerio utjecaj dodatka pšenice, izrađeni su uzorci sa dodatkom pšenice između slojeva nabijene zemlje. Pritom je kao referentna mješavina odabrana mješavina od koje su izrađeni zidovi W3 i W4, u sastavu 60 % zemljanog materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika E.1) i tri uzorka valjka (slika E.2). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog poteškoća pri izradi uzoraka prizama s dodatkom industrijske konoplje između slojeva, uzrokovana malim dimenzijama uzoraka.

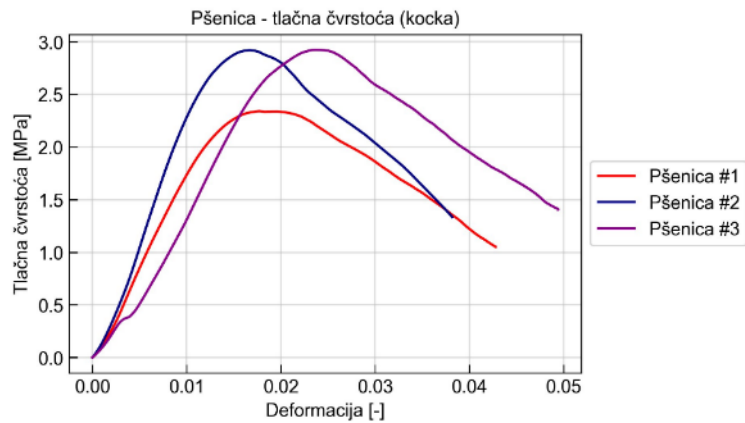


Slika E.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + pšenica

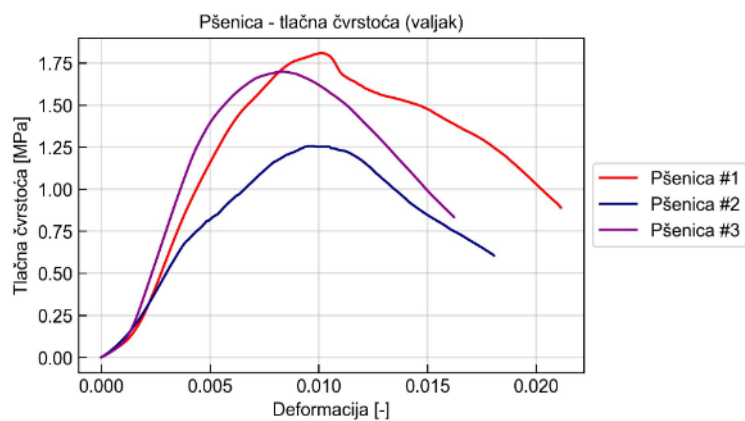


Slika E.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + pšenica

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama E.3 i E.4. U tablici E.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici E.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika E.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – 60/40 + pšenica



Slika E.4 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – 60/40 + pšenica

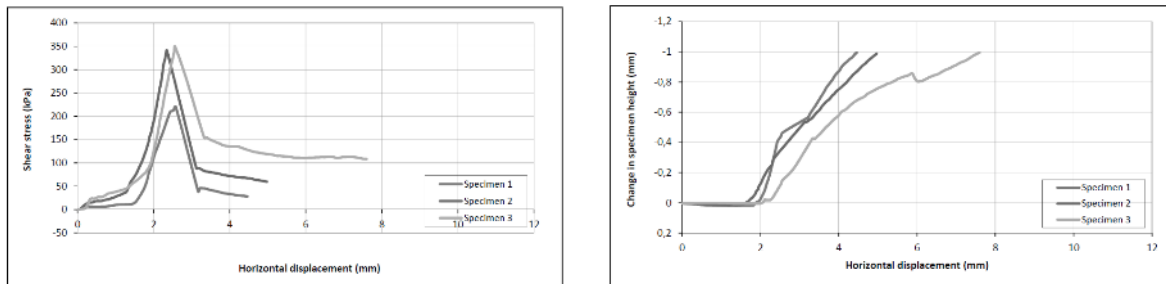
Tablica E.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – 60/40 + pšenica

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,34	2,92	2,92
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		2,73	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,81	1,26	1,70
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,59	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	163,99	198,29	118,52
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		160,27	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	188,89	153,99	217,11
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		186,66	

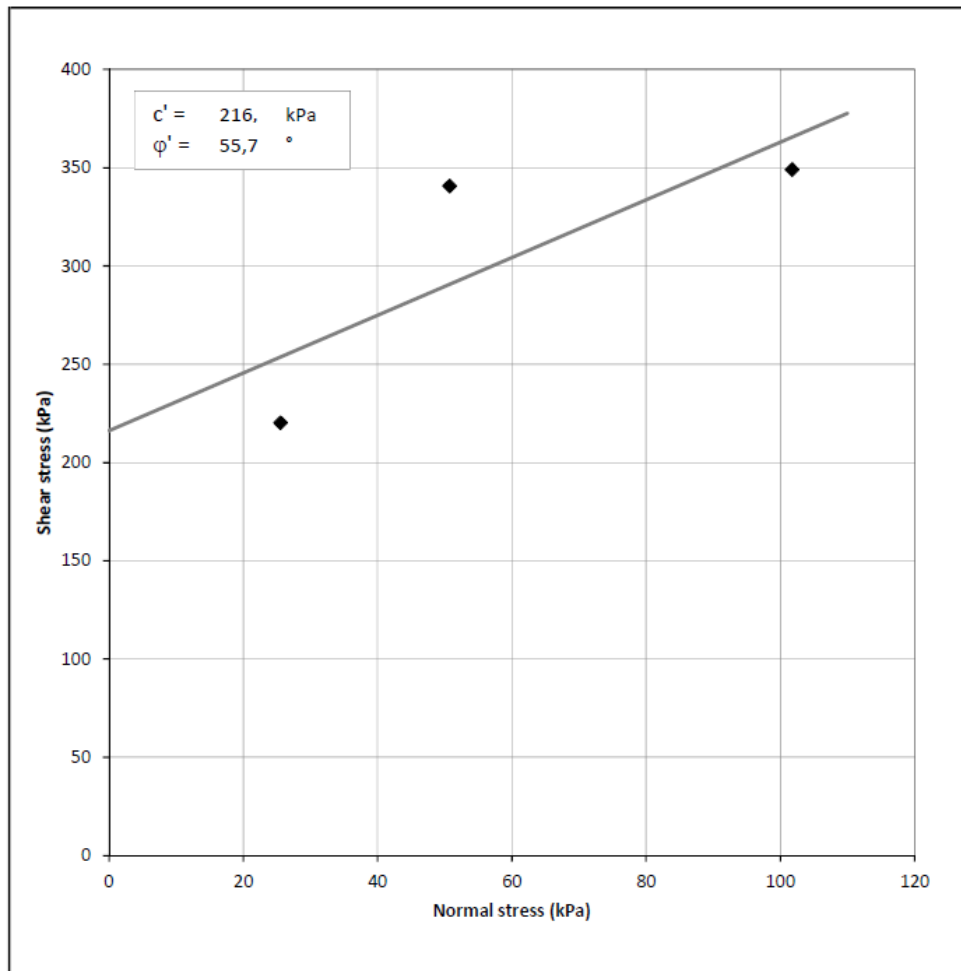
Tablica E.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - 60/40 + pšenica

