

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
Izvještajno razdoblje:	2. razdoblje
Oznaka izvještaja:	D5
Sadržaj:	Opis provedenog ispitivanja zidova od nabijene zemlje pri djelovanju horizontalnih sila u ravnini i okomito na njihovu ravninu. Svojstva materijala ispitana na probnim tijelima.
Autori izvještaja:	Ana Perić, izv. prof. dr. sc. Ivan Kraus, doc. dr. sc. Marin Grubišić
Datum:	7. 12. 2022.

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.

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 (W1 i W2) izrađena primjenom mješavine RE1, dok su preostala dva zida (W3 i W4) izrađena primjenom mješavine RE2, pri čemu obje mješavine sastavom odgovaraju mješavinama od kojih su izgrađene tradicijske kuće od nabijene zemlje s područja Istočne Hrvatske. Uočeno je da sastav mješavine ne utječe značajno na potresni odziv zidova 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 prividno imaju veću tlačnu čvrstoću, međutim to bi trebalo provjeriti na dodatnim uzorcima u narednim razdobljima projekta. Osim uzoraka koji su korišteni za određivanje mehaničkih svojstava za zidove, izrađeni su dodatni uzorci koji će biti ispitani u narednim izvještajnim razdobljima projekta kako bi se utvrdio utjecaj starenja na mehanička svojstva.

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.

Abstract:

Four rammed earth walls were built using traditional techniques and tested for in-plane seismic behaviour. The first two walls (W1 and W2) were built using mixture RE1 and the second two walls (W3 and W4) using mixture RE2. Both mixtures match mixtures used for building traditional Eastern Croatian rammed earth houses. It was determined that soil mixture doesn't significantly affect the seismic behaviour of rammed earth walls. 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. In addition to the samples that were used to determine the mechanical properties for the walls, additional samples were made that will be tested in the next reporting periods of the project in order to determine the effect of aging on the mechanical properties.

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.

Sadržaj

1.	Uvod.....	5
2.	Opis zidova od nabijene zemlje	7
3.	Građenje zidova od nabijene zemlje.....	9
4.	Opis eksperimentalnog ispitivanja	14
5.	Rezultati ispitivanja zidova od nabijene zemlje	16
6.	Ispitivanje materijalnih svojstava	21
6.1	Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W1 i W2.....	23
6.2	Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W1 i W2.....	25
6.3	Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W1 i W2	28
6.4	Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W3 i W4.....	30
6.5	Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W3 i W4	31
6.6	Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W3 i W4	35
7.	Zaključak	37
	Literatura.....	38
	Prilog 1: Ispitivanje materijalnih svojstava od nabijene zemlje na 6 grupa uzoraka – ispitivanje nakon 28 dana	39
I.	Ispitivanje uzoraka W1-W2 (RE1)	39
II.	Ispitivanje uzoraka W3-W4 (RE2)	44
III.	Ispitivanje uzoraka s vapnom	50
IV.	Ispitivanje uzoraka s konopljom.....	55
V.	Ispitivanje uzoraka s pšenicom	60
VI.	Ispitivanje uzoraka s recikliranim materijalom.....	64

1. Uvod

Izvedena su četiri modela zida od nabijene zemlje primjenom tradicijskih mješavina. Pritom su zidovi podijeljeni na dva para s različitim sastavom tradicijske zemljane mješavine, dok su dimenzije svih četiriju zidova iste. Zidovi su izgrađeni tradicijskom tehnikom nabijanja ručnim nabijačima. Nakon sušenja zidova tijekom dva mjeseca u laboratorijskim uvjetima, zidovi su opterećeni vertikalnim opterećenjem i podvrgnuti djelovanju cikličkih horizontalnih sila u ravnini zida. Uz zidove izrađena su i probna tijela primjenom istih zemljanih mješavina na kojima su određena materijalna svojstva.

U okviru radnog sastanka istraživačkog tima donesen je zaključak da se izvedu po dva zida od istog materijala, najviše zato jer se po prvi puta na području Republike Hrvatske eksperimentalno ispituje sposobnost nosivosti ovakvih zidova, zbog čega postoji značajna doza neznanja u kontekstu mogućeg mehanizma sloma, očekivane najveće sile i pomaka koje modeli mogu podnijeti prije potpunog sloma. Međutim, iako su izvedena dva para zidova iste geometrije, odlučeno je jedan zid opteretiti drugačijim protokolom horizontalnog opterećenja u odnosu na ostala tri zida, dok je jedan zid ispitivan nakon kraće njege kako bi se istražio utjecaj udjela vlage. Kranska vaga, nabavljeni u ovom izvještajnom razdoblju, korištena je u okviru projekta za potrebe određivanja težine naglavnih greda koje su bile korištene za unos sila u modele zidova. Osim toga, kranska vaga korištena je za procjenu udjela vlage u zidovima i njihove ukupne težine tijekom njege uzoraka i neposredno prije njihovog ispitivanja. Polužna dizalica nabavljeni u okviru projekta korištena je za fino namještanje modela zidova uz reaktivni zid.

Umjesto planirane provedbe eksperimenta u reaktivnom okviru, modeli zidova ispitani su uz reaktivni zid u Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku Vladimir Sigmund. Eksperimentalno ispitivanje nosivosti zidova postavljenih uz reaktivni zid provedeno je primjenom iste metode koja bi bila primijenja da su zidovi postavljeni u reaktivni okvir. Međutim, reaktivni okvir nije bilo moguće koristiti jer postavljanje zidova u okvir bilo vrlo teško izvedivo te zbog bojazni da se zidovi ne bi oštetili (ili slomili) već prilikom transporta. Naime, reaktivni okvir ima temeljnju gredu zbog čega je modele zidova potrebno podizati na visinu od otprilike 50 cm pa potom umetati u okvir. Zbog toga su prilagođeni dostupni laboratorijski elementi za unos opterećenja, pri čemu je iskorištena mogućnost ispitivanja modela zidova od nabijene zemlje koristeći reaktivni zid. Od kraja 2022. godine Laboratorij za eksperimentalnu mehaniku Vladimir Sigmund ima na raspolaganju novi reaktivni okvir koji će omogućiti (i olakšati) provedbu ispitivanja modela zidova, budući da novi reaktivni okvir nema temeljnju gredu (pričvršćen je izravno na reaktivnu ploču laboratorija).

Za potrebe istraživanja utjecaja starenja na fizikalna i mehanička svojstva materijala korištenog za građenje zidova od nabijene zemlje, uz uzorke (kocke, valjci, prizme i pločice) izrađene od mješavina koje su korištene za izradu modela četiri zida u ovom izvještajnom razdoblju, izrađeni su i dodatni uzorci (tablica 1.1). Izrađeni su sljedeći uzorci: kocke (15x15x15 cm) za ispitivanje tlačne čvrstoće, valjci (15x30 cm) za ispitivanje tlačne čvrstoće, prizme (4x4x16 cm) za ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoće, male pločice (10x10x2 cm) za ispitivanje posmične čvrstoće, kohezije i kuta unutarnjeg trenja te velike pločice (15x15x2,5 cm) za ispitivanje toplinske provodljivosti. Malih pločica izrađeno je četiri više u odnosu na uzorke drugog oblika zbog složenosti ispitivanja i osjetljivosti ovakvih uzoraka. Svaka skupina od 12 uzoraka sadrži 3 uzorka koji se ispituju u 2022. godini (Razdoblje 2), 2023. godini (Razdoblje 3), 2024. godini (Razdoblje 4) i 2025. godini (Razdoblje 5). Uzorci su arhivirani u komori za njegu uzoraka pri laboratoriju Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Rezultati uzoraka ispitanih u 2022. godini dani su u ovome izvješću (za kocke, valjke, prizme i male pločice) te u izvješću koje se odnosi na rezultat D3 (velike pločice). U tijelu osnovnog teksta ovog izvještaja dani su rezultati

ispitivanja mehaničkih svojstava na uzorcima koji se odnose na zidove W1, W2, W3 i W4. Za uzorke svih mješavina rezultati ispitivanja zbirno su prikazani u prilogu na kraju izvještaja.

Prizme i velike pločice koje bi u slojevima sadržavali prirodna vlakna ili u koje bi prirodna vlakna bila umješana, a kakvi bi odgovarali materijalu od kojega su izrađeni zidovi ili dijelovi zidova (npr. kocka/valjak), nisu izrađene budući da ispitivanja toplinske provodljivosti i posmične čvrstoće na takvim uzorcima ne bi imala razumno opravdanje.

Tablica 1.1 Opis uzoraka izrađenih za potrebe određivanja fizičkih i mehaničkih svojstava materijala tijekom 4 razdoblja projekta

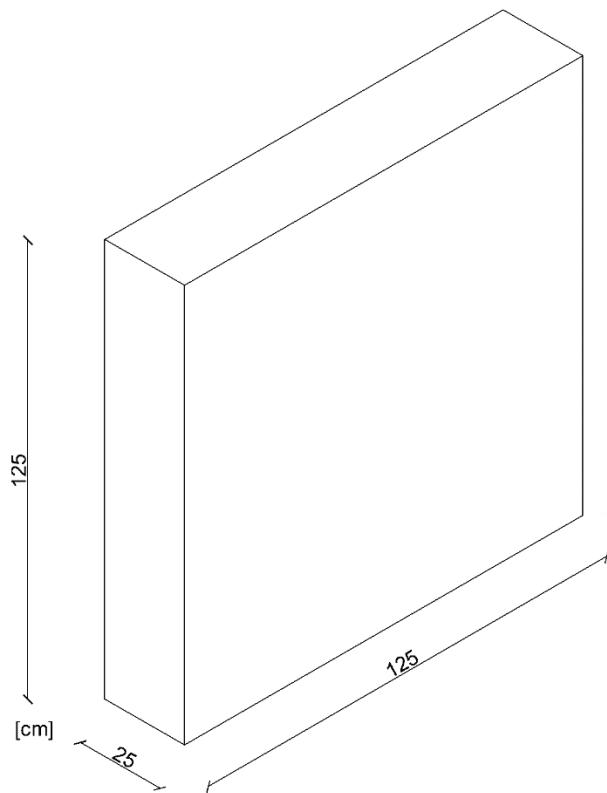
Oznaka mješavine	Opis mješavine	Oblik i broj uzoraka					Ukupno uzoraka
		kocke (15x15x15 cm)	valjci (15x30 cm)	prizme (4x4x16 cm)	male pločice (10x10x2 cm)	velike pločice (15x15x2,5 cm)	
RE1	Mješavina za zidove W1 i W2 te zidove W-40 i W-50 (v. rezultat D3)	12	12	12*	16	12	64
RE2	Mješavina za zidove W3 i W4	12	12	12*	16	12	64
RE2+P	Mješavina za zidove W3 i W4 uz dodatak vlakana slame pšenice između slojeva u polovici visine kocke i pločice te 1/3 i 2/3 visine valjka.	12	12	-	16	-	40
RE2+K	Mješavina za zidove W3 i W4 uz dodatak vlakana konoplje između slojeva u polovici visine kocke i pločice te 1/3 i 2/3 visine valjka.	12	12	-	16	-	40
RE2+V4	Mješavina za zidove W3 i W4 uz dodatak 4 % vapna na masu mješavine tla i sipine.	12	12	12*	16	12	64
RE1-rec	Mješavina kakva je korišena za zidove W1 i W2 i zidove W-40 i W-50, ali koja je dobivena rušenjem zida W-50 (v. rezultat D3). Riječ je o „recikliranome“ materijalu.	12	12	12*	16	12	64
Ukupno uzoraka		72	72	48	96	48	336*

* prilikom ispitivanja prizmi na savijanje, nastaju dodatna dva uzorka koja je moguće ispitati na tlak, čime se ukupni broj uzoraka povećava za 96, što u konačnici iznosi 432 ispitna uzorka.

2. Opis zidova od nabijene zemlje

Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja, izrađena su četiri modela zida od nabijene zemlje u mjerilu 1:2. Kao jedini promjenjivi čimbenik u provedenom eksperimentu, odabrana je mješavina od koje se zidovi izrađuju, odnosno materijalna svojstva, dok su sva preostala svojstva istovjetna za sva četiri ispitana modela zida. Tako je osigurana usporedivost između rezultata ispitivanja te mogućnost provjere utjecaja sastava zemljjanog zida na njegov potresni odziv.

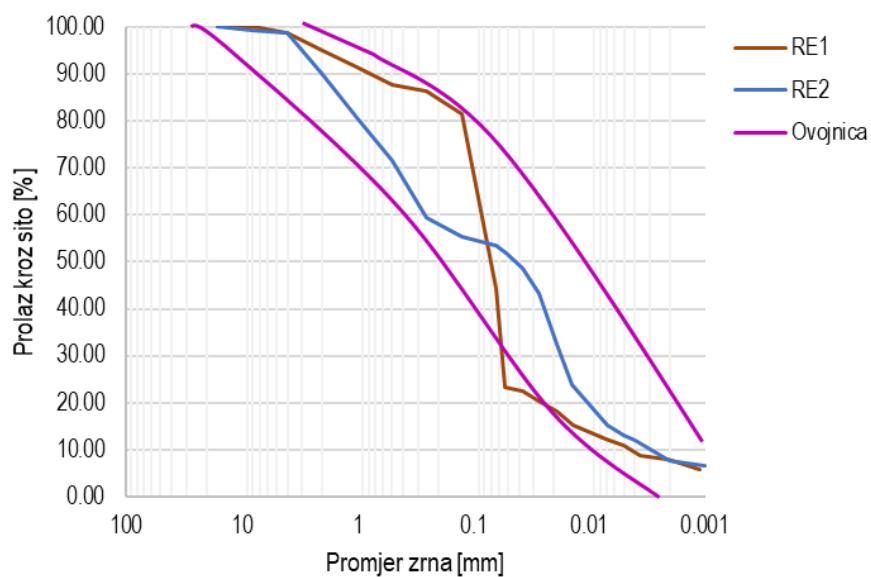
Geometrijska svojstva istovjetna su za sva četiri ispitana modela zida te su prikazana na slici 2.1. Provedbom terenskih istraživanja, utvrđeno je da visina zidova u stvarnim konstrukcijama od nabijene zemlje na području istočne Hrvatske uglavnom ne prelazi 2.5 m. Prema tome je visina modela zidova ispitanih ovim istraživanjem, a poštujući mjerilo 1:2, definirana u iznosu od 1.25 m. Radi jednostavnosti izvedbe i provedbe 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.



Slika 2.1 Dispozicija modela zidova od nabijene zemlje

Kako bi se osigurala provjera ponovljivosti rezultata, modeli zidova izrađeni su u parovima s istim materijalnim svojstvima. Prva dva modela zida (W1 i W2) izrađena su od zemljjanog materijala u svom prirodnom sastavu (RE1), prikupljenog iz iskopine u okolici Osijeka (iz naselja Retfala). Druga dva modela zida (W3 i W4) izrađena su od zemljjanog materijala prikupljenog iz druge iskopine, također u okolici Osijeka (s područja Orlovnjak), no u zemljani materijal dodano je i 40 % masenog udjela sitnog šljunka, promjera zrna do 4 mm, čime je nastala mješavina RE2. Za obje mješavine je granulometrijski sastav (slika 3.2) određen postupkom mokrog sijanja i areometriranja prema normi HRN EN ISO 17892-4.

Korekcija sastava mješavine RE2 provedena je kako bi se mješavina sastavom našla unutar ovojnica koja opisuje do sada ispitane mješavine s područja Slavonije i Baranje (Slika 2.2). Time je osigurano da mješavina RE2 po svome granulometrijskom sastavu nalikuje na već isprobane mješavine koje već više desetaka godina stoje ugrađene u kuće od nabijene zemlje i odolijevaju zubu vremena. Navedeni postupak nije proveden za mješavinu RE1 jer je ona svojim granulometrijskim sastavom već u dobroj mjeri bila unutar ovojnica pa korekcija krivulje nije bila potrebna. Uz to, ovime je osigurano da dvije promatrane mješavine imaju različita svojstva, budući da je mješavina RE1 prirodno tlo, dok je mješavina RE2 izrađena koristeći prirodno tlo i sitni šljunak. Tako je eksperimentom ispitani utjecaj promjene sastava tla na potresni odziv ispitanih modela zidova. Granulometrijska ovojnica rezultat je provedenih ispitivanja na prikupljenim uzorcima materijala iz postojećih tradicijskih zemljanih kuća s područja Slavonije i Baranje, a izradio ju je istraživački tim tijekom drugog izvještajnog razdoblja.



Slika 2.2 Granulometrijski sastav rabljenih mješavina

3. Građenje zidova od nabijene zemlje

Modeli zidova izrađeni za potrebe ovog istraživanja, građeni su primjenom tradicionalne tehnike te su zbijani ručno, pomoću čeličnih i drvenih nabijača. Zbog primjene tradicionalnih tehnika, potrebna vlažnost materijala nije egzaktno određena unaprijed nego je često kontrolirana primjenom drop testa (Walker i dr. 2005, Minke 2012. Krahm 2019.). Međutim, za svaki model zida određen je postotak vlažnosti materijala pri kojem je izrađen te su isti prikazani u tablici 3.1. Nakon što je tlo prosijano koristeći sito promjera oka 16 mm, materijal (tlo i sipina) miješan je ručno, pomoću lopata na čistoj betonskoj podlozi (slika 3.1). Materijal su pripremali iskusni lokalni majstori s dugogodišnjim iskustvom u gradnji i obnovi zemljanih kuća. Voda je u zemljani materijal dodavana špricanjem sitnih kapljica po površini materijala.

Tablica 3.1 Vlažnost materijala prilikom izrade modela zidova

Model zida	W1	W2	W3	W4
Vlažnost pri izradi (%)	14.07	16.25	12.65	13.05

Kako bi proces ispitivanja i premještanje modela zidova unutar laboratorija bio jednostavniji, zidovi su izrađeni na betonskim gredama dimenzija 25 x 45 x 250 cm. Prije izvedbe zida, na temeljnoj betonskoj gredi izliven je tanki sloj (cca 2 cm) vapnenog morta (slika 3.2) u omjeru 1:3, kako bi se osiguralo što bolje povezivanje zemljjanog zida s betonskom gredom („temeljem“). Potom je oko temeljne grede postavljena drvena oplata koja je bila osigurana drvenim kosnicima (slika 3.3).



Slika 3.1 Miješanje zemljjanog materijala



Slika 3.2 Sloj vapnenog morta na temeljnoj betonskoj gredi



Slika 3.3 Postavljena drvena oplata za izgradnju zida od nabijene zemlje

Modeli zidova od nabijene zemlje bili su izrađeni od slojeva debljine od 5 do 7 cm, a za izradu svakog modela bilo je potrebno nekoliko sati grupi od 2 do 3 radnika. U svaki sloj dodano je dvije kante (zapremnine 15 L) pripremljenog zemljanog materijala. Materijal je prije nabijanja poravnani te je potom uslijedilo zbijanje metalnim nabijačima (slika 3.4), do zbijenosti 98 %, prema preporuci u literaturi (Walker i dr., 2005.). Prije nasipavanja materijala za novi sloj, površina zbijenog sloja je povremeno diskretno namočena vodom.



Slika 3.4 Metalni nabijač korišten prilikom izrade zemljanih zidova

Kako bi se sprječilo deformiranje (puzanje) zbog razmjerne velike vlastite težine, ali i prekomjerno raspucavanje prilikom sušenja, oplata je zadržana na modelima zidova u

projektu tjedan dana nakon završetka izvedbe (slika 3.5). Potom su modeli zidova čuvani u laboratorijskim uvjetima tijekom 45 (1 zid), odnosno 60 dana (3 zida) (slika 3.6), nakon čega je provedeno ispitivanje.

U nedostatku vlastitog iskustva, razdoblje od 60 dana njegovanja uzoraka prije ispitivanja određen je na temelju pregleda literature (Perić et al, 2021) i prethodnih iskustava drugih istraživača u području istraživanja konstrukcija od nabijene zemlje (Miccoli et al, 2016, 2017, El-Nabouch et al, 2016, 2017).



Slika 3.5 Uklanjanje drvene oplate

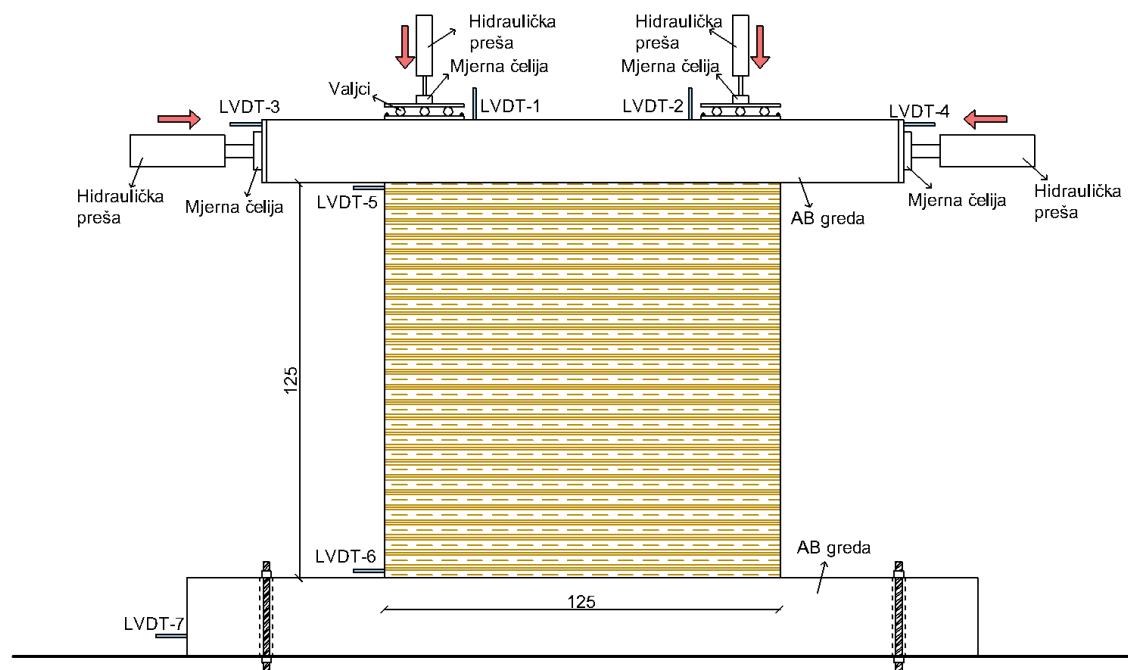


Slika 3.6 Osiguranje zidova u laboratoriju prije ispitivanja

Za potrebe određivanja tlačne, vlačne i posmične čvrstoće materijala od kojeg su izrađeni zidovi, za svaki par zidova izrađeni su sljedeći uzorci: tri kocke (15x15x15 cm), tri valjaka (15x30 cm), tri prizme (4x4x16 cm) te tri male pločice (10x10x2 cm). Uzorci su izrađeni od istog materijala, pripremljenog na isti način. Uzorci su pohranjeni u komoru sa kontroliranom vlažnosti od $50 \pm 5\%$ i pri temperaturi od $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, gdje su njegovani tijekom 28 dana nakon čega su ispitani. Uz ove uzorce izrađene su pločice dimenzija 15x15x2.5 cm za određivanje koeficijenta λ (v. izvještaj D3).

4. Opis eksperimentalnog ispitivanja

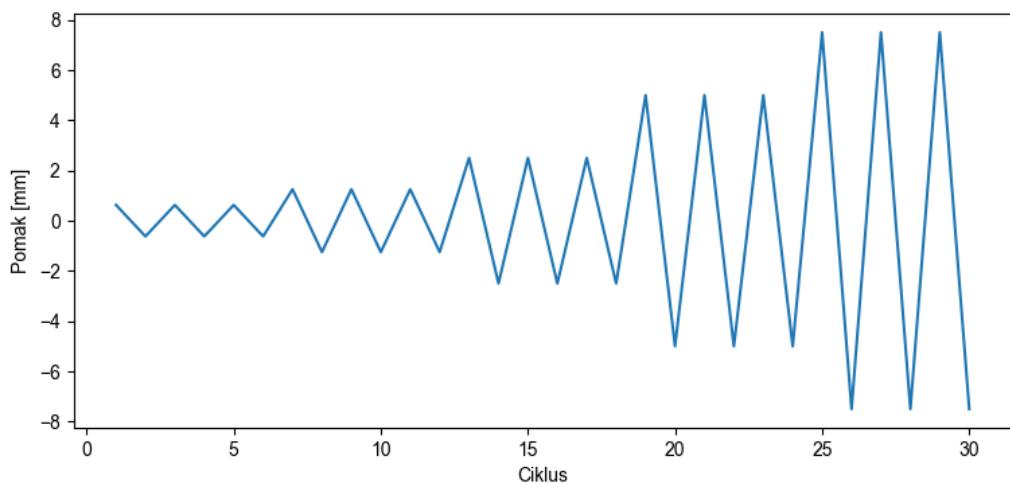
Potresna otpornost modela zidova od nabijene zemlje ispitana je eksperimentalno pomoću ciklički promjenjivog horizontalnog opterećenja. Model zida je zbog prijenosa unutar laboratorija te lakšeg učvršćivanja prilikom ispitivanja bio postavljen na temeljnu betonsku gredu. Osim toga, naglavna betonska greda dimenzija $20 \times 35 \times 200$ cm bila je postavljena i na vrh modela zida kako bi se omogućilo ravnomjerno nanošenje vertikalnog opterećenja tijekom eksperimenta. Postav eksperimenta prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 Postav eksperimenta

Na model zida prvo je naneseno vertikalno opterećenje u ukupnom iznosu od cca. 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. Protokol nanošenja horizontalnog pomaka grafički je prikazan na slici 4.2, a određen je po uzoru na pregledanu literaturu (Miccoli i dr. 2016., 2017., Ramezanpour i dr. 2021). Za modele zidova W3 i W4, održan je i jedan dodatni ciklus horizontalnog pomaka u iznosu od ± 10 mm, kako bi se ostvario značajniji pad krutosti. Ispitivanje je prekinuto kada je kritički ocijenjen značajan 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.

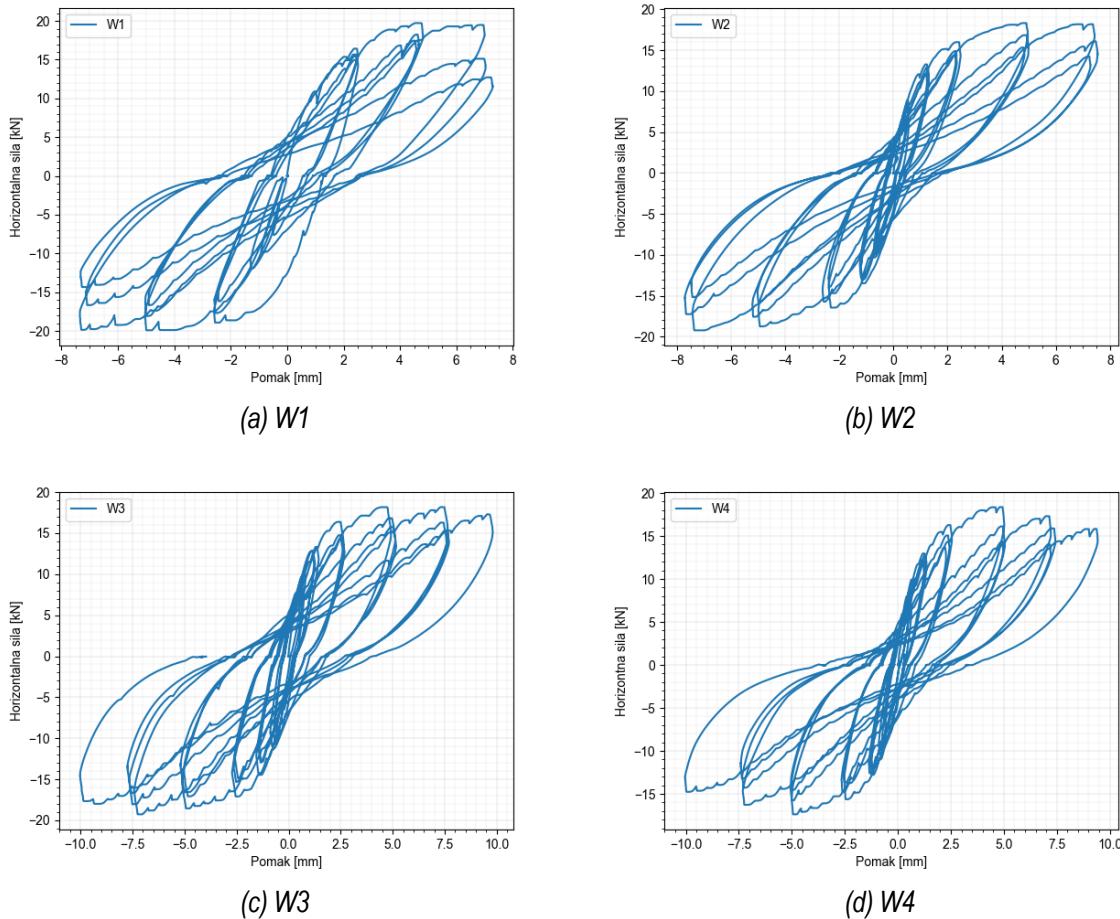


Slika 4.2 Potokol opterećivanja modela zida horizontalnim pomakom

Tijekom provedbe eksperimenta, odziv modela zidova mjerен je primjenom više LVDT-a, pozicioniranih kako je prikazano na slici 4.1., te primjenom ARAMIS sustava. Osim pomaka gornje betonske grede, mjerен je i relativni pomak betonskih greda u odnosu na model zida, kao i pomak donje betonske grede u odnosu na temeljnu reaktinu ploču laboratorija. Tako je izmjereno zanemarivo proklizavanje betonske grede u odnosu na podlogu za sva četiri modela zida. Proklizavanje gornje betonske grede u odnosu na model zida je raslo s porastom horizontalnog opterećenja i smanjenjem vertikalnog opterećenja na vrhu grede te je za model zida W4 doseglo gotovo 8 mm. Za preostala tri modela zida je proklizavanje gornje grede bilo manje, no i dalje značajno u iznosu do cca 4 mm.

5. Rezultati ispitivanja zidova od nabijene zemlje

Histerezne petlje ispitanih zidova prikazane su na slici 5.1, dok su maksimalne nosivosti (F_{max}) i pripadni pomaci (d_{max}) izdvojeni u tablici 5.1, za oba smjera ispitivanja *push* i *pull*. Uz to, u tablici 5.1 prikazani su i pripadni međukatni pomaci (IDR) određeni na temelju pomaka pri dosezanju nosivosti zida (d_{max}). Navedeni podaci prikupljeni su koristeći LVDT-e postavljene u smjeru djelovanja horizontalnog opterećenja. Za prvi ispitani zid, W1, ispitivanje s početnim pomacima u protokolu (± 0.625 mm i ± 1.25 mm) nije provedeno nego je ispitivanje započelo pomakom ± 2.5 mm. Stoga linearno ponašanje nije u potpunosti vidljivo na histereznoj petljici prikazanoj slikom 4.3.(a). Nadalje, može se uočiti da je ponašanje zidova uglavnom simetrično u oba smjera (*push* i *pull*), uz iznimku pomaka pri maksimalnoj nosivosti zida W2. U prosjeku je maksimalna nosivost zidova i pripadni pomak u *push* smjeru iznosio 18.65 kN/ 5.45 mm odnosno u i *pull* smjeru 18.95 kN/ 6.13 mm.

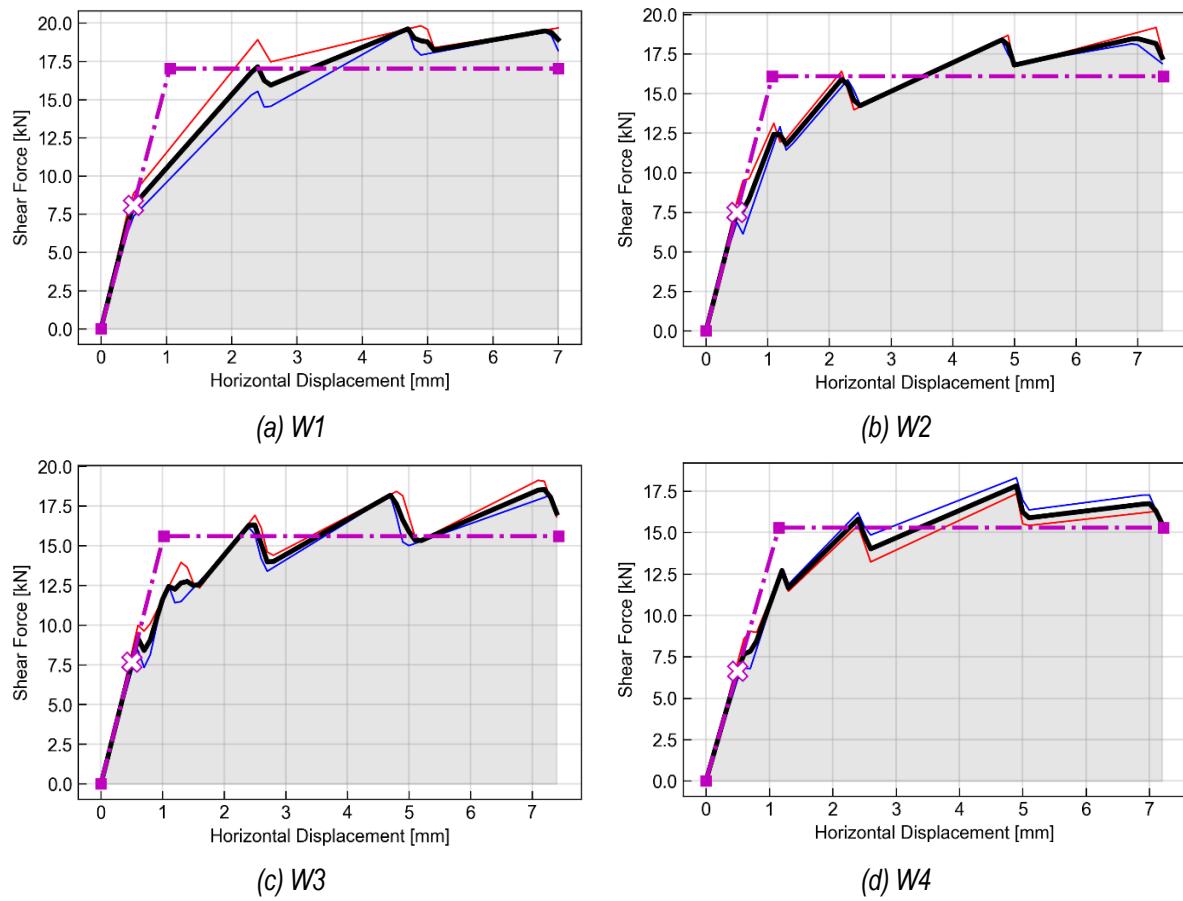


Slika 5.1 Histerezne petlje dobivene cikličkim ispitivanjem zidova od nabijene zemlje u njihovoj ravnini

Tablica 5.1 Rezultati nosivosti ispitanih modela zidova od nabijene zemlje

Zid	F_{max} [kN]		d_{max} [mm]		IDR [%]	
	Push	Pull	Push	Pull	Push	Pull
W1	19.73	19.92	4.74	4.99	0.38	0.40
W2	18.32	19.22	4.82	7.35	0.39	0.59
W3	18.18	19.27	7.31	7.23	0.59	0.58
W4	18.36	17.38	4.94	4.94	0.40	0.40

Na temelju bilinerane idealizacije krivulje sposbnosti nosivosti (slika 5.2) određena je i duktilnost zidova kao omjer pomaka na kraju ispitivanja (d_u) i pomaka pri dosezanju tečenja (d_y), prikazana u tablici 5.2.



Slika 5.2 Bilinearna idealizacija krivulje sposbnosti nosivosti rezultata ispitivanja zidova

Vidljivo je da zid W3 ima najveću duktilnost, dok najmanju duktilnost ima zid W4. Međutim, razlike su neznatne te se može zaključiti da su sva četiri zida ostvarila približno jednaku duktilnost što potvrđuje i približno jednaku sposobnost nosivosti opisana ranije.

Tablica 5.2 Duktilnost ispitanih zidova od nabijene zemlje

ID uzorka	Pomak			Duktilnost
	d_e [mm]	d_y [mm]	d_u [mm]	μ
W1	0.50	1.05	7.01	6.65
W2	0.50	1.07	7.42	6.91
W3	0.50	1.02	7.43	7.30
W4	0.50	1.15	7.22	6.26

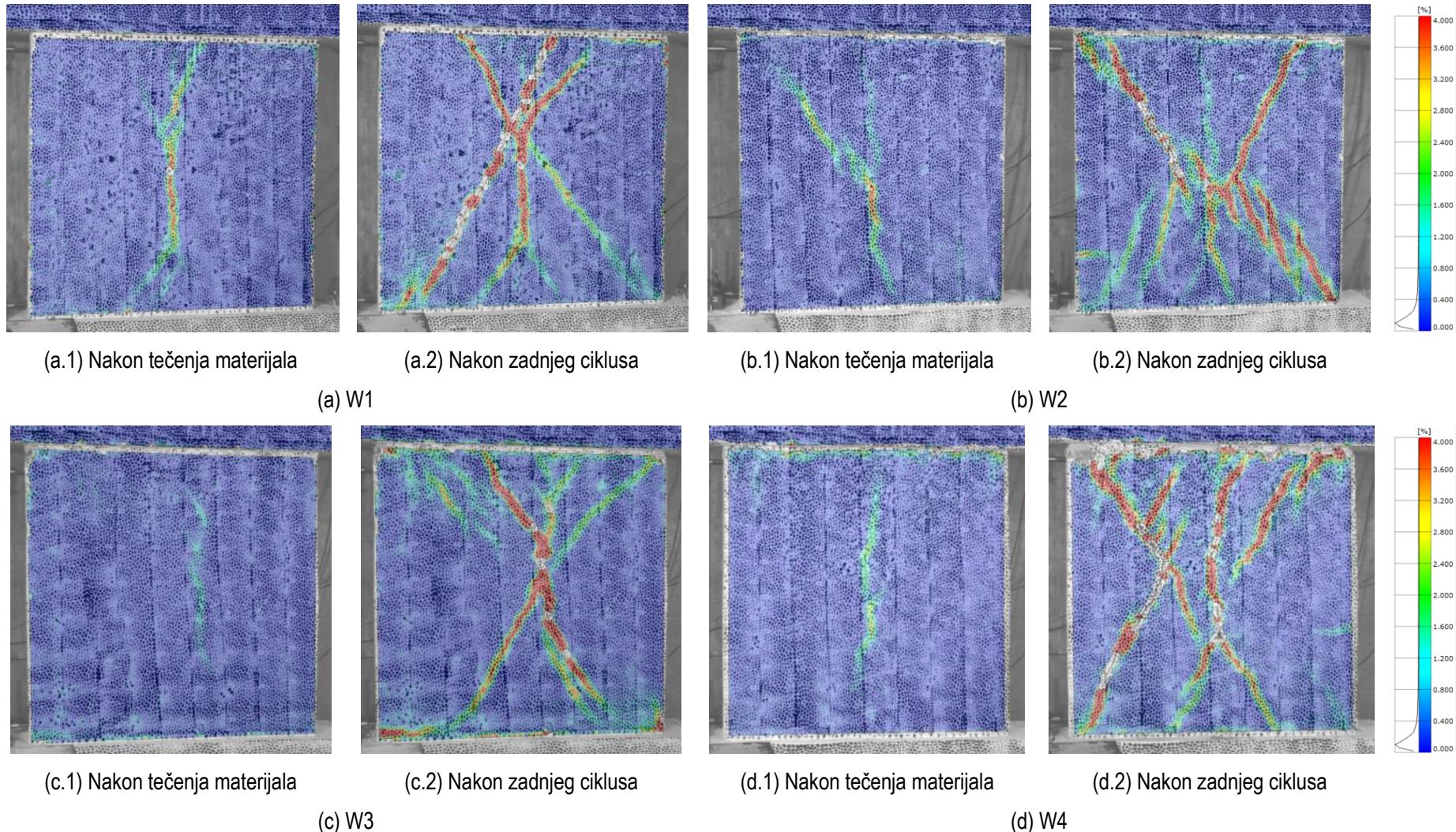
Slika 5.3 daje prikaz sva četiri ispitana zida na kraju ispitivanja s formiranim pukotinama. Međutim, zbog stohastičkog crno bijelog uzorka kojim je prednje lice zida oslikano, sve pukotine nisu jasno vidljive na fotografijama. Stoga slika 5. daje shematski prikaz svih pukotina

koje su se pojavile, a koje su određene na temelju Von Mises-ovih naprezanja prikupljenih snimanjem ARAMIS sustavom (slike 5.4).