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	1,87	1,97	1,86
Prosječna vlažnost (%)		1,90	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,08	2,06	2,05
Prosječna vlažnost (%)		2,06	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama E.5 i E.6.



Slika E.5 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + pšenica: promjena posmičnog napreznja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog napreznja (desno)

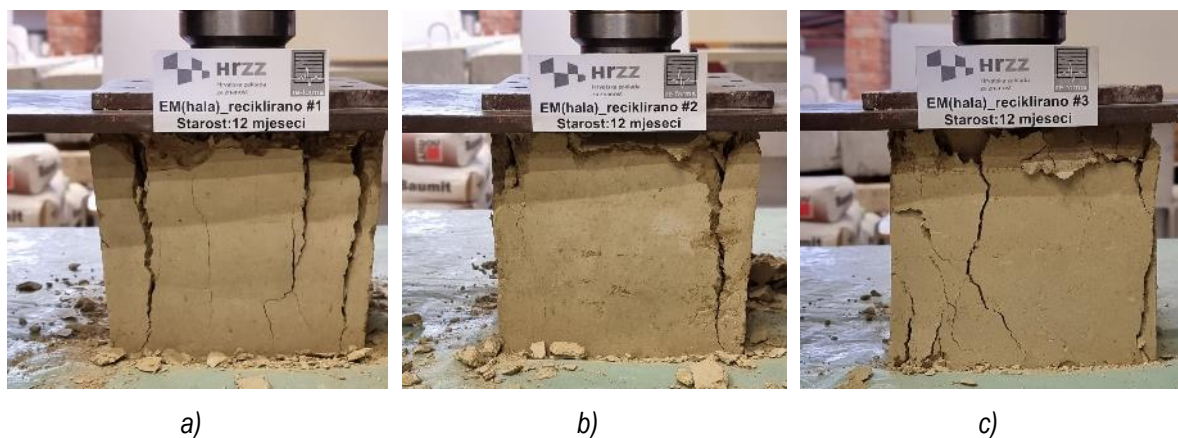


Slika E.6 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – 60/40 + pšenica: kut unutarnjeg trenja i kohezija

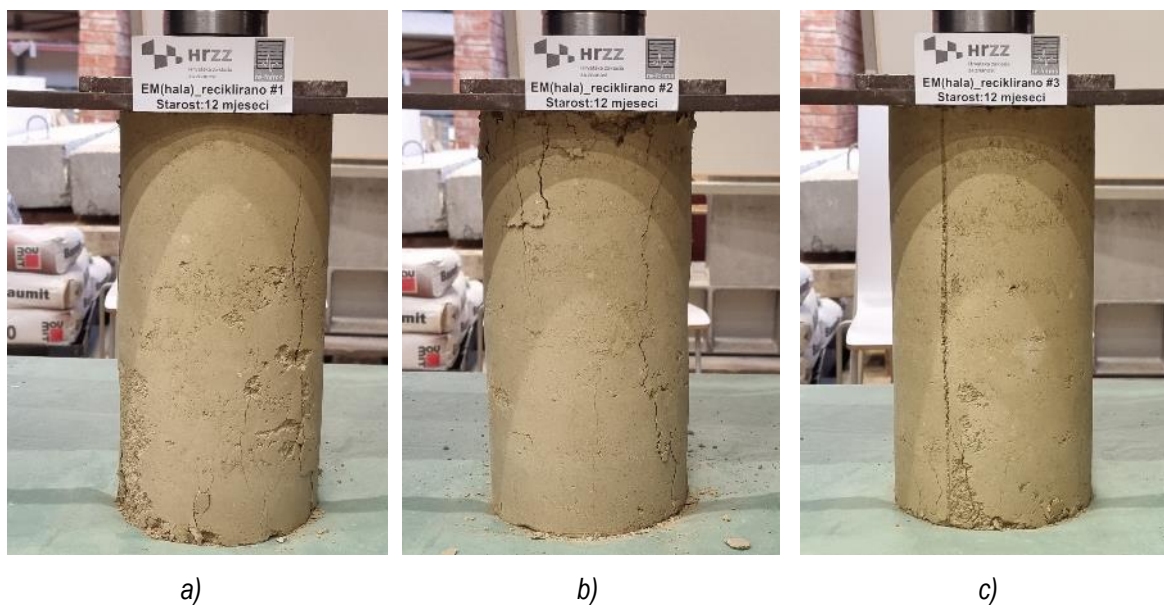


## F. Ispitivanje uzoraka s recikliranim materijalom

Kako bi se provjerio utjecaj recikliranja materijala na mehanička svojstva nabijene zemlje, izrađeni su uzorci primjenom materijala od kojega je izrađen zid za ispitivanje zrakopropusnosti u prethodnom razdoblju projekta. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika F.1) i tri uzorka valjka (slika F.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika F.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika F.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



Slika F.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – reciklirani materijal



Slika F.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – reciklirani materijal

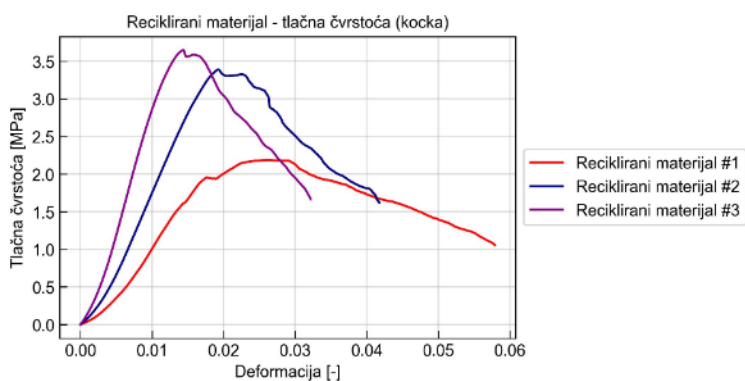


a) b) c)  
 Slika F.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - reciklirani materijal