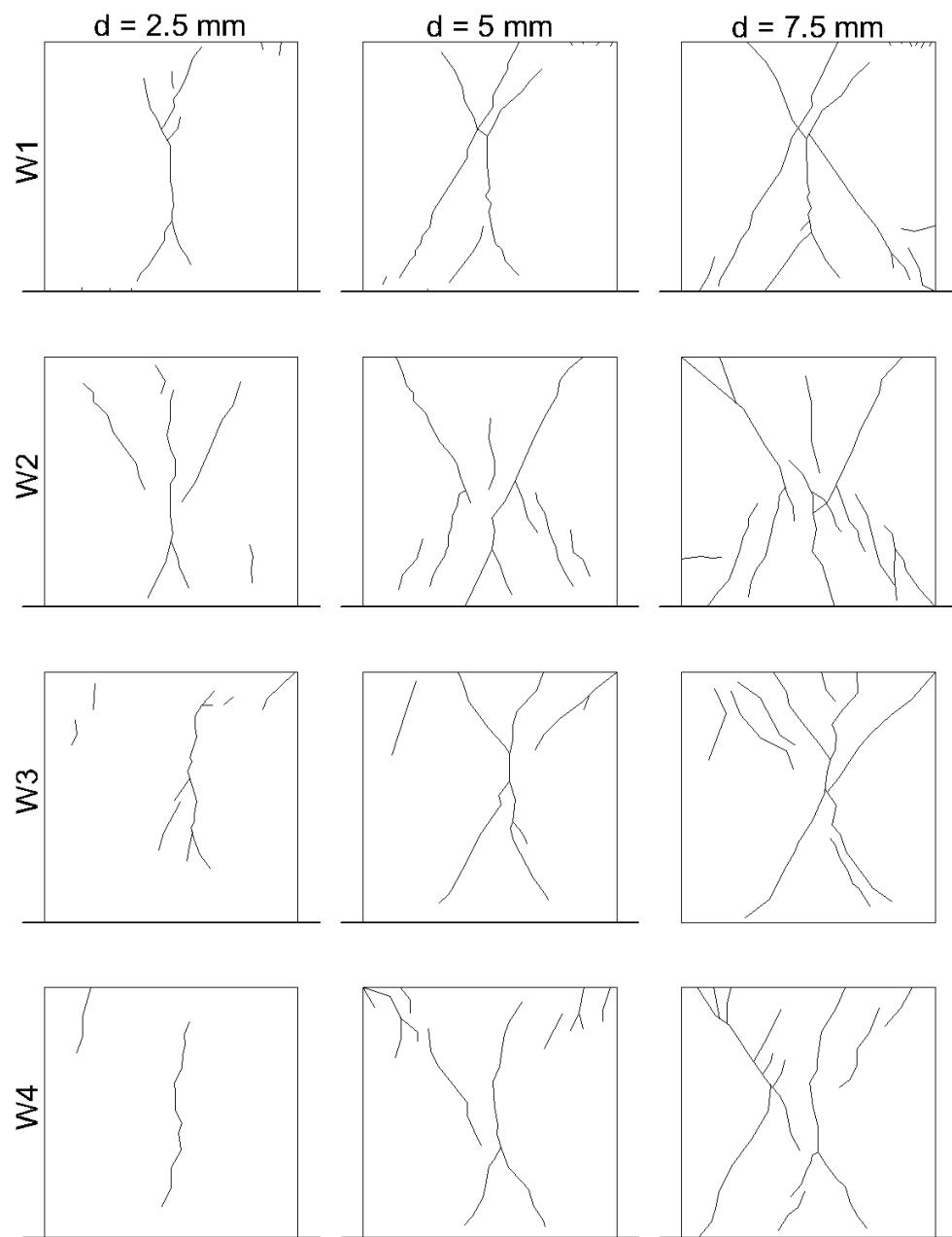
Slika 5.3 Pukotine na zidovima od nabijene zemlje formirane do kraja cikličkog ispitivanja

Vidljivo je kako su zidovi W3 i W4 nakon dosezanja tečenja imali značajno manje izražene pukotine u odnosu na zidove W1 i W2. Nadalje, na kraju posljednjeg ciklusa ispitivanja, zid W3 pokazao je najmanje izražene pukotine od svih četiriju ispitanih zidova, u skladu s nešto većom duktilnosti opisanoj u tablici 5.2.



Slika 5.4 Deformacije (Von Mises) zabilježene Aramis sustavom

Slika 5.5 shematski prikazuje razvoj pukotina, nakon tri ciklusa cikličkog djelovanja s amplitudama 2.5 mm, 5 mm i 7.5 mm, što odgovara međukatnom pomaku u iznosu 0.2 %, 0.4 % i 0.56 %. Ako se slijedi Calvijeva analogija (Calvi 1999.), prvi stupac grafika na slici 5.2 prikazuje pukotine tijekom graničnog stanja LS2 (blaga oštećenja konstrukcije), srednji stupac prikazuje pukotine tijekom graničnog stanja LS3 (značajna oštećenja konstrukcije) dok posljednji stupac pokazuje pukotine nakon sloma konstrukcije (granično stanje LS4). S obzirom na karakter pukotina nakon svakog ciklusa, može se zaključiti da je podjela graničnih stanja prema Calviju (Calvi 1999.) primjenjiva i za zidove od nabijene zemlje te se granično stanje LS3 može smatrati limitom, kao što su predložili El-Nabouch i dr. (El-Nabouch i dr., 2016.).

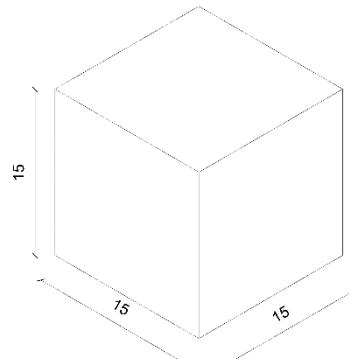
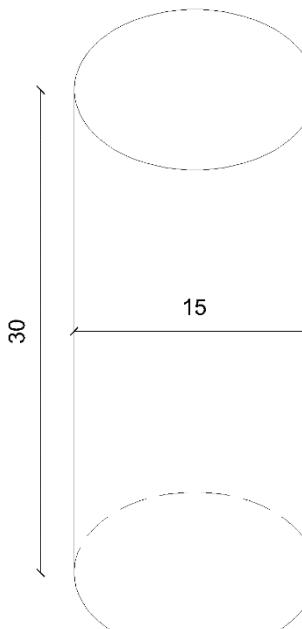


Slika 5.5 Shematski prikaz pukotina formiranih nakon pojedinog ciklusa djelovanja

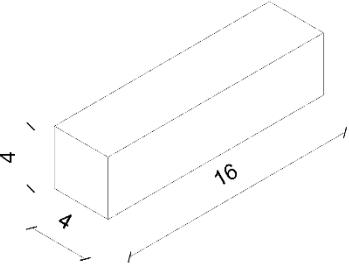
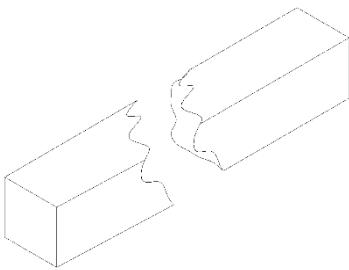
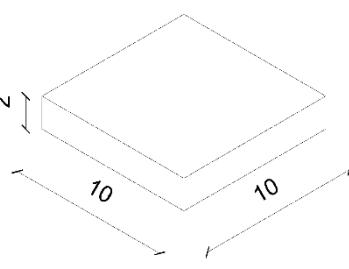
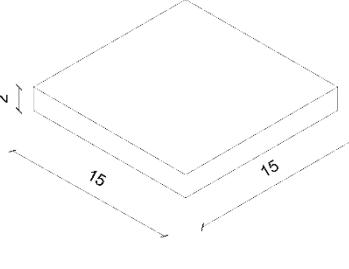
6. Ispitivanje materijalnih svojstava

Za oba para zidova (W1/W2 i W3/W4) 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 njegovani na temperaturi 25 ± 5 °C i RH 65 ± 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 6.1 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

Tablica 6.2 Nastavak

Svojstvo	Oblik uzorka	Dimenzije [cm]	Broj ispitanih uzoraka
Vlačna čvrstoća na savijanje		4 x 4 x 16	3
Tlačna čvrstoća		4 x 4 x >4	6 polovica
Posmična čvrstoća		10 x 10 x 2	3
Koeficijent toplinske propusnosti		15 x 15 x 2	3

Tlačna je čvrstoća ispitana na tri različita oblika uzorka (kocka, valjak i prizma) kako bi se, nakon ispitivanja uzorka u narednim razdobljima projekta, mogao provjeriti utjecaj oblika i/ili veličine ispitnog uzorka na iznos tlačne čvrstoće nabijene zemlje. Nadalje, za razliku od prethodnog izvještajnog razdoblja, vlačna čvrstoća nije ispitana na uzorcima oblika valjka jer je tijekom ovog projektnog razdoblja uočeno da prizmatični oblici prikazani u tablici 6.1. bolje odgovaraju prirodi ispitivanja nabijene zemlje jer polučuje pouzdanije rezultate koji su u većoj mjeri usporedivi s rezultatima iz druge literature.

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 ± 10 N/s do sloma, dok je tlačna čvrstoća na uzorcima prizmi ispitana uz polagani porast opterećenja brzinom 2400 ± 200 N/s do sloma, prema BS EN 196-

1:2005. Prije ispitivanja, svaki uzorak je precizno izmijeren kako bi se mogla odrediti čvrstoća prema sljedećim izrazima:

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

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

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.

Nakon provedenog razornog ispitivanja, iz sredine svakog ispitnog uzorka izdvojeno je nešto više od 100 grama materijala za potrebe određivanja vlažnosti prilikom ispitivanja.

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

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

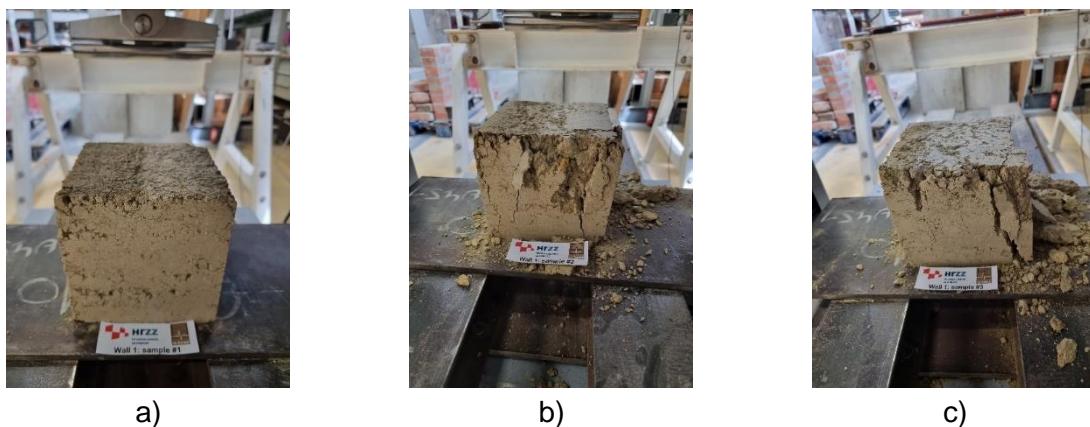
gdje je: E – modul elastičnosti, σ – tlačna čvrstoća, ε – deformacija

Ispitivanje posmične čvrstoće tla provedeno je u uređaju za izravni posmik, nabavljenome u okviru projekta u prethodnom projektnom razdoblju. U pokusu se mjerile normalna naprezanja, vertikalne deformacije, posmična sila te pomak, a rezultat ispitivanja su parametri čvrstoće – kohezija i kut unutarnjeg trenja.

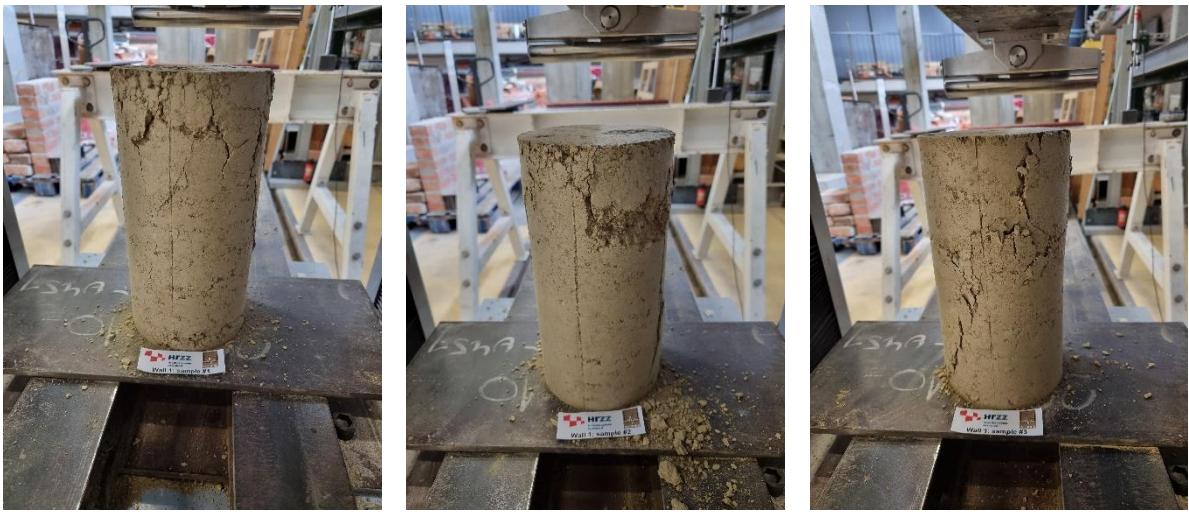
Ispitivanja su provedena na uzorcima koji su prethodno ugradnji u kalup uređaja bili u arhivirani klima komori (u kontroliranim uvjetima) 28 dana. Uzorci su prethodno smicanju bili izloženi vertikalnom opterećenju od 25, 50 i 100 kPa kroz 10 min te potom smicani brzinom od 1 mm/min.

6.1 Fotodokumentacija – ispitivanje uzorka W1 i W2

Za par zidova W1 i W2 ispitana je tlačna čvrstoća na tri kocke (slika 6.1) i tri valjka (slika 6.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri prizme (slika 6.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od triju ispitanih prizmi (slika 6.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem (ukupno 6 polovica). Osim toga, na malim pločicama određena je posmična čvrstoća (slika 6.5).



Slika 6.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W1 i W2

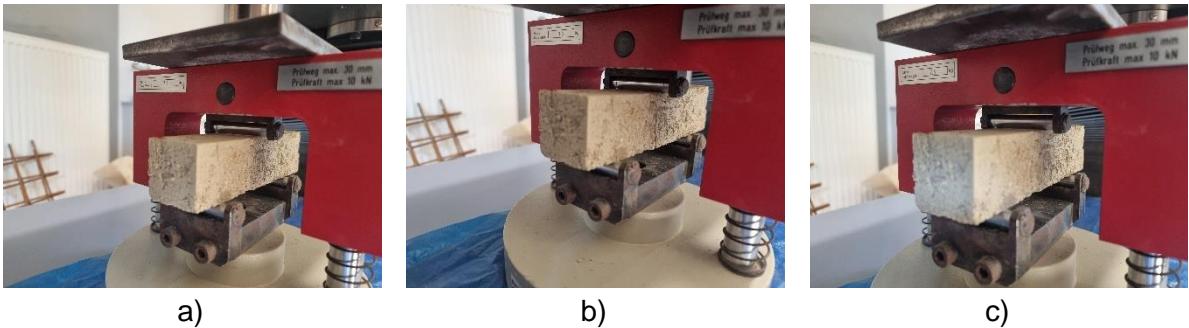


a)

b)

c)

Slika 6.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - W1 i W2



a)

b)

c)

Slika 6.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - W1 i W2

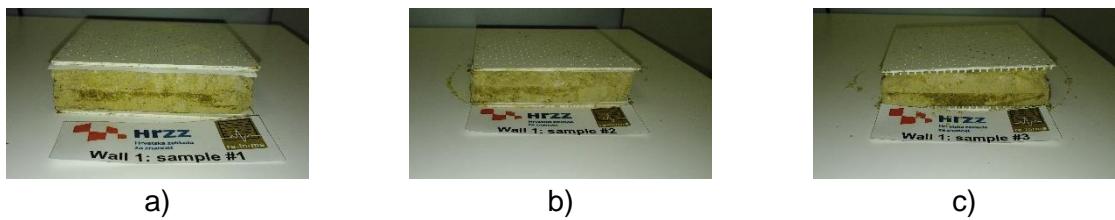


a)

b)

c)

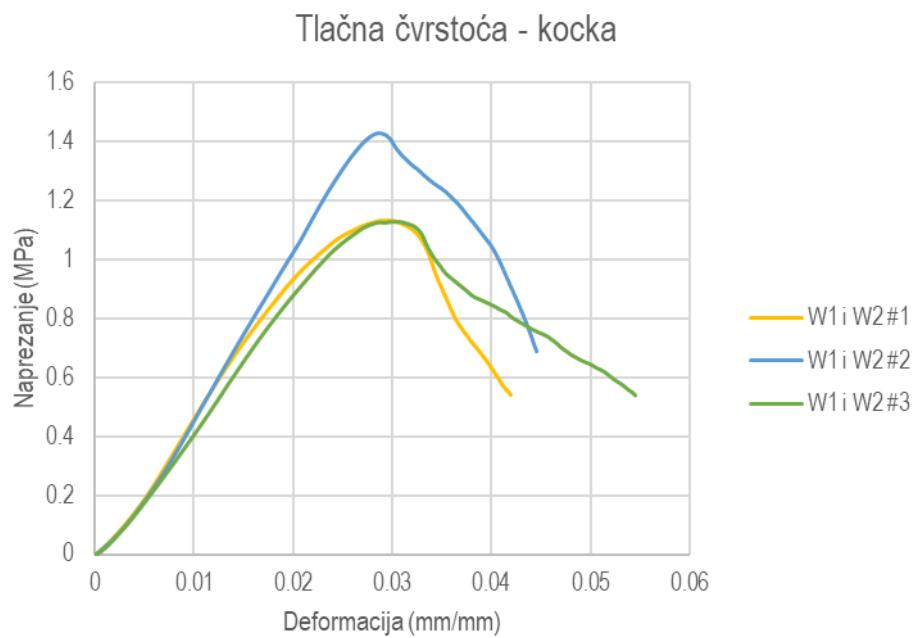
Slika 6.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - W1 i W2