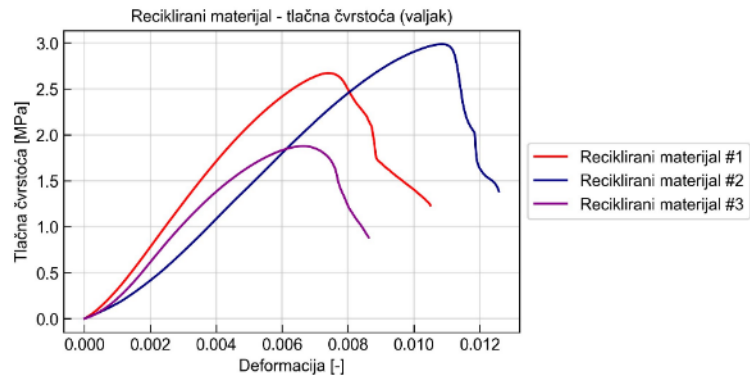


a) b) c)  
 Slika F.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - reciklirani materijal

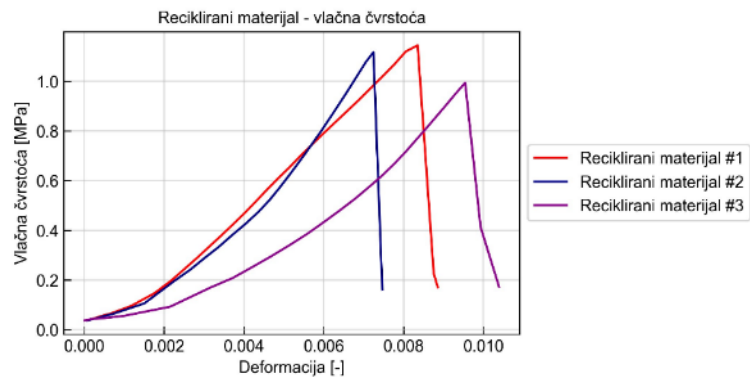
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama F.5 i F.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama F.7 (vlačna čvrstoća) i F.8 (tlačna čvrstoća). U tablici F.1 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici F.2 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



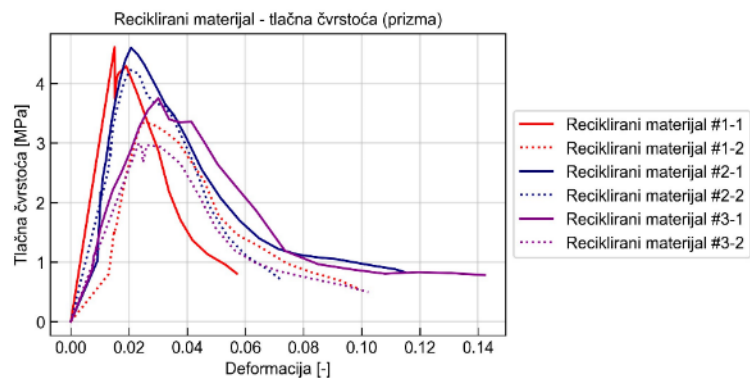
Slika F.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – reciklirani materijal



Slika F.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – reciklirani materijal



Slika F.7 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – reciklirani materijal



Slika F.8 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – reciklirani materijal

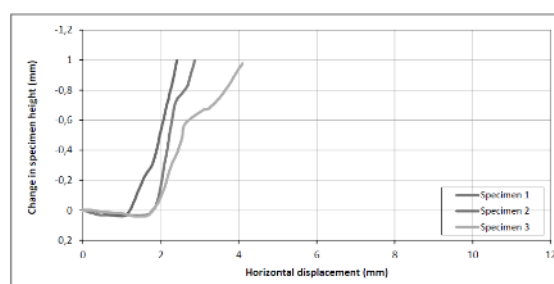
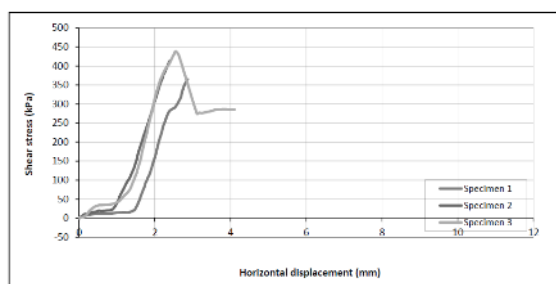
Tablica F.1 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – reciklirani materijal

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,19	3,39	3,65
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		3,08	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,67	2,99	1,88
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		2,51	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,14	1,12	0,99
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,09	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	4,61	3,34	4,60
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,97	4,41	3,38
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	86,61	152,16	231,37
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		156,71	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	391,24	257,61	299,64
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		316,17	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	190,47	171,74	133,69
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		165,30	

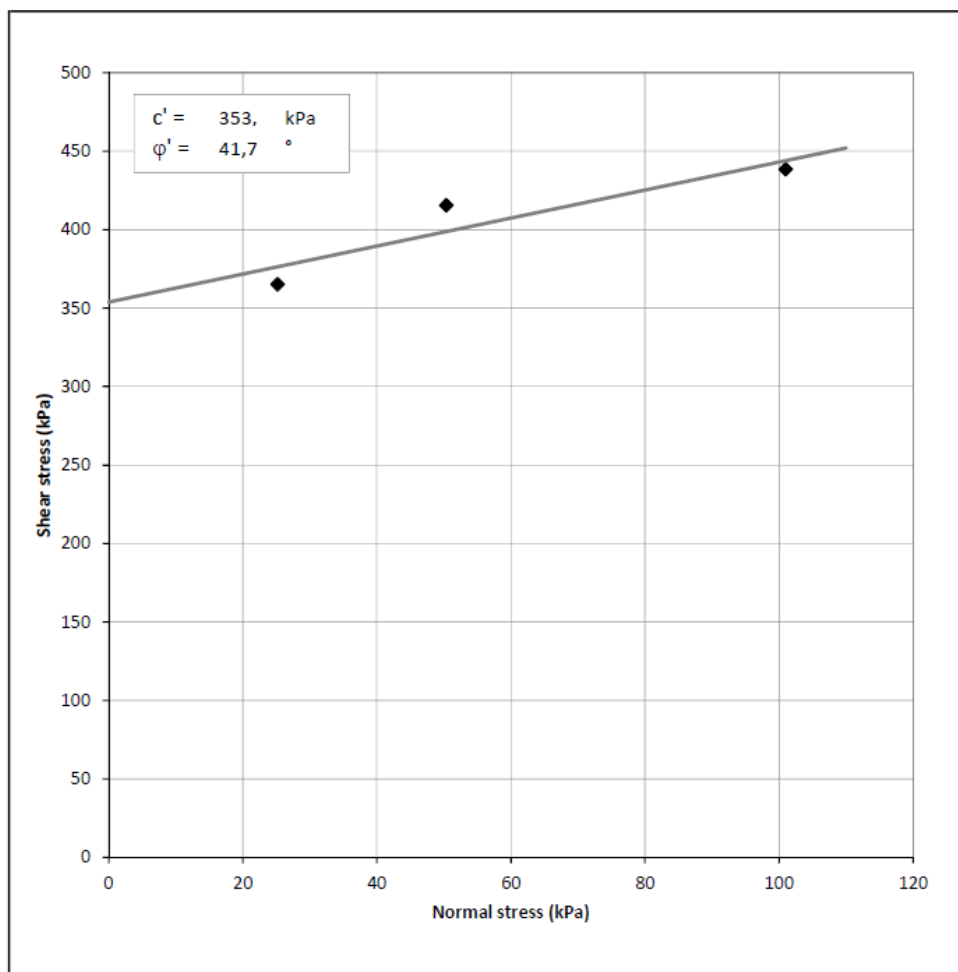
Tablica F.2 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – reciklirani materijal