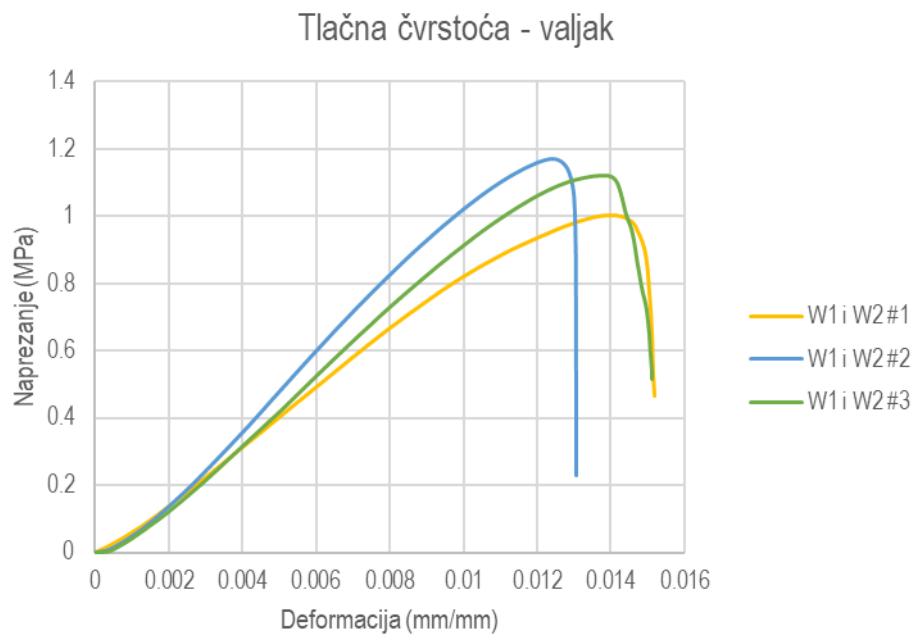
Slika 6.5 Uzorci nakon ispitivanja posmične čvrstoće - W1 i W2

6.2 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W1 i W2

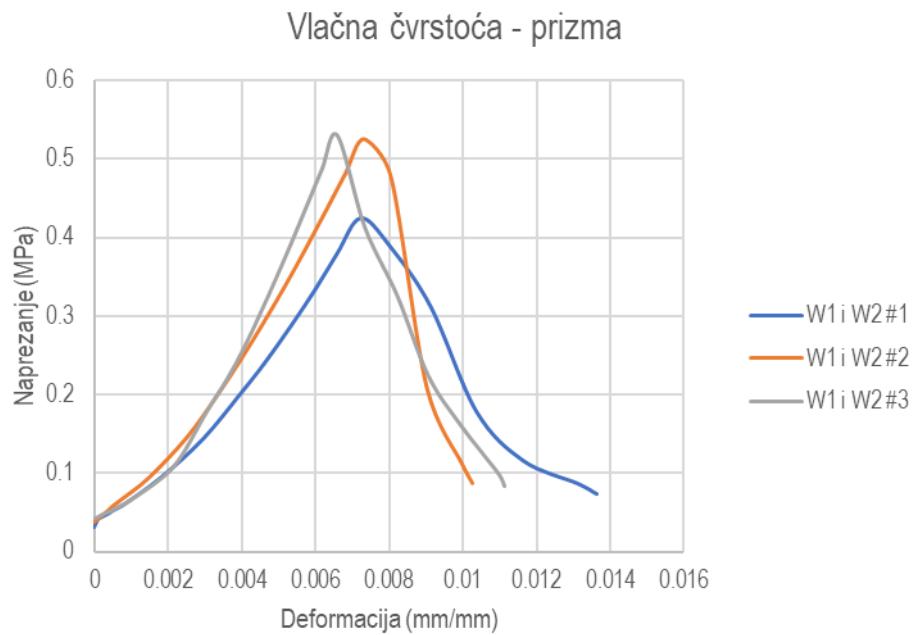
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.5 i 6.6. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama 6.7 (vlačna čvrstoća) i 6.8 (tlačna čvrstoća). U tablici 6.2 sažeto su prikazane čvrstoće uzorka te prosječna čvrstoća određena na svakom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



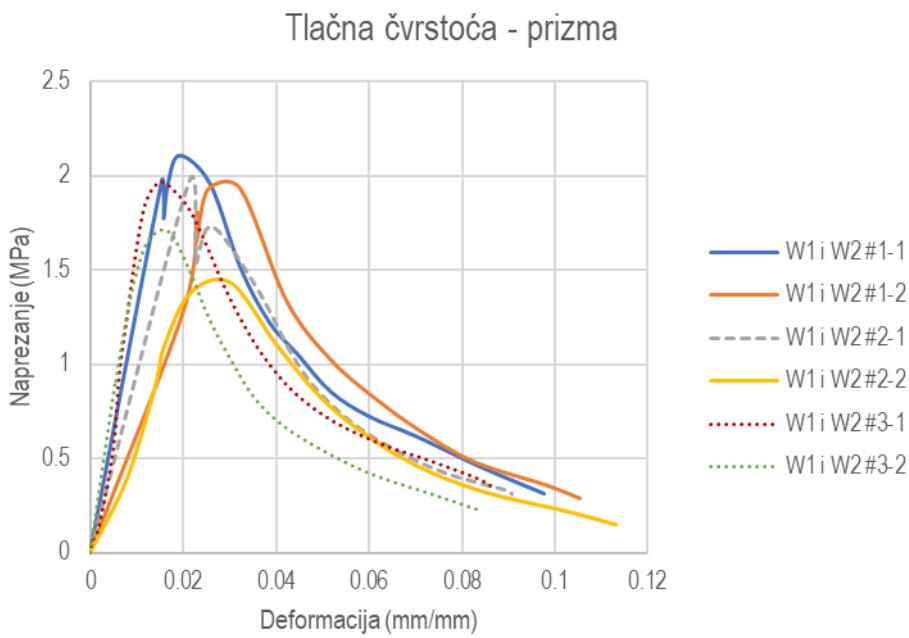
Slika 6.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W1 i W2



Slika 6.7 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W1 i W2



Slika 6.8 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W1 i W2



Slika 6.9 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na przmama – W1 i W2

Tablica 6.3 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W1 i W2

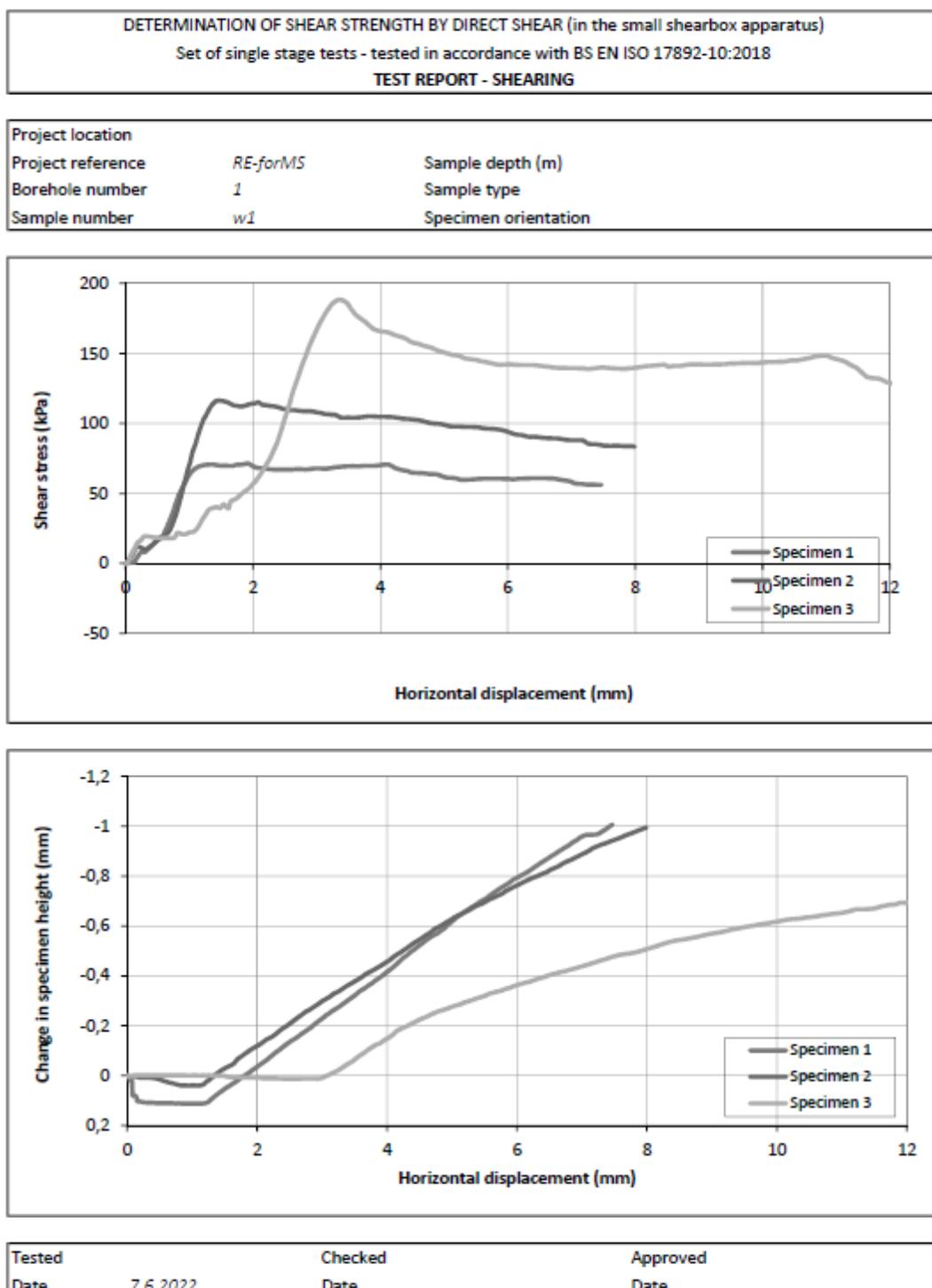
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,13	1,43	1,13
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,23	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,00	1,17	1,12
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,10	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,43	0,53	0,53
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		0,50	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,11 1,93	1,96 1,43	1,97 1,71
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	2,02	1,70	1,84
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	43,36	44,68	39,51
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		42,52	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	77,91	88,89	79,84
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		82,21	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	96,03	71,87	144,03
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		103,98	

Tablica 6.4 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W1 i W2

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,30	2,44	2,31
Prosječna vlažnost (%)		2,35	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,45	2,45	2,46
Prosječna vlažnost (%)		2,45	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	2,42	2,29	2,67
Prosječna vlažnost (%)		2,46	

6.3 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W1 i W2

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama 6.10 i 6.11.



Slika 6.10 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – W1 i W2

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)

Set of single stage tests - tested in accordance with BS EN ISO 17892-10:2018

TEST REPORT - SHEARING

Project location

Project reference RE-forMS

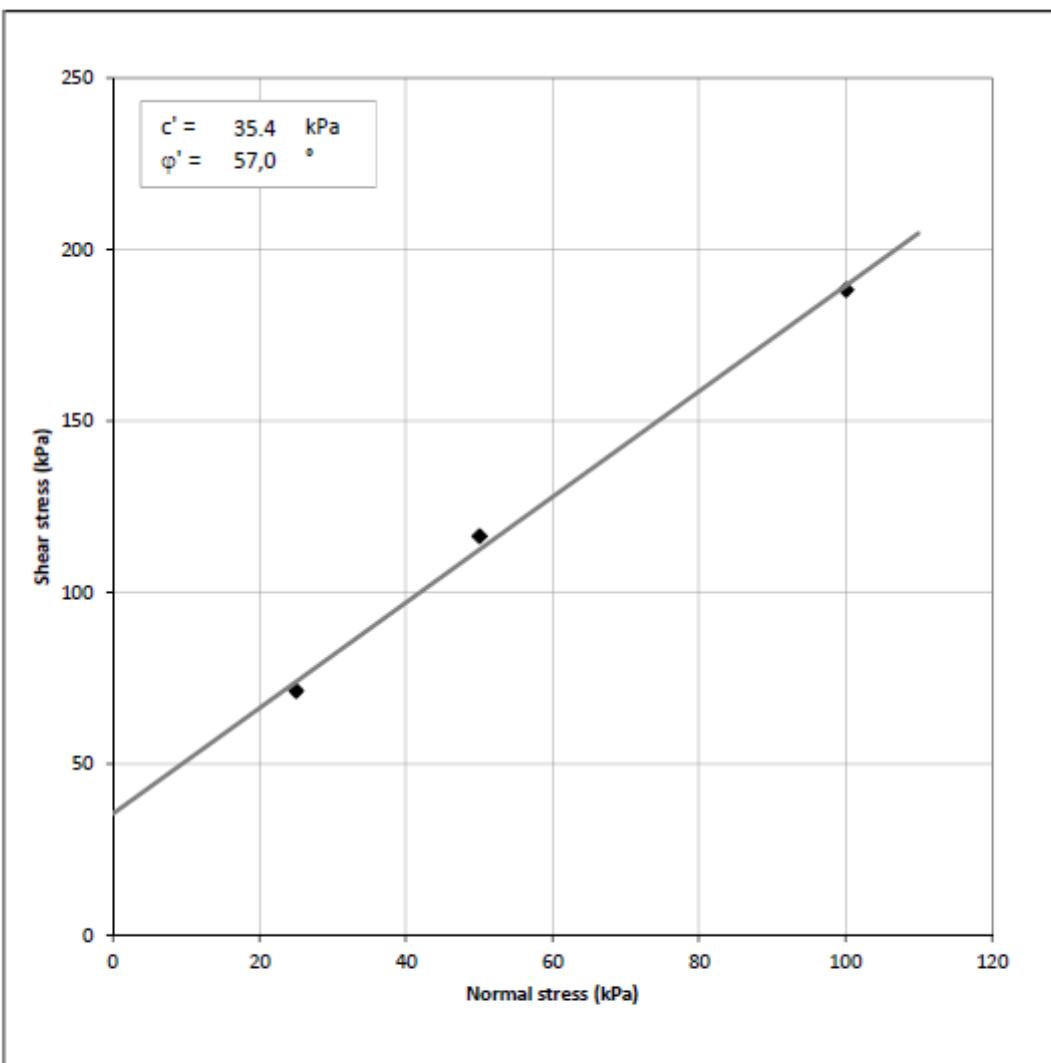
Sample depth (m)

Borehole number 1

Sample type

Sample number w1

Specimen orientation



Tested

Date

Checked

Date

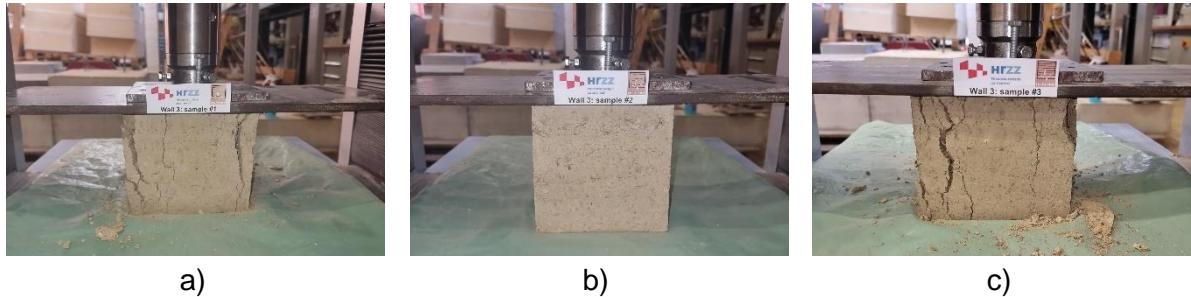
Approved

Date

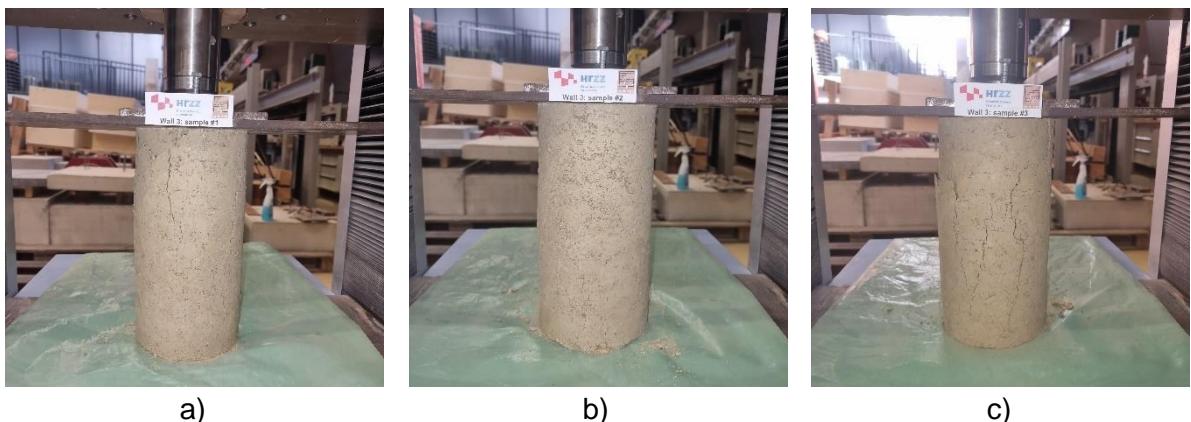
Slika 6.11 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – W1 i W2

6.4 Fotodokumentacija – ispitivanje uzoraka W3 i W4

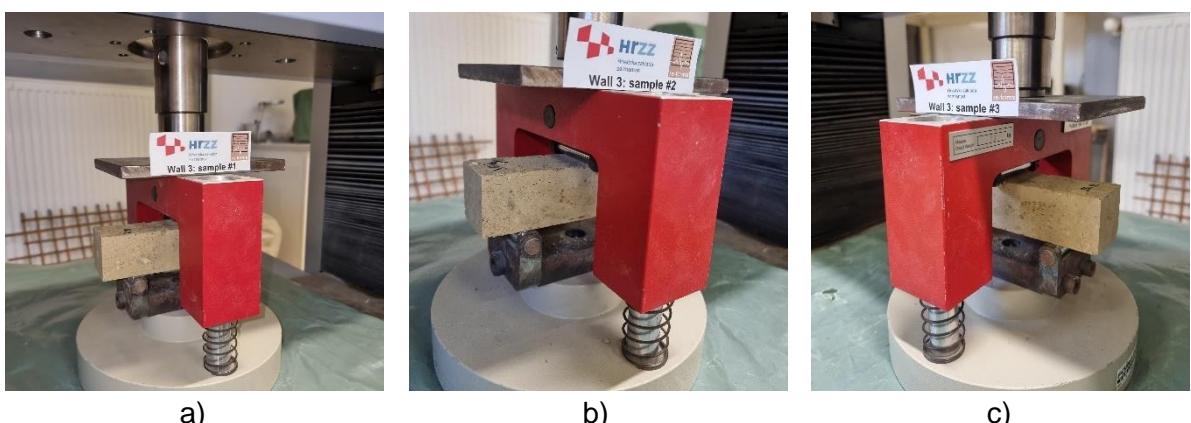
Za par zidova W3 i W4 ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika 6.9) i tri uzorka valjka (slika 6.10), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika 6.11) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika 6.12), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica).



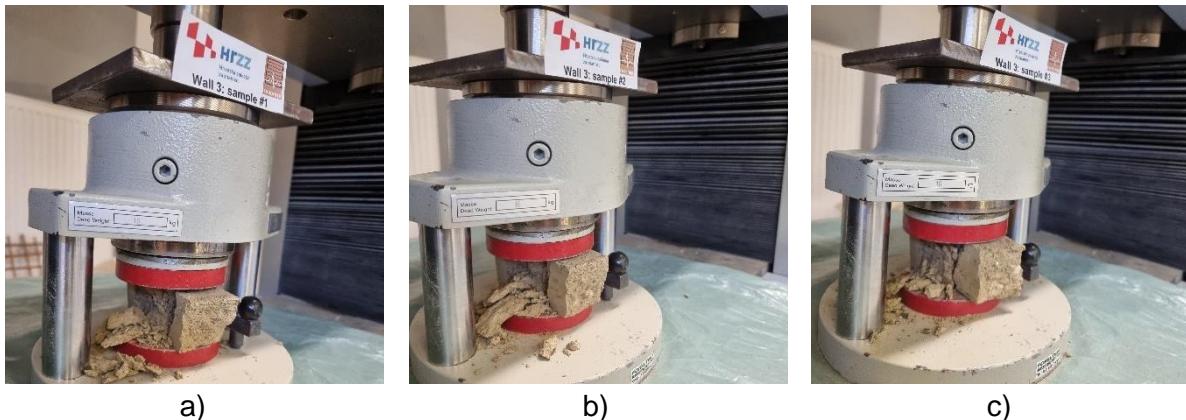
Slika 6.12 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – W3 i W4



Slika 6.13 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - W3 i W4



Slika 6.14 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - W3 i W4

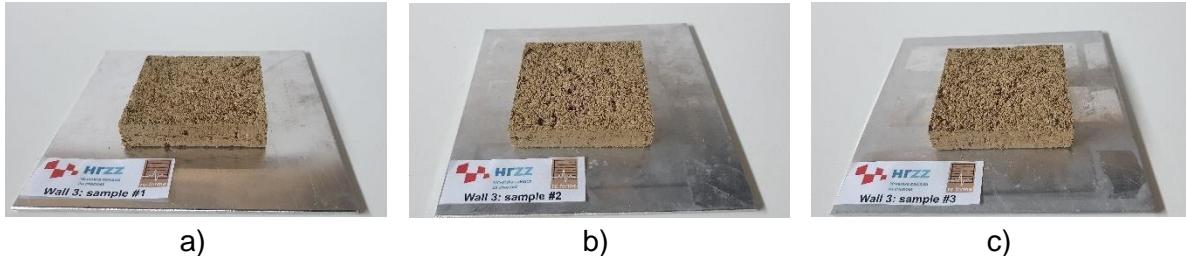


a)

b)

c)

Slika 6.15 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - W3 i W4



a)

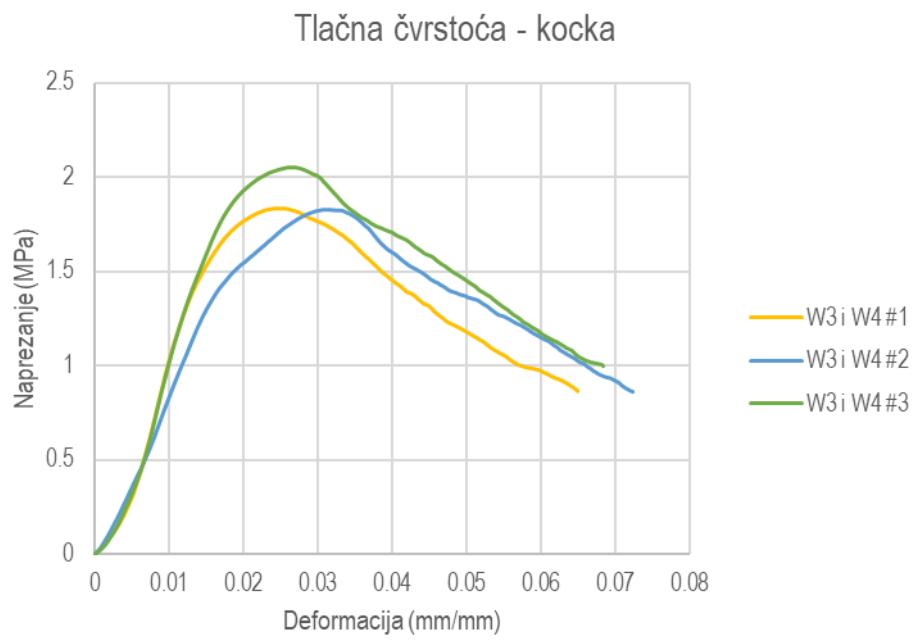
b)

c)

Slika 6.16 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – W3 i W4

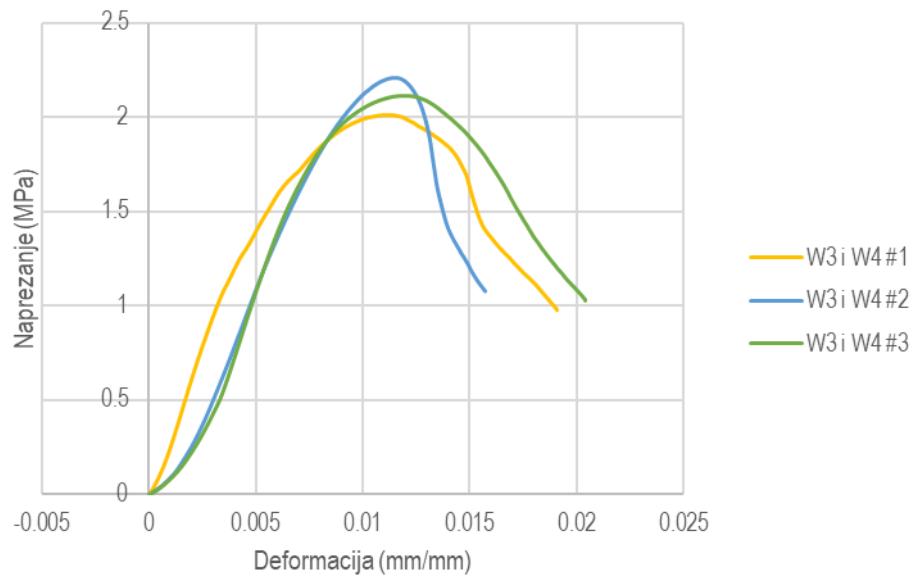
6.5 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W3 i W4

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama 6.17 i 6.18. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama 6.19 (vlačna čvrstoća) i 6.20 (tlačna čvrstoća). U tablici 6.4 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 6.5 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



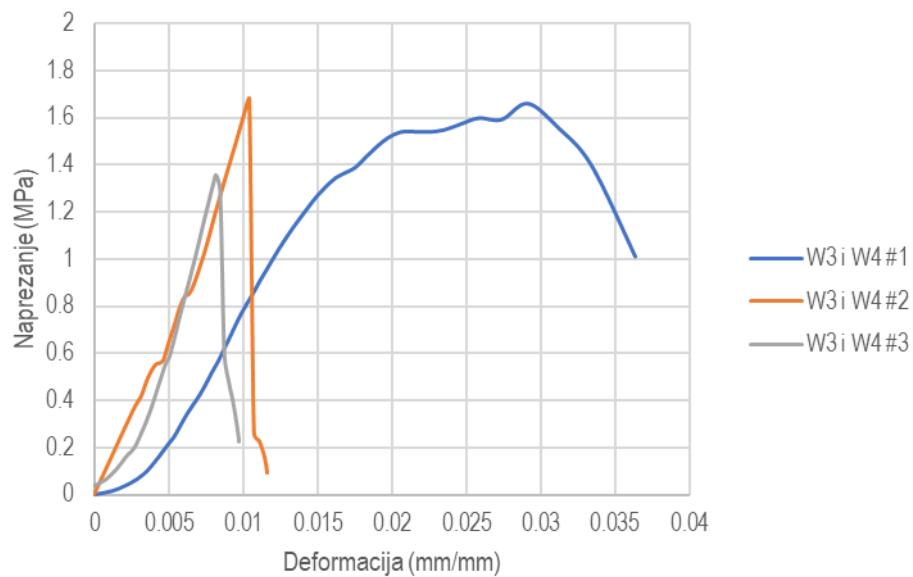
Slika 6.17 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – W3 i W4

Tlačna čvrstoća - valjak

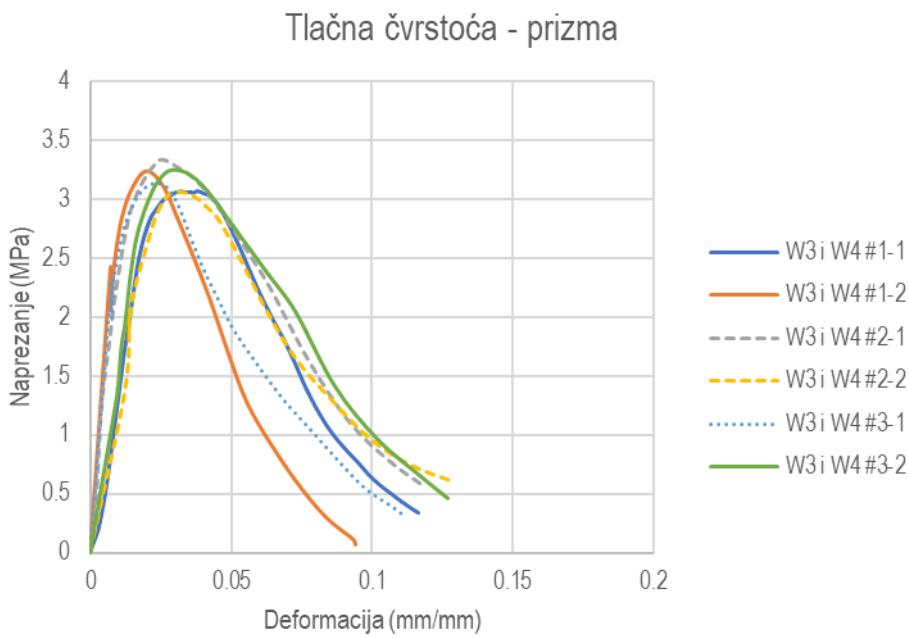


Slika 6.18 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – W3 i W4

Vlačna čvrstoća - prizma



Slika 6.19 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – W3 i W4



Slika 6.20 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – W3 i W4

Tablica 6.5 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – W3 i W4

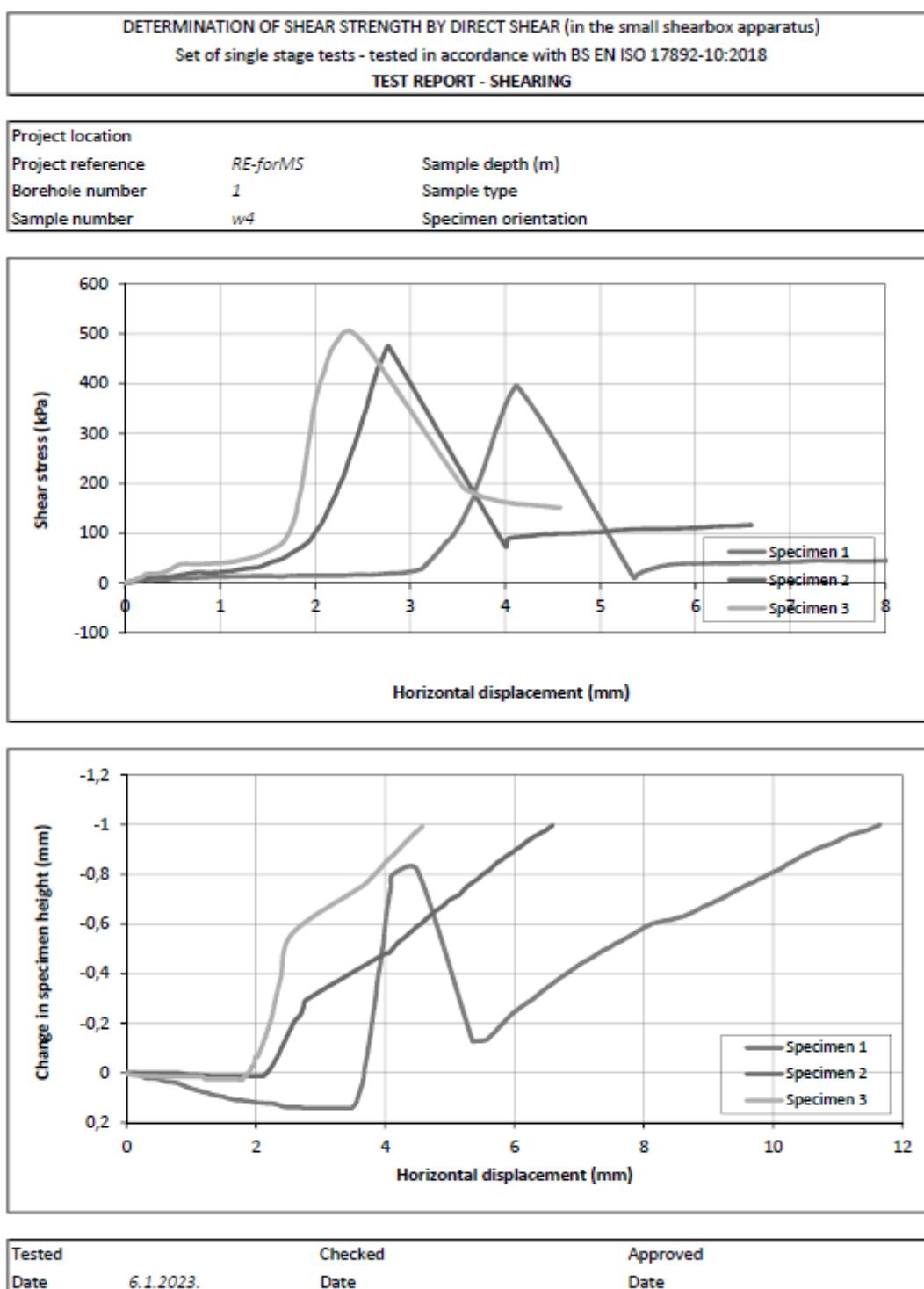
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,83	1,83	2,05
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,90	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,01	2,21	2,11
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		2,11	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,66	1,68	1,35
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,56	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,07	3,24	3,34
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	3,15		3,20
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	77,75		74,50
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		77,84	81,27
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	307,70		185,59
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		221,01	169,75
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	225,33		202,32
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		220,37	216,01

Tablica 6.6 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – W3 i W4

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	3,67	3,22	3,56
Prosječna vlažnost (%)		3,48	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,72	3,02	2,68
Prosječna vlažnost (%)		2,81	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	2,29	2,13	2,13
Prosječna vlažnost (%)		2,18	

6.6 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće – W3 i W4

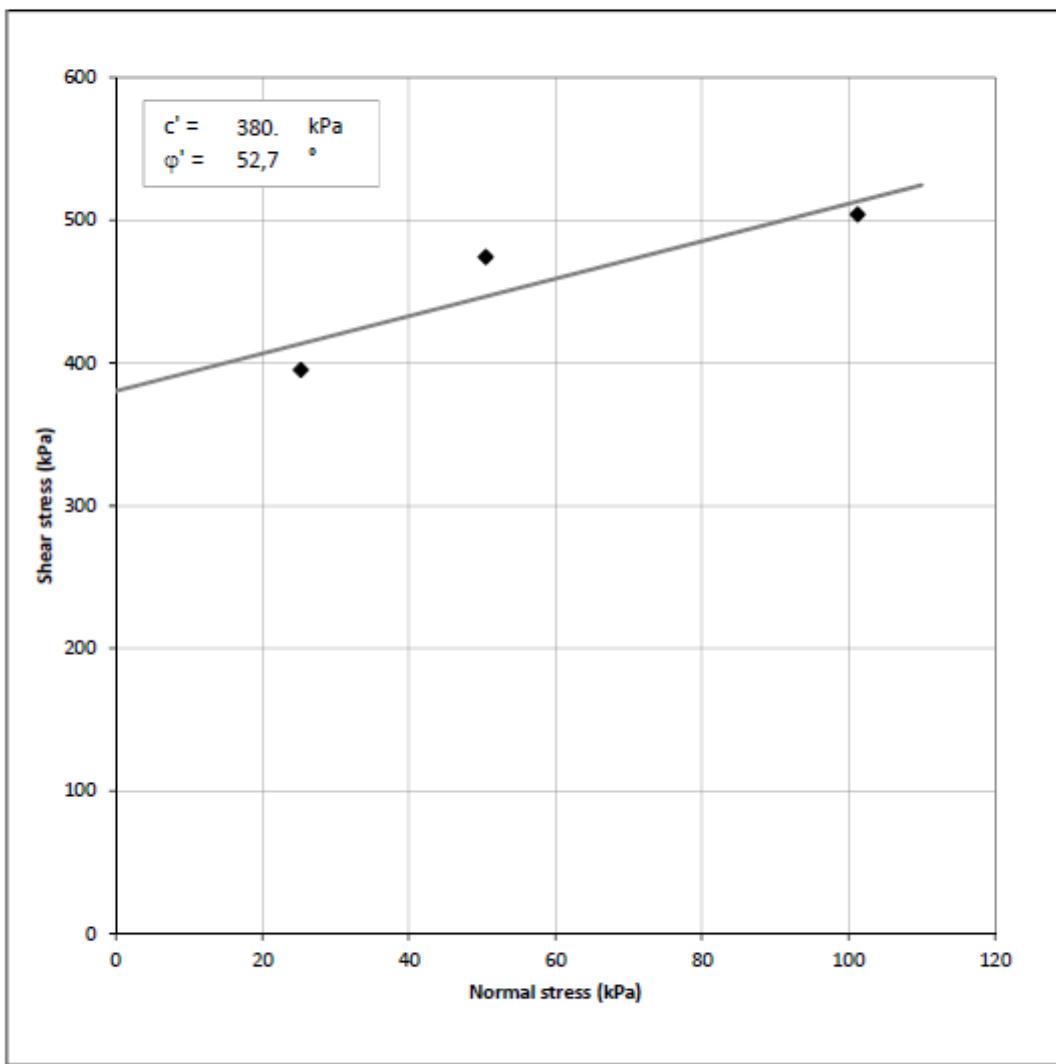
Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama 6.21 i 6.22.