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,07	2,03	2,14
Prosječna vlažnost (%)		2,08	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	1,94	2,02	1,90
Prosječna vlažnost (%)		1,95	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,80	1,72	1,82
Prosječna vlažnost (%)		1,78	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na pločicama dimenzija 100x100 mm grafički su prikazani na slikama F.9 i F.10.



Slika F.9 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – reciklirani materijal: promjena posmičnog naprezanja s horizontalnim pomakom (lijevo), promjena visine uzorka s promjenom horizontalnog naprezanja (desno)

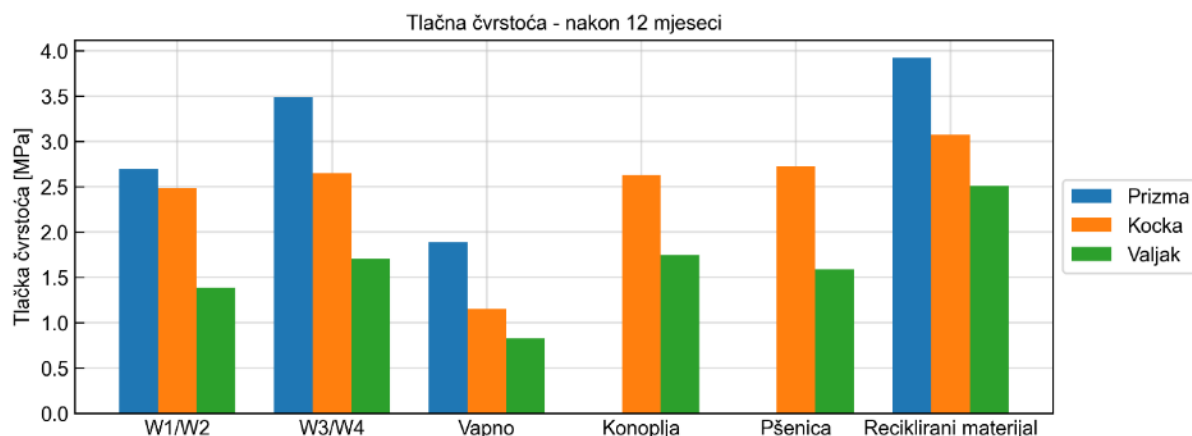


Slika F.10 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – reciklirani materijal: kut unutarnjeg trenja i kohezija

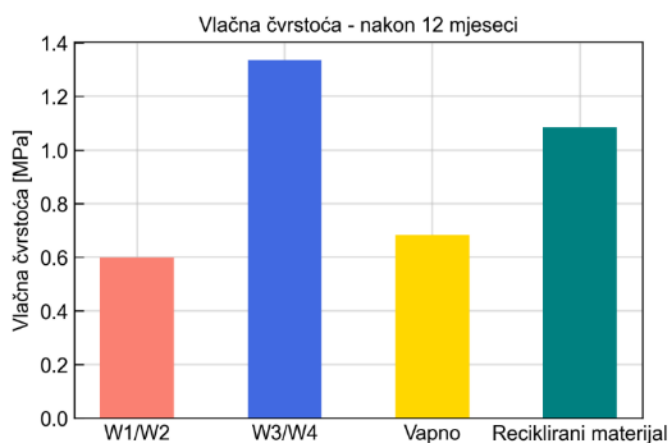
## G. Usporedba rezultata ispitivanja zemljanih mješavina

Usporedbom rezultata svih 6 ispitanih mješavina nakon starosti od 12 mjeseci, uočeno je da uzorci izrađeni od „recikliranog“ materijala koji je prethodno zbijan u prosjeku pokazuju najveće vrijednosti tlačne čvrstoće (slika G.1). Druga grupa uzoraka izrađena od materijala rabljenog za izradu zidova W3 i W4 pokazuje najveće vrijednosti vlačne čvrstoće (slika G.2). Materijal od kojega je izrađen zid W1 i W2 pokazuje u prosjeku najslabije vrijednosti vlačne, dok uzorci s dodatkom vapna daju najmanje vrijednosti tlačne čvrstoće. Osim toga, vidljiv je utjecaj oblika/veličine uzorka na rezultat tlačne čvrstoće: za svaku je grupu najveća tlačna čvrstoća uočena na uzorcima prizme (najmanji uzorak), dok je najmanja tlačna čvrstoća zabilježena na uzorcima valjka (najveći uzorak).