Slika 6.21 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – W3 i W4

DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH BY DIRECT SHEAR (in the small shearbox apparatus)
 Set of single stage tests - tested in accordance with BS EN ISO 17892-10:2018
TEST REPORT - SHEARING

Project location			
Project reference	RE-forMS	Sample depth (m)	
Borehole number	1	Sample type	
Sample number	w4	Specimen orientation	



Tested	Checked	Approved
Date	Date	Date

Slika 6.22 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – W3 i W4

7. 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 oplate, 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 je utvrđeno da mješavina od koje su izgrađeni zidovi ne utječe značajno na potresno ponašanje zidova od nabijene zemlje. Maksimalna sila je u *push* smjeru iznosila 18.18 – 19.73 kN, dok je u *pull* smjeru iznosila 17.38 – 19.92 kN. Maksimalna sila je uglavnom odgovarala pomaku od oko 5 mm, uz iznimku zida W3 na kojemu se maksimalna sila pri pomaku od oko 7.5 mm. Uz to, proučavanjem razvoja pukotina nakon triju ciklusa ispitivanja, može se uočiti da je stanje LS3 limit za zidove od nabijene zemlje (El-Nabouch i dr., 2016.), što odgovara pomaku vrha zida oko 5 mm. Nadalje, određena je i duktilnost zidova od nabijene zemlje na temelju bilinearne idealizacije. Pritom je faktor duktilnosti iznosio 6.26 – 7.30.

Uz to, provedeno je i ispitivanje materijalnih svojstava svake skupine uzoraka, izrađenih od mješavina RE1 i RE2. Tlačna čvrstoća ispitana je na kockama, valjcima i prizmama te su uočene zнатне razlike u vrijednostima čvrstoće, posebno između „velikih“ uzoraka (kocka i valjak) i „malih“ uzoraka (prizme), pri čemu su veće vrijednosti tlačne čvrstoće uočene na manjim uzorcima. Vlačna je čvrstoća ispitana na uzorcima prizmi, prema normi za ispitivanje morta. Posmična je čvrstoća ispitana na malim pločicama u uređaju za direktni posmik, dok je koeficijent toplinske provodljivosti ispitana na velikim pločicama u uređaju FOX200. Valja napomenuti da su uzorci izrađeni od mješavine RE2, koje odgovaraju zidovima W3 i W4 pokazali veće vrijednosti čvrstoće i krutosti.

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.
- El-Naboulsi, Ranim i dr. 2016. Seismic Assessment of Rammed Earth Walls Using Pushover Tests. *Procedia Engineering* 145:1185–92.
- El-Naboulsi, Ranim; 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
- Miccoli, Lorenzo; Drougas, 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 28 dana

U ovome projektnom razdoblju, provedena je izrada šest različitih grupa uzoraka na kojima je provedeno ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava, koja su prikazana u nastavku. Svi su uzorci ispitani nakon njege u kontroliranim uvjetima (25 ± 2 °C, 50 ± 5 % RH) tijekom 28 dana.

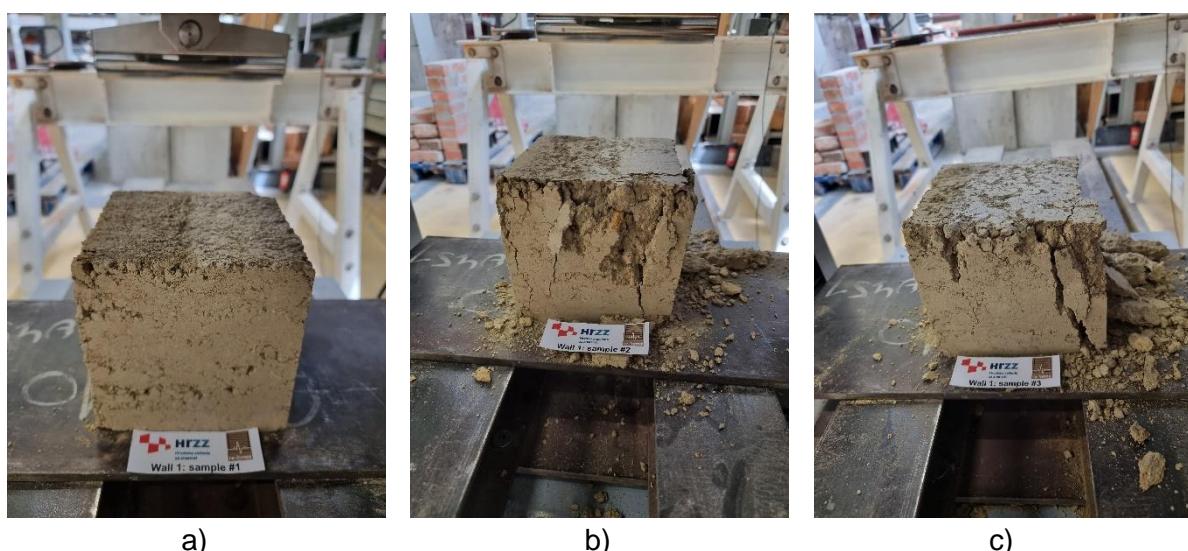
Tablica P.1 Popis uzoraka ispitanih tijekom Razdoblja 2

Oznaka mješavine	Oblik i broj uzoraka					Ukupno uzoraka
	kocke (15x15x15 cm)	valjci (15x30 cm)	prizme (4x4x16 cm)	male pločice (10x10x2 cm)	velike pločice (15x15x2,5 cm)	
RE1 (W1 i W2)	3	3	3*	3	3	15
RE2 (W3 i W4)	3	3	3*	3	3	15
RE2+P	3	3	-	3	-	9
RE2+K	3	3	-	3	-	9
RE2+V4	3	3	3*	3	3	15
RE1-rec	3	3	3*	3	3	15
Ukupno uzoraka	18	18	12	18	12	78*

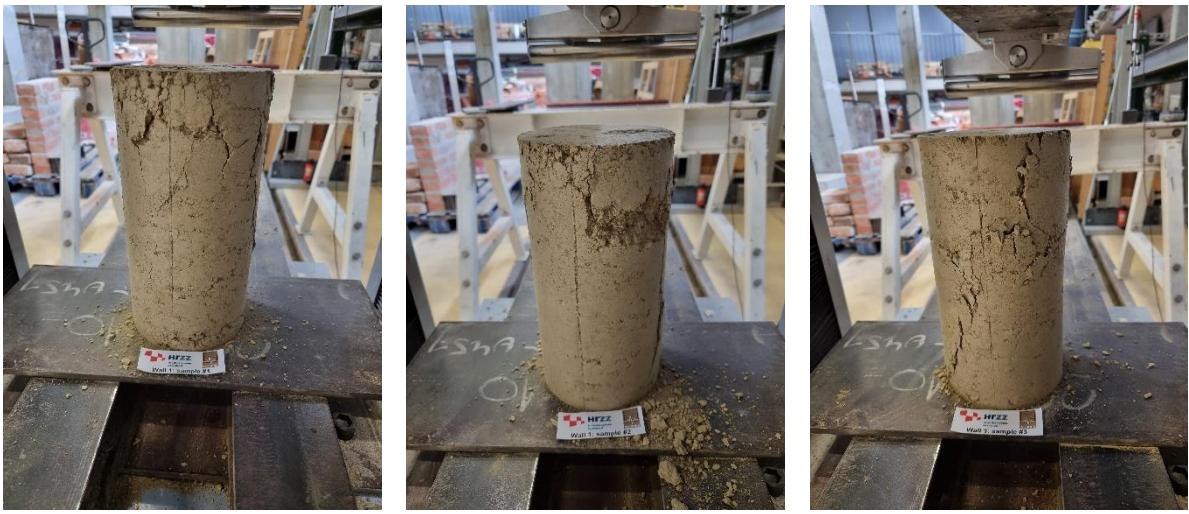
* prilikom ispitivanja prizmi na savijanje, nastaju dodatna dva uzorka koja je moguće ispitati na tlak, čime se ukupni broj uzoraka povećava za 24, što u konačnici iznosi 102 ispitna uzorka.

I. Ispitivanje uzoraka W1-W2 (RE1)

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 kocke (slika P.1) i tri valjka (slika P.2), vlačna čvrstoća na savijanje na tri prizme (slika P.3) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri prizme (slika P.4), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem (ukupno 6 polovica). Slika P.5 prikazuje uzorke na kojima je određena posmična čvrstoća.



Slika P.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE1



a)

b)

c)

Slika P.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - RE1



a)

b)

c)

Slika P.3 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - RE1

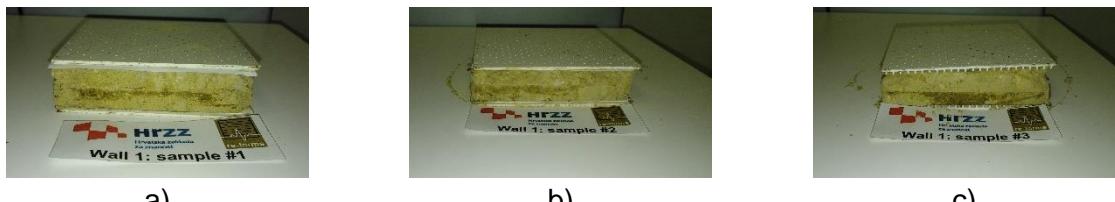


a)

b)

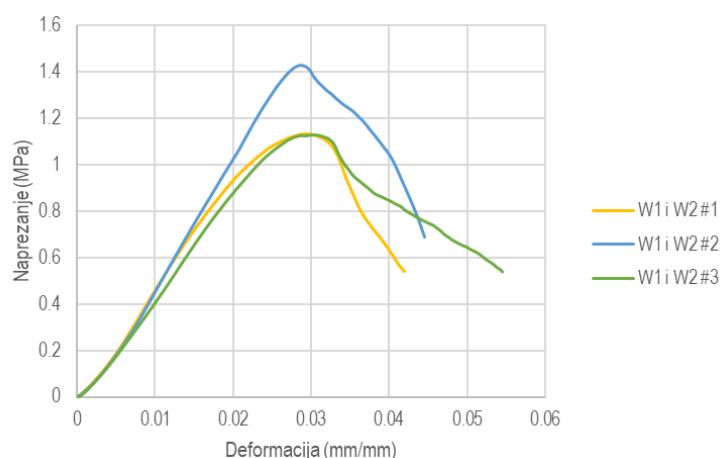
c)

Slika P.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - RE1

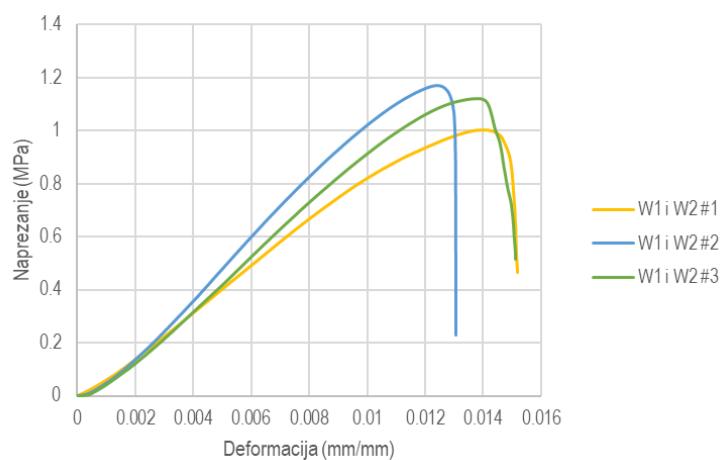


Slika P.5 Uzorci nakon ispitivanja posmične čvrstoće - RE1

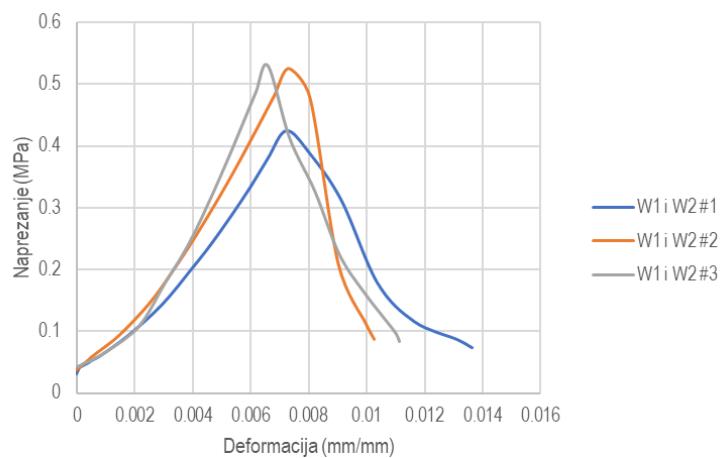
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.6 i P.7. Rezultati ispitivanja prizmi prikazani su na slikama P.8 (vlačna čvrstoća) i P.9 (tlačna čvrstoća). U tablici P.2 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzoraka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici P.3 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



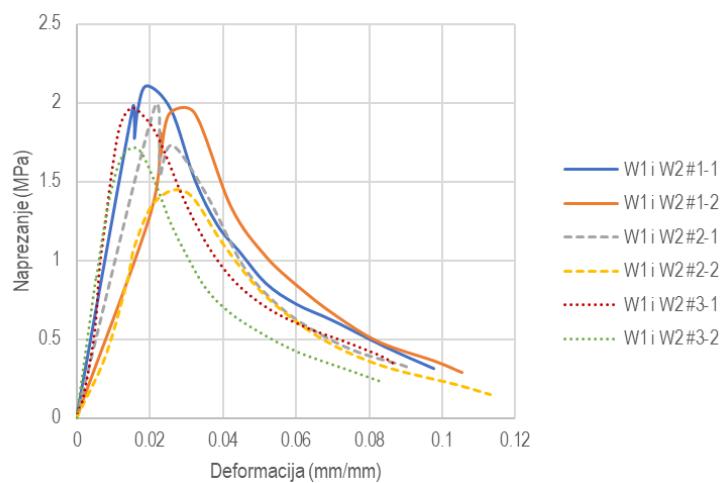
Slika P.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE1



Slika P.7 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE1



Slika P.8 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – RE1



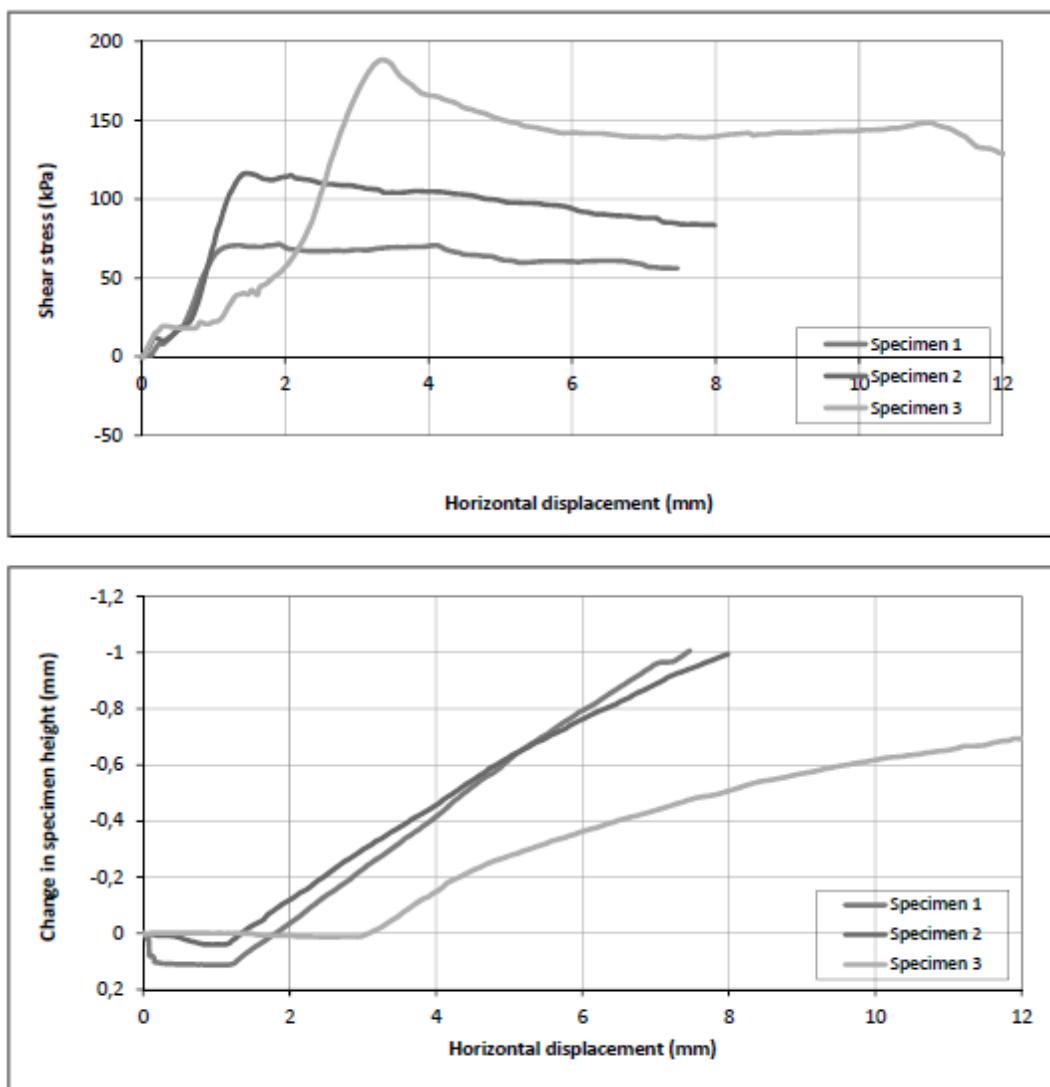
Slika P.9 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – RE1

Tablica P.2 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – RE1

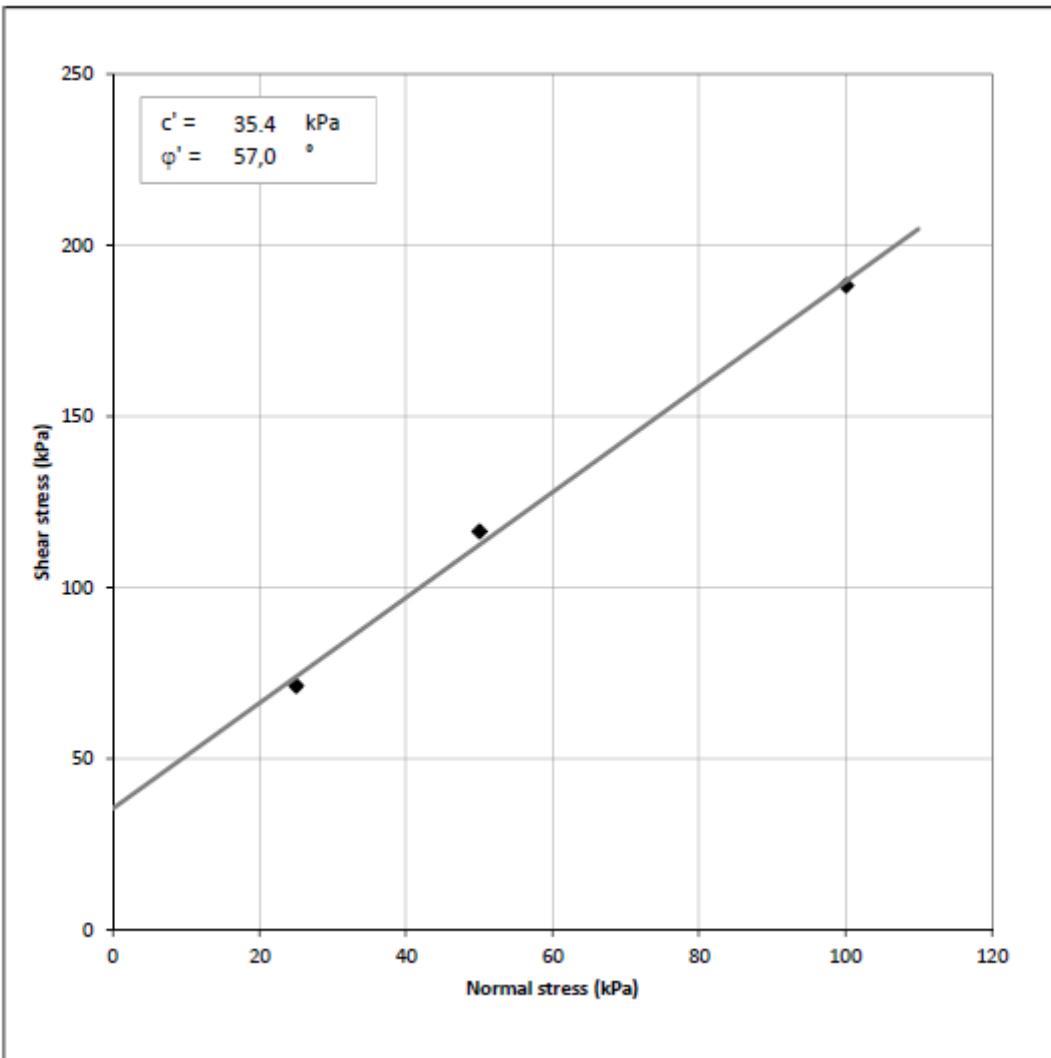
	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,13	1,43	1,13
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,23	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,00	1,17	1,12
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,10	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,43	0,53	0,53
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		0,50	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,11	1,93	1,96
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,02		1,43
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	43,36	44,68	1,97
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		42,52	1,71
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	77,91	88,89	1,84
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		82,21	39,51
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	96,03	71,87	79,84
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		144,03	
		103,98	

Tablica P.3 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – RE1

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,30	2,44	2,31
Prosječna vlažnost (%)		2,35	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,45	2,45	2,46
Prosječna vlažnost (%)		2,45	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	2,42	2,29	2,67
Prosječna vlažnost (%)		2,46	



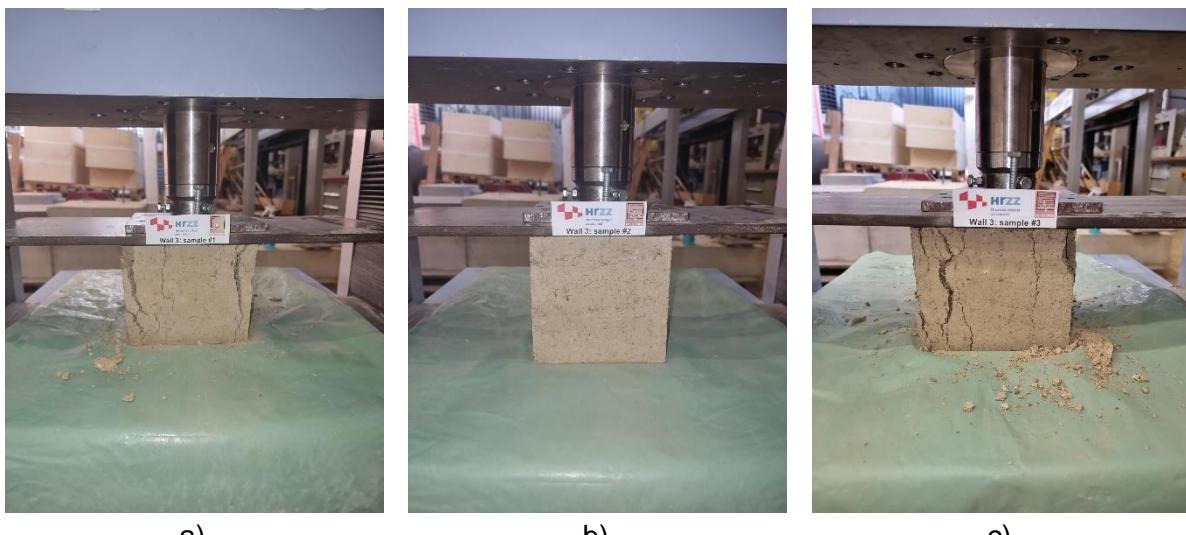
Slika P.10 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE1



Slika P.11 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE1

II. Ispitivanje uzorka W3-W4 (RE2)

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 P.12) i tri uzorka valjka (slika P.13), vlačna čvrstoća na savijanje na tri uzorka prizme (slika P.14) te tlačna čvrstoća na polovicama od tri uzorka prizme (slika P.15), preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica). Slike P.16 i P.17 prikazuju uzorke na kojima je određena posmična čvrstoća.



a)

b)

c)

Slika P.12 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE2

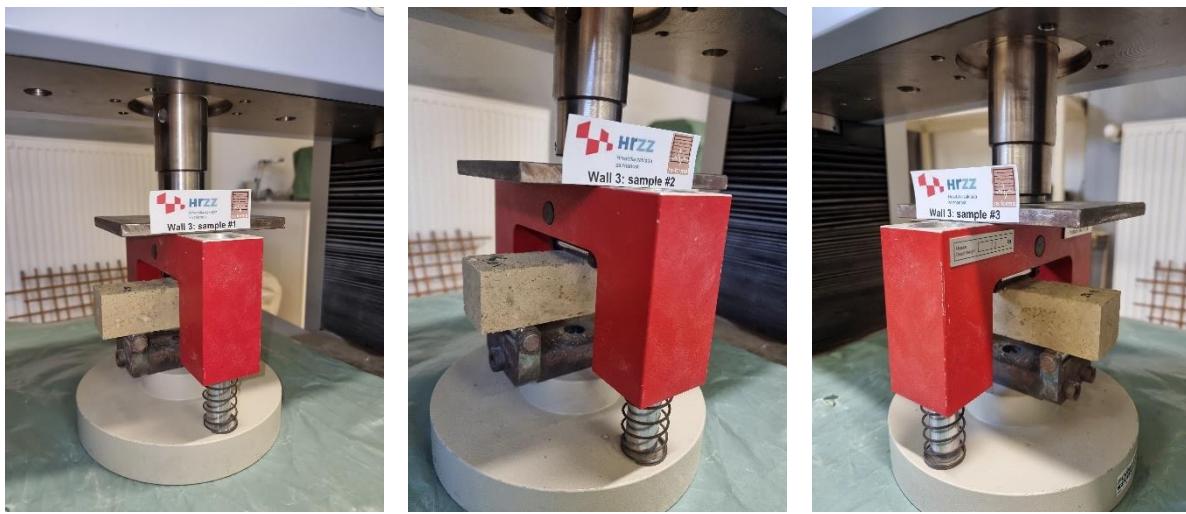


a)

b)

c)

Slika P.13 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima - RE2



a)

b)

c)

Slika P.14 Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje na prizmama - RE2

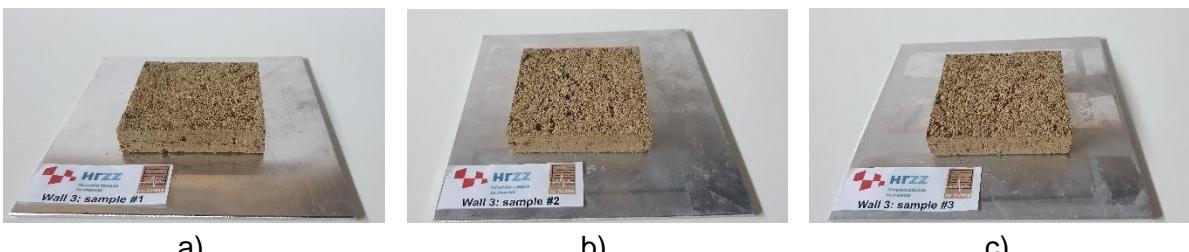


a)

b)

c)

Slika P.15 Ispitivanje tlačne čvrstoće na prizmama - RE2



a)

b)

c)

Slika P.16 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – RE2

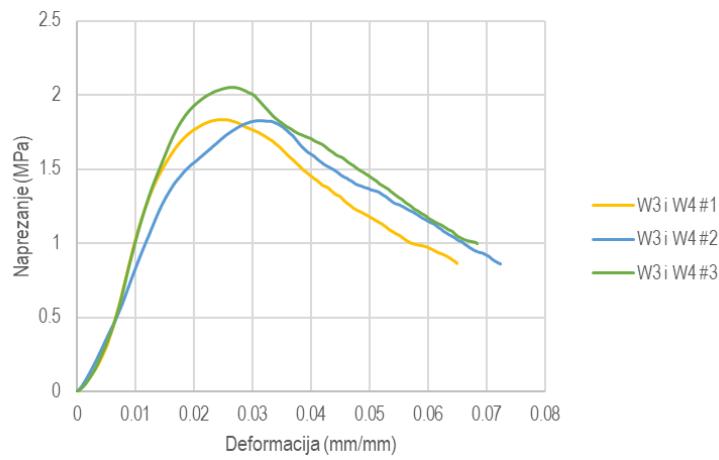


a)

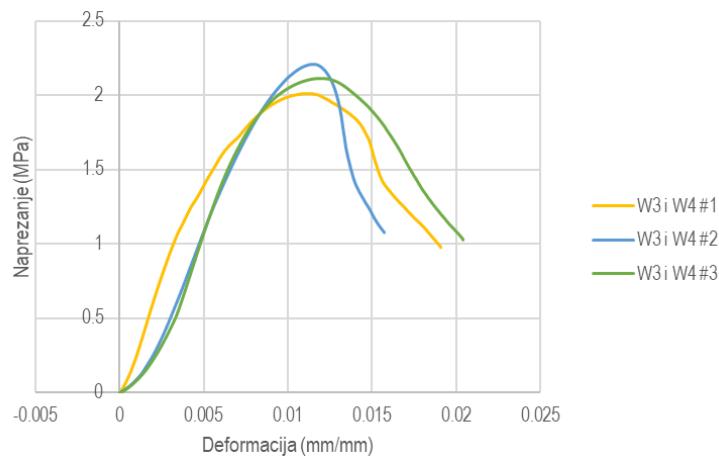
b)

Slika P.17 Uzorci nakon ispitivanja posmične čvrstoće – RE2: a) oblik sloma za uzorke opterećene vertikalnim opterećenjem manjim od 100 kPa, b) oblik sloma za uzorke opterećene vertikalnim opterećenjem od 100 kPa

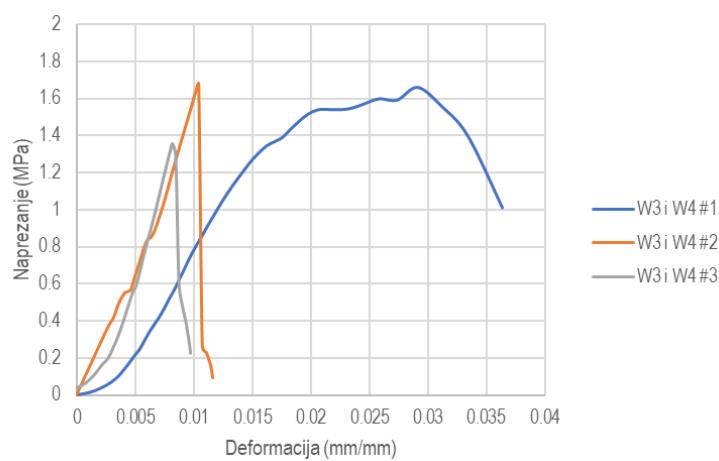
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.18 i P.19. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama P.20 (vlačna čvrstoća) i P.21 (tlačna čvrstoća). U tablici P.4 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzorka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici P.5 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



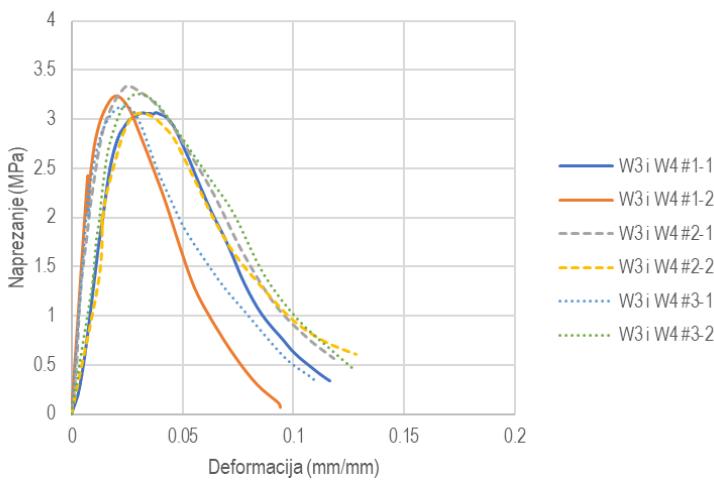
Slika P.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE2



Slika P.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE2



Slika P.20 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – RE2



Slika P.21 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – RE2

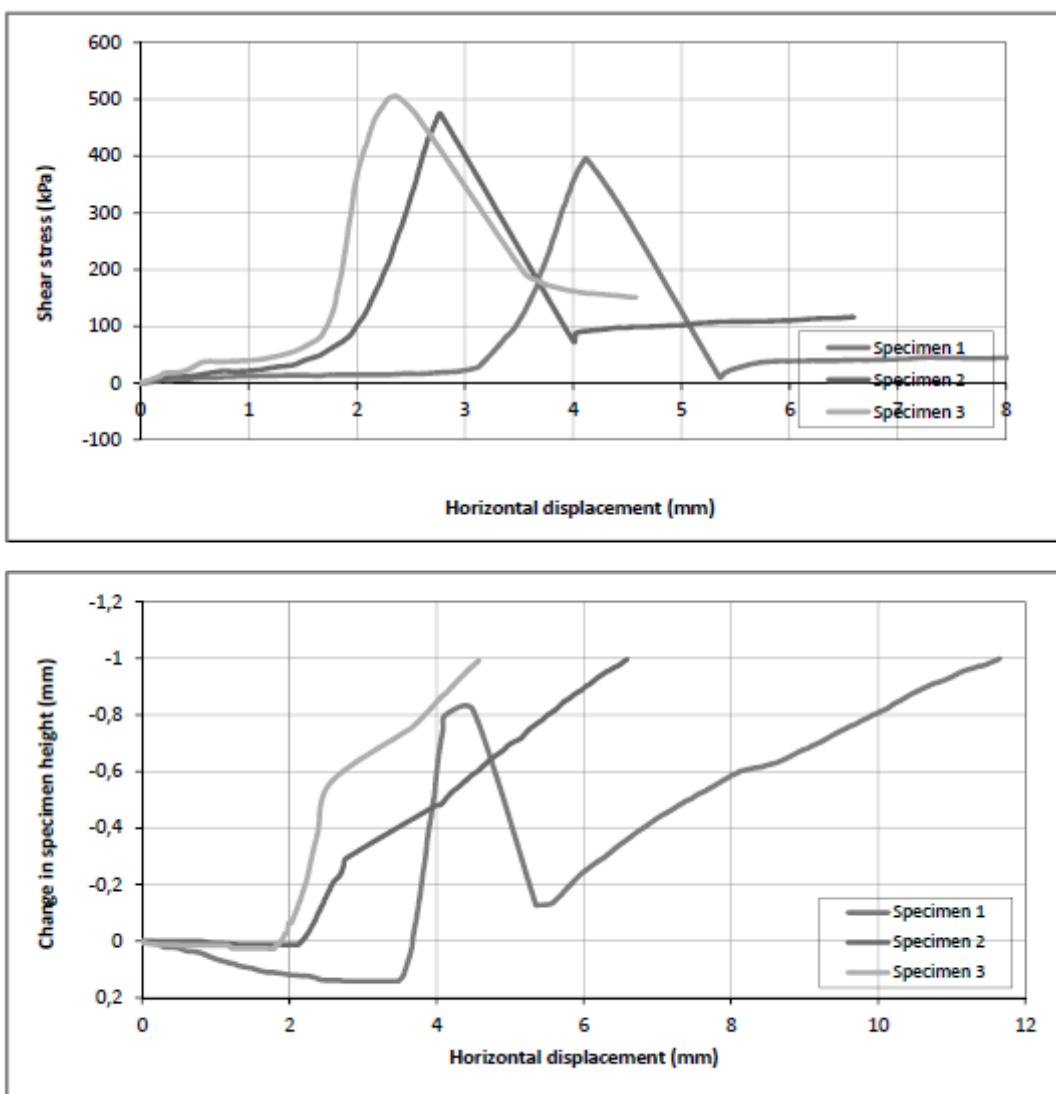
Tablica P.4 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – RE2

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,83	1,83	2,05
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,90	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,01	2,21	2,11
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		2,11	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,66	1,68	1,35
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		1,56	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,07	3,24	3,34
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	3,15	3,20	3,19
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	77,75	74,50	81,27
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		77,84	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	307,70	185,59	169,75
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		221,01	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	225,33	202,32	220,37
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		216,01	

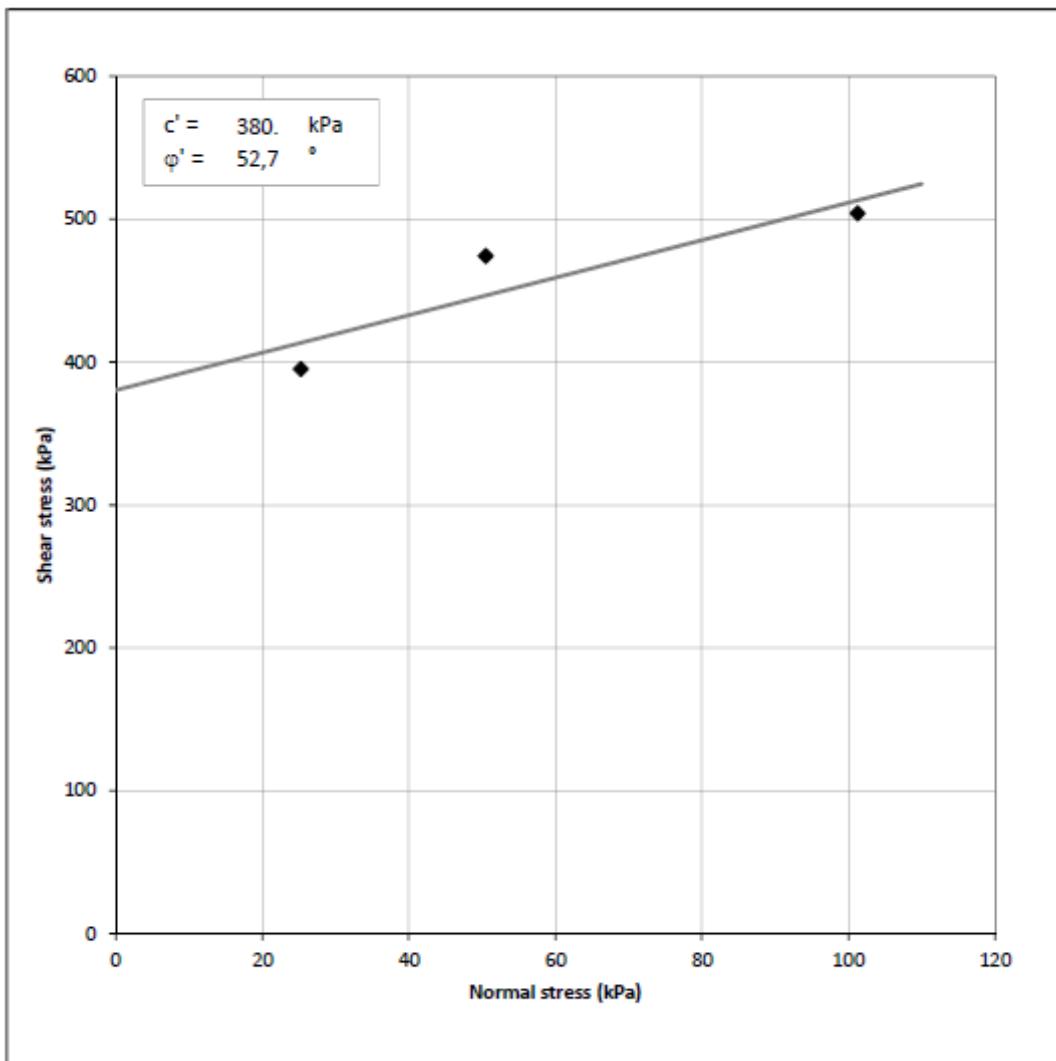
Tablica P.5 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – RE2

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	3,67	3,22	3,56
Prosječna vlažnost (%)		3,48	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,72	3,02	2,68
Prosječna vlažnost (%)		2,81	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	2,29	2,13	2,13
Prosječna vlažnost (%)		2,18	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama P.22 i P.23.