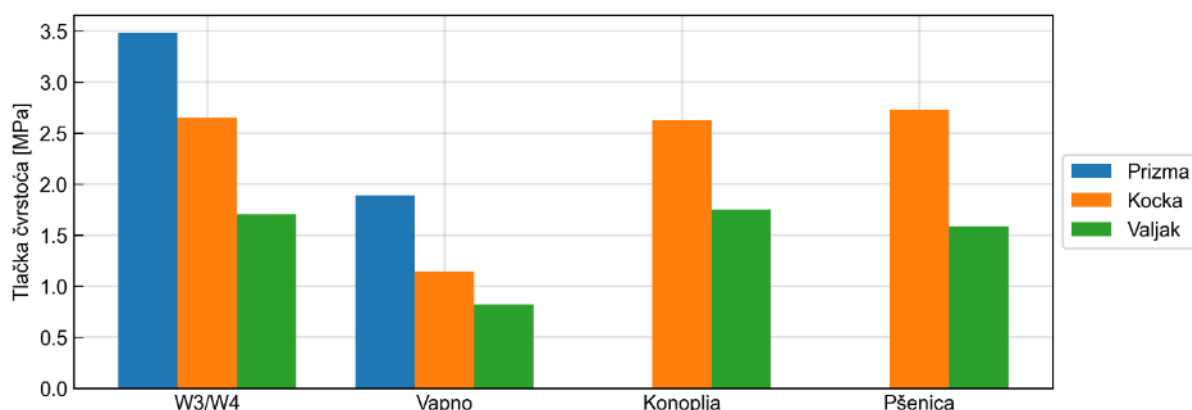


Slika G.1 Prosječna tlačna čvrstoća svih grupa uzoraka



Slika G.2 Prosječna vlačna čvrstoća svih grupa uzoraka

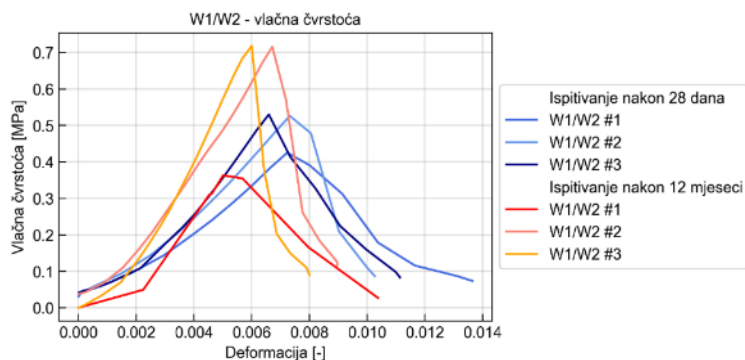
Mješavina oznake W3/W4 je referentna za mješavine s dodatkom vapna, industrijske konoplje i pšenice budući da je osnovni sastav isti (60% tla + 40% dravske sipine). Uočeno je opadanje tlačne čvrstoće uz dodatak 4% vapna (slika G.3). Međutim, tlačna čvrstoća



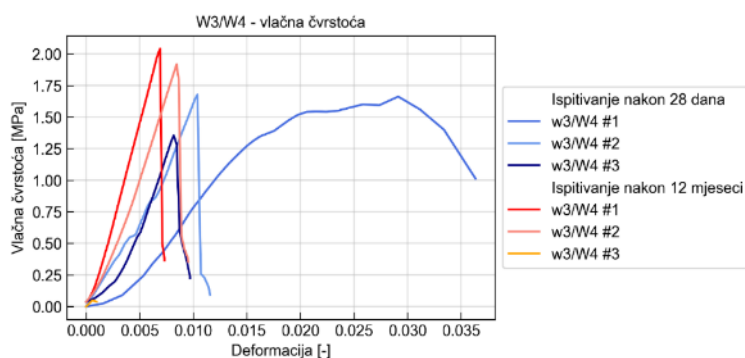
Slika G.3 Usporedba tlačne čvrstoće

U prethodnom razdoblju projekta ispitani su uzorci nakon sušenja tijekom 28 dana. Druga grupa istih uzoraka sušena je tijekom 12 mjeseci te je ispitana u ovom razdoblju projekta (slike G.1 i G.2).

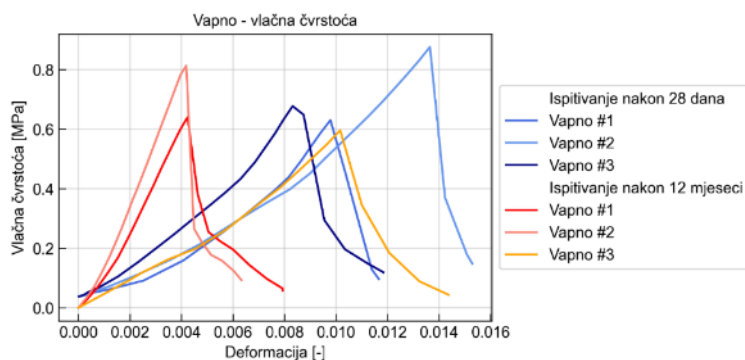
Na slikama G.4 – G.7 prikazani su radni dijagrami vlačne čvrstoće određene na uzorcima od nabijene zemlje. Pritom su nijansama plave boje označene krivulje uzoraka ispitanih nakon 28 dana, a nijansama crvene i narančaste boje krivulje uzoraka ispitanih nakon 12 mjeseci. Osim toga, na slici G.8 prikazan je stupčasti dijagram prosječnih vrijednosti vlačne čvrstoće. Kod uzoraka izrađenih mješavinama iz zidova W1/W2 i W3/W4 nije zabilježena značajna razlika ni u iznosu vlačne čvrstoće, a ni u krutosti (nagibu radnog dijagrama). Međutim, na uzorcima izrađenih s dodacima vapna i uzorcima od recikliranog materijala je zabilježena veća krutost uzoraka nakon 12 mjeseci, ali je prosječna vrijednost vlačne čvrstoće približno jednaka.



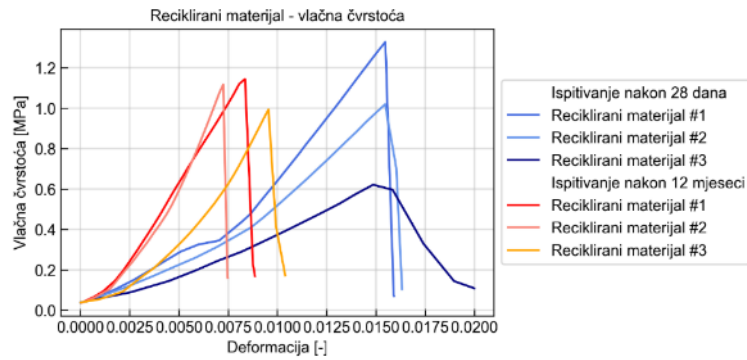
Slika G.4 Usporedba vlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – W1/W2



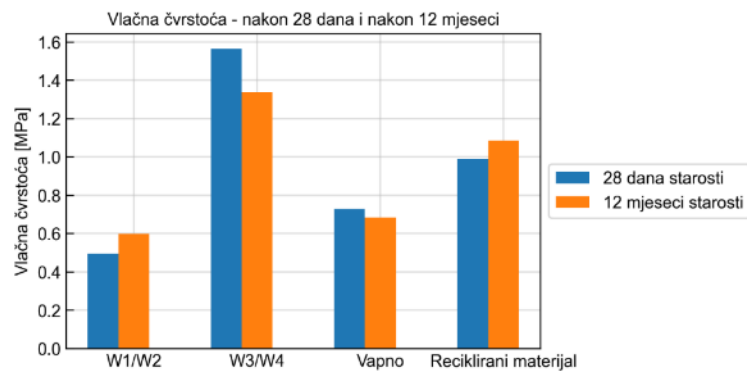
Slika G.5 Usporedba vlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – W3/W4



Slika G.6 Usporedba vlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – vapno

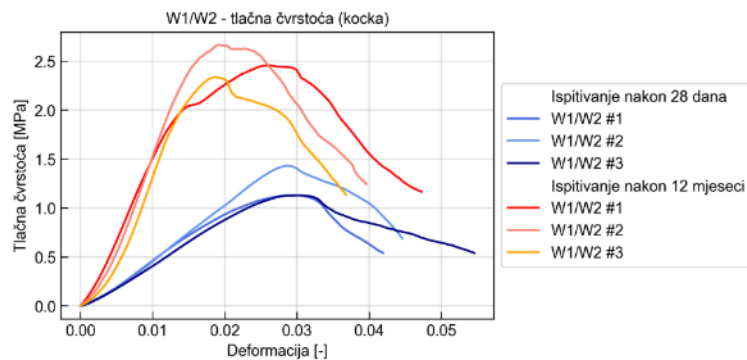


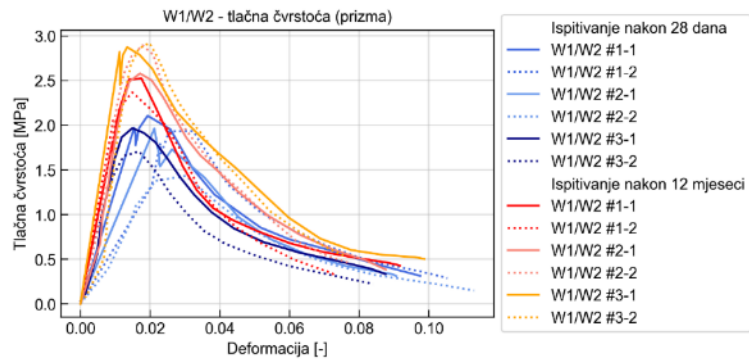
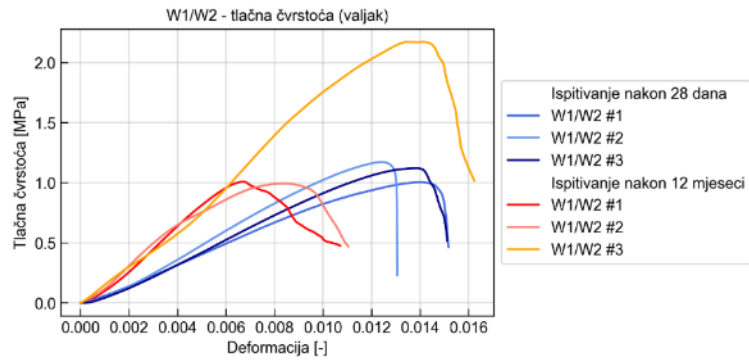
Slika G.6 Usporedba vlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – reciklirani materijal



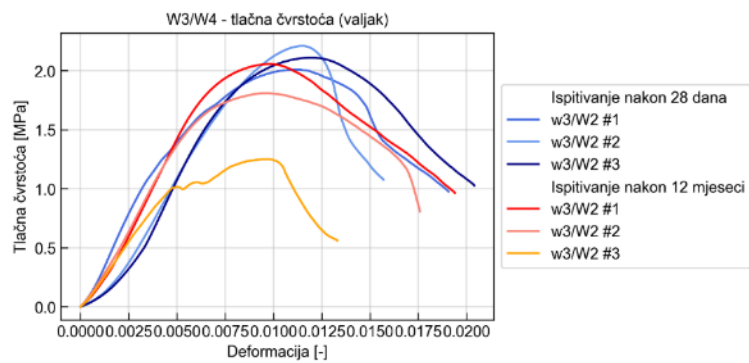
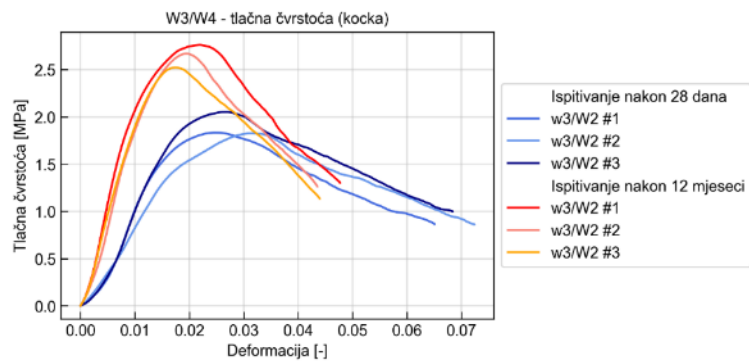
Slika G.7 Prosječna vlačna čvrstoća nakon 28 dana i 12 mjeseci

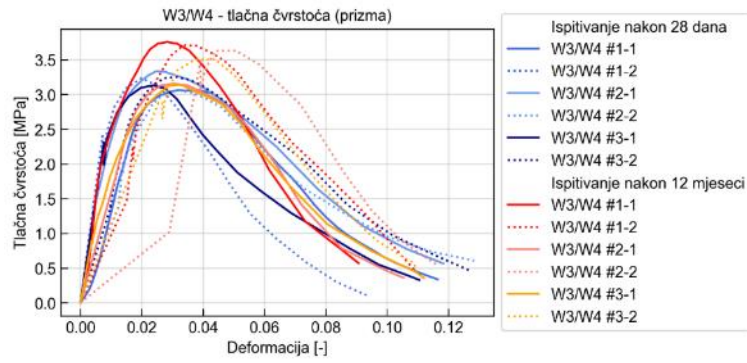
Na slikama G.8 – G.13 prikazani su radni dijagrami tlačne čvrstoće određene na uzorcima od nabijene zemlje. Pritom su, kao i na grafovima vlačne čvrstoće, nijansama plave boje označene krivulje uzoraka ispitanih nakon 28 dana, a nijansama crvene i narančaste boje krivulje uzoraka ispitanih nakon 12 mjeseci. Osim toga, na slici G.14 prikazan je stupčasti dijagram prosječnih vrijednosti tlačne čvrstoće. Uzorci s dodatkom vapna pokazali su identično ponašanje određeno na uzorcima ispitanim nakon 28 dana i 12 mjeseci. Uzorci izgrađeni od recikliranog materijala pokazali su u prosjeku manju tlačnu čvrstoću nakon 12 mjeseci, dok na ostalim uzorcima nije zabilježena razlika. Međutim krutost uzoraka od recikliranog materijala bila je gotovo ista i nakon 12 mjeseci. Na uzorcima od zida W3/W4 zabilježena je u prosjeku ista krutost dok je na uzorcima od zida W1/W2 te s dodatkom konoplje i pšenice zabilježena veća krutost nakon 12 mjeseci.



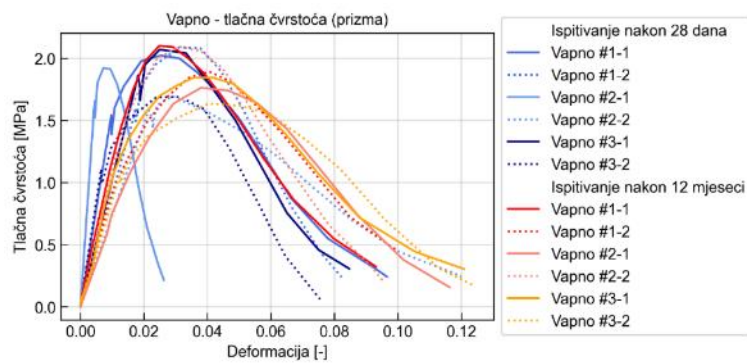
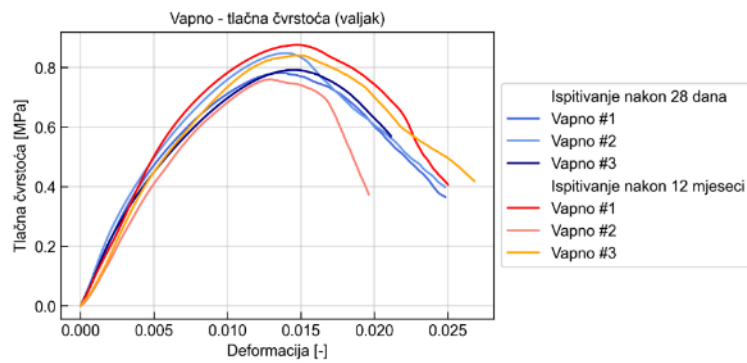
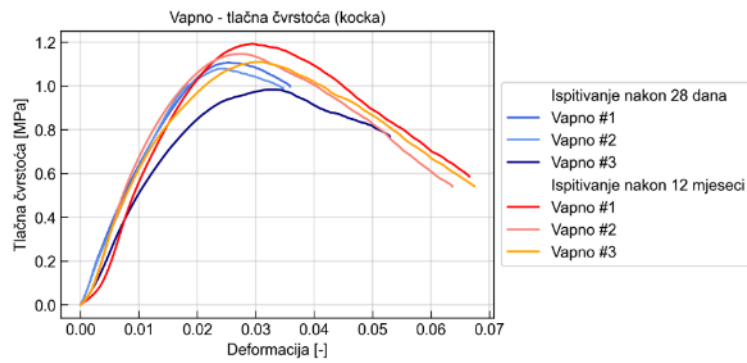


G.8 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – W1/W2 (na uzorcima oblika kocke (gornja slika), valjka (srednja slika) i polovica prizme (donja slika))



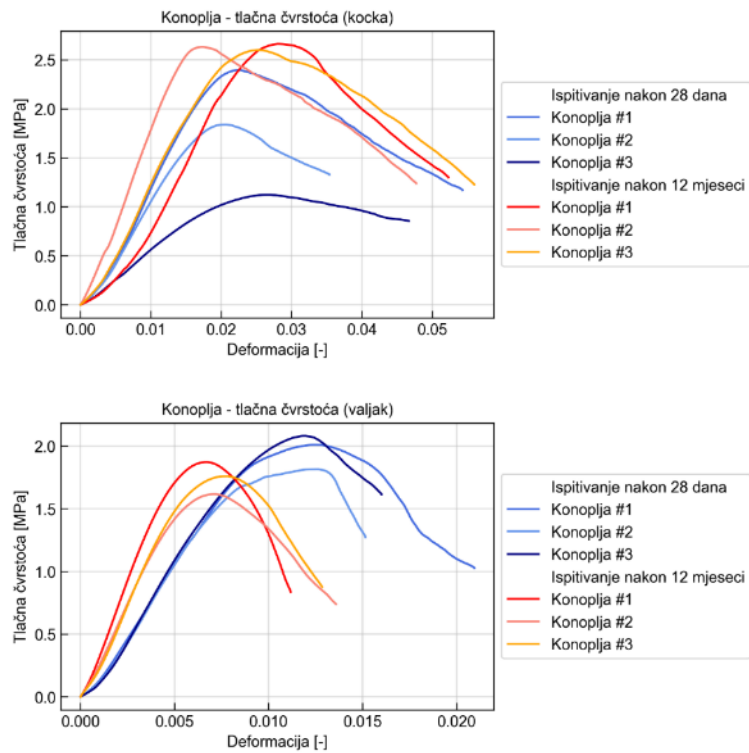


G.9 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – W3/W4 (na uzorcima oblika kocke (gornja slika), valjka (srednja slika) i polovica prizme (donja slika))

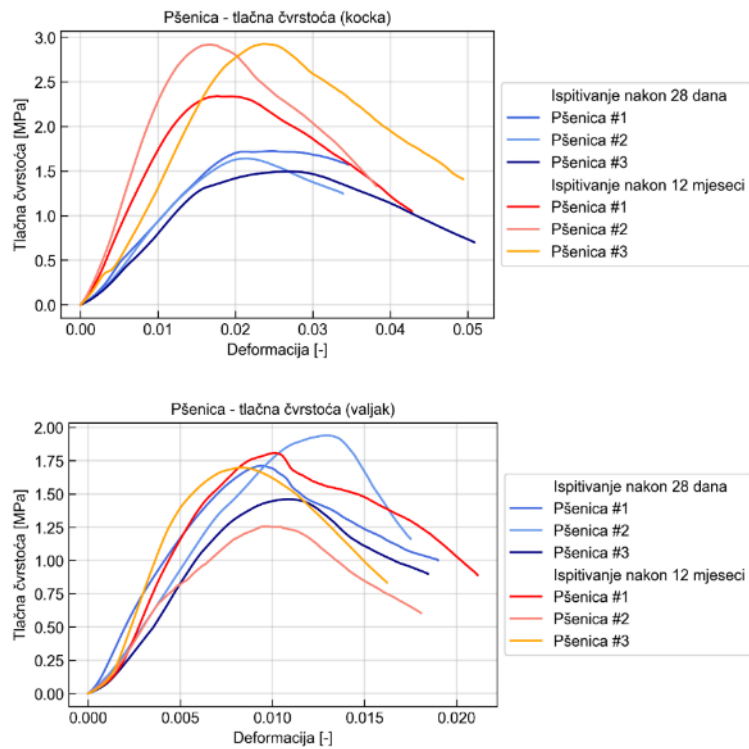


G.10 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – vapno (na uzorcima oblika kocke (gornja slika), valjka (srednja slika) i polovica prizme (donja slika))

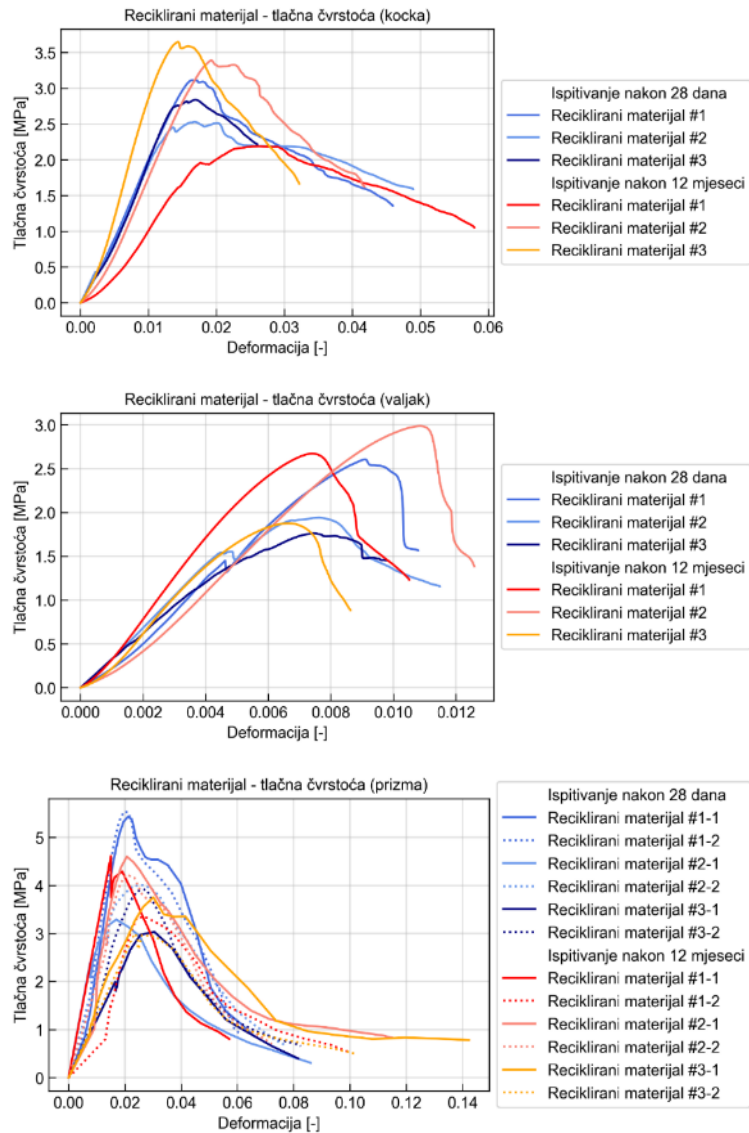




G.11 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – konoplja (na uzorcima oblika kocke (gornja slika) i valjka (donja slika))



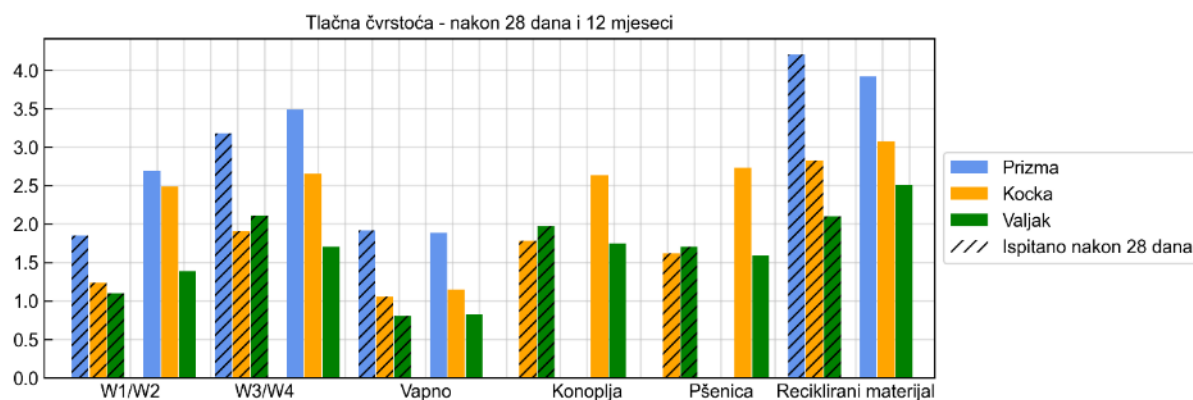
G.12 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – pšenica (na uzorcima oblika kocke (gornja slika) i valjka (donja slika))



G.13 Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana i 12 mjeseci – reciklirani materijal (na uzorcima oblika kocke (gornja slika), valjka (srednja slika) i polovica prizme (donja slika))

Na slici G.14 prikazane su prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće ispitane nakon sušenja uzoraka tijekom 28 dana i 12 mjeseci. U prosjeku je uočen porast tlačne čvrstoće na svim uzorcima osim onima s dodatkom vapna te izrađenima od recikliranog materijala. Najveći se porast uočava na uzorcima oblika kocke, dok je na uzorcima oblika valjka porast bitno manji

ili je čak pad. Starost nije imala nikakvog utjecaja na uzorke s dodatkom vapna te je tlačna čvrstoća bila istovjetna onoj određenoj na 28 dana starim uzorcima, neovisno o obliku uzorka.



Slika G.14 Tlačna čvrstoća nakon 28 dana i 12 mjeseci

U narednim razdobljima projekta planirano je ispitivanje istovjetnih uzoraka nakon sušenja tijekom 24 i 36 mjeseci, kako bi se provjerio utjecaj starenja na mehanička svojstva nabijene zemlje.