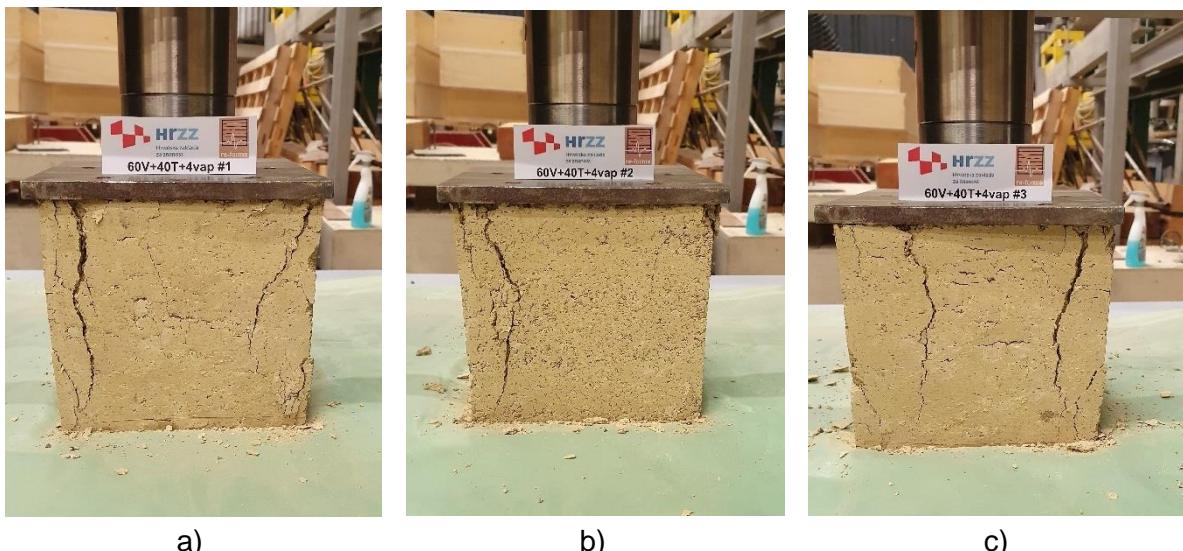
Slika P.22 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE2



Slika P.23 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE2

III. Ispitivanje uzorka 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 % zemljaniog materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika P.24) i tri uzorka valjka (slika P.25). Slika P.26 prikazuje uzorce na kojima je određena posmična čvrstoća.

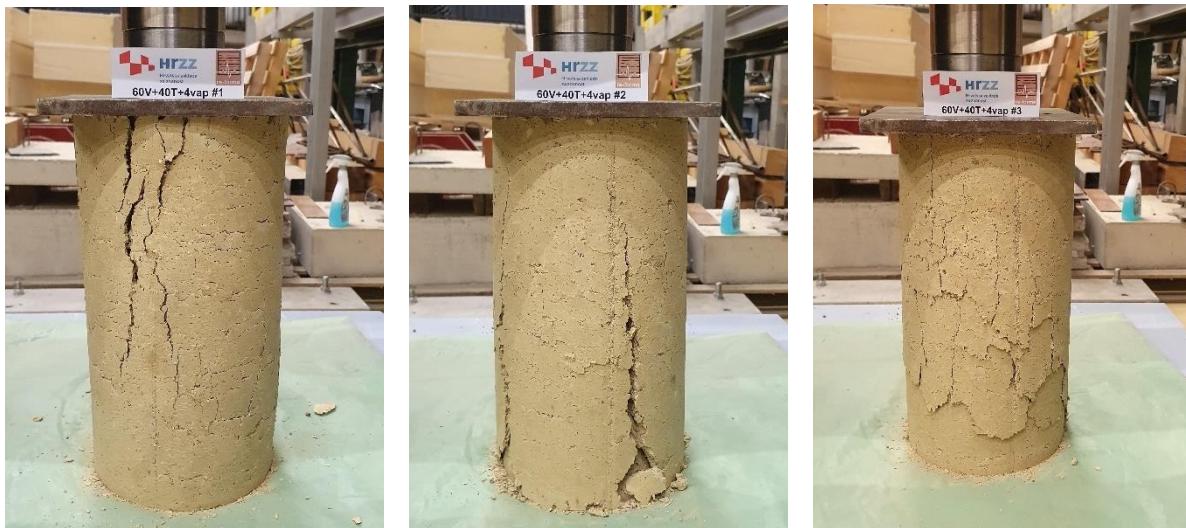


a)

b)

c)

Slika P.24 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE2+V4

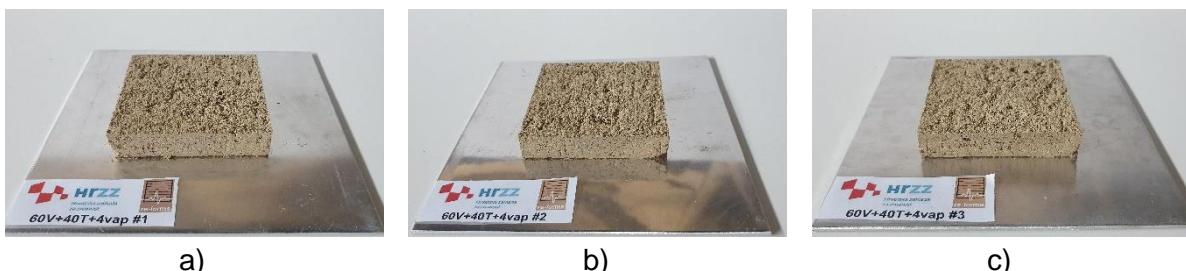


a)

b)

c)

Slika P.25 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+V4



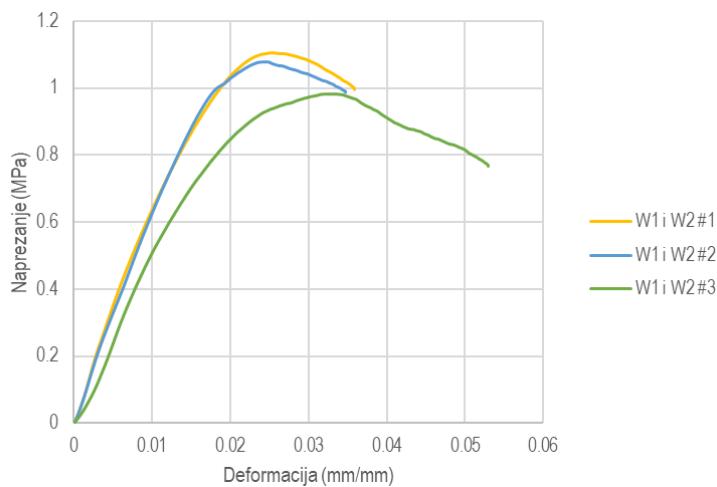
a)

b)

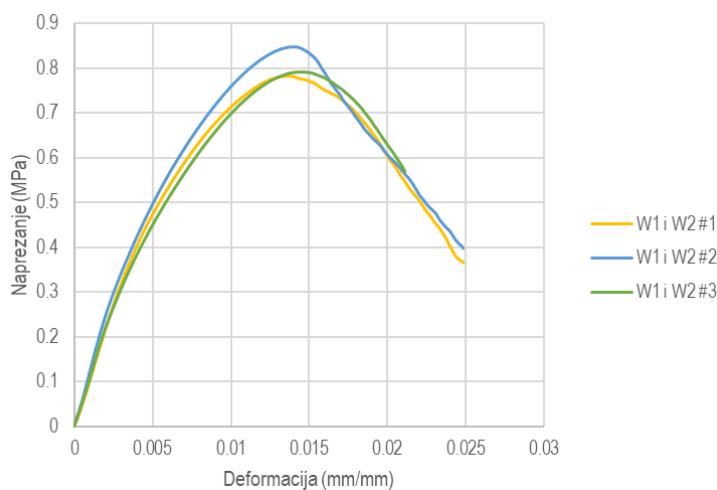
c)

Slika P.26 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – RE2+V4

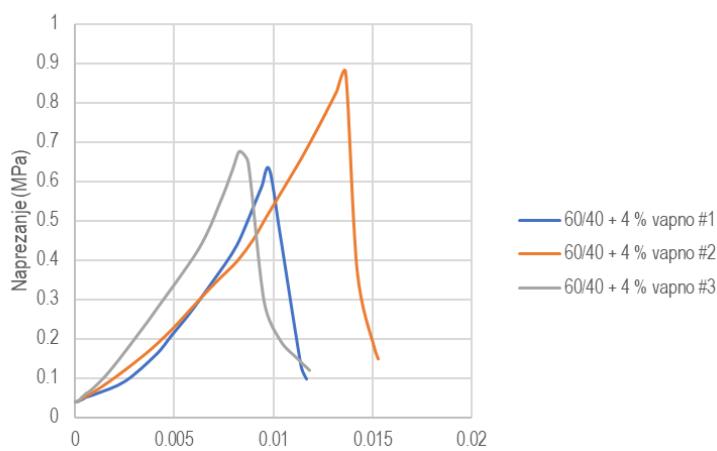
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.27 i P.28. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama P.29 (vlačna čvrstoća) i P.30 (tlačna čvrstoća). U tablici P.6 sažeto su prikazane čvrstoće uzorka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzorka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici P.7 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



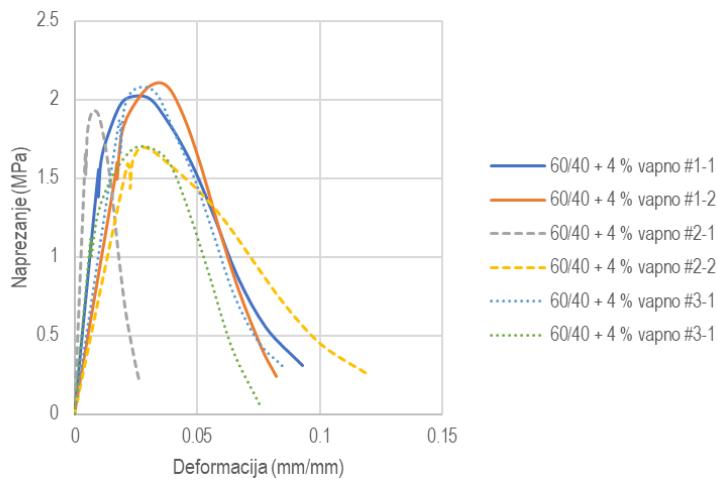
Slika P.27 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE2+V4



Slika P.28 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+V4



Slika P.29 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – RE2+V4



Slika P.30 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – RE2+V4

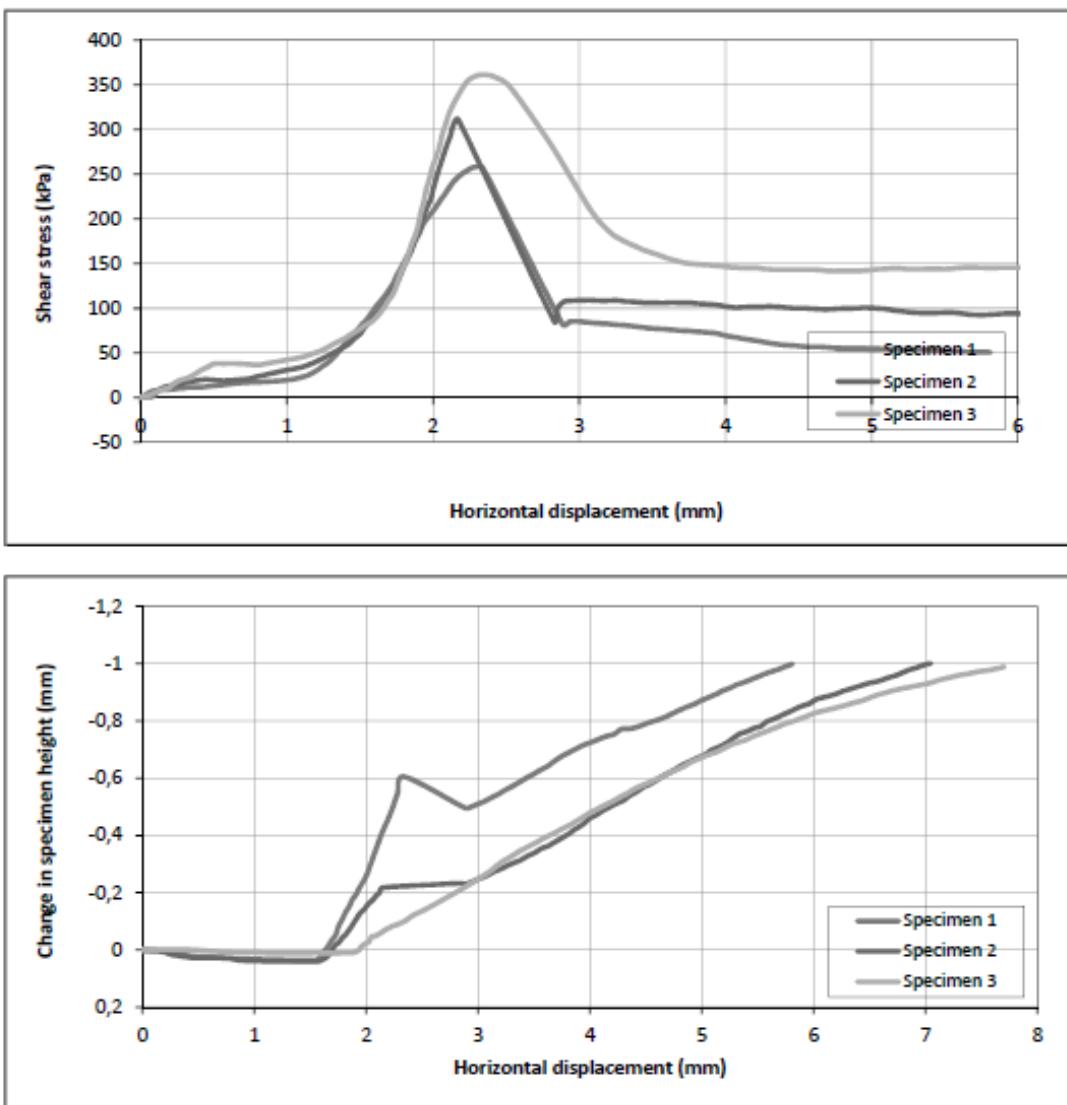
Tablica P.6 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – RE2+V4

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,11	1,08	0,98
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,06	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	0,78	0,85	0,79
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		0,81	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	0,63	0,88	0,68
Srednja vlačna čvrstoća – prizma (MPa)		0,73	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	2,02	2,09	1,92
Srednja tlačna čvrstoća (MPa)	2,06	1,81	1,69
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	70,73	66,24	311,85
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		149,61	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	107,74	122,64	108,48
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		112,95	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	124,66	83,55	135,88
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		114,70	

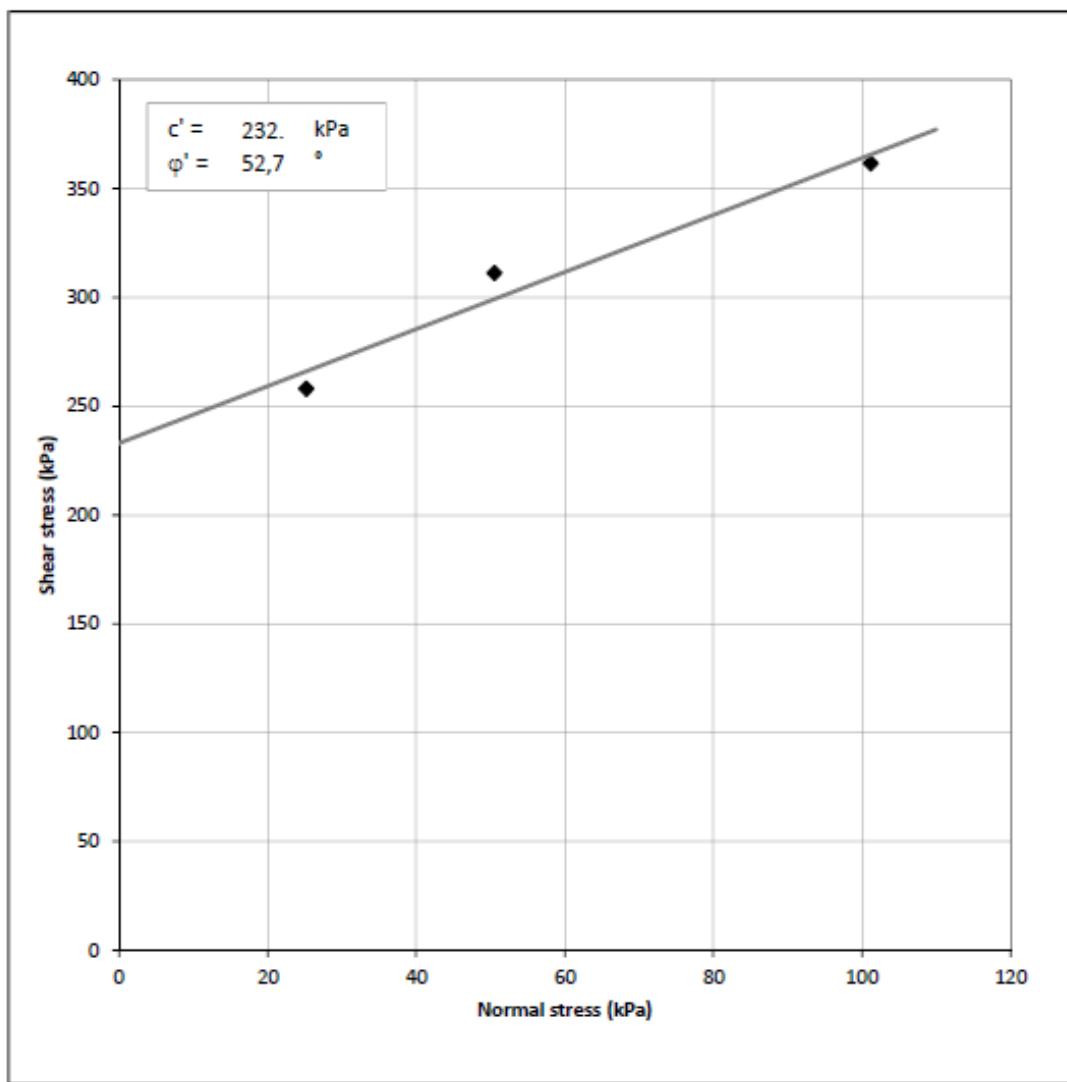
Tablica P.7 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - RE2+V4

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,40	2,19	2,26
Prosječna vlažnost (%)		2,28	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,26	2,09	2,09
Prosječna vlažnost (%)		2,15	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,60	1,59	1,60
Prosječna vlažnost (%)		1,60	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama P.31 i P.32.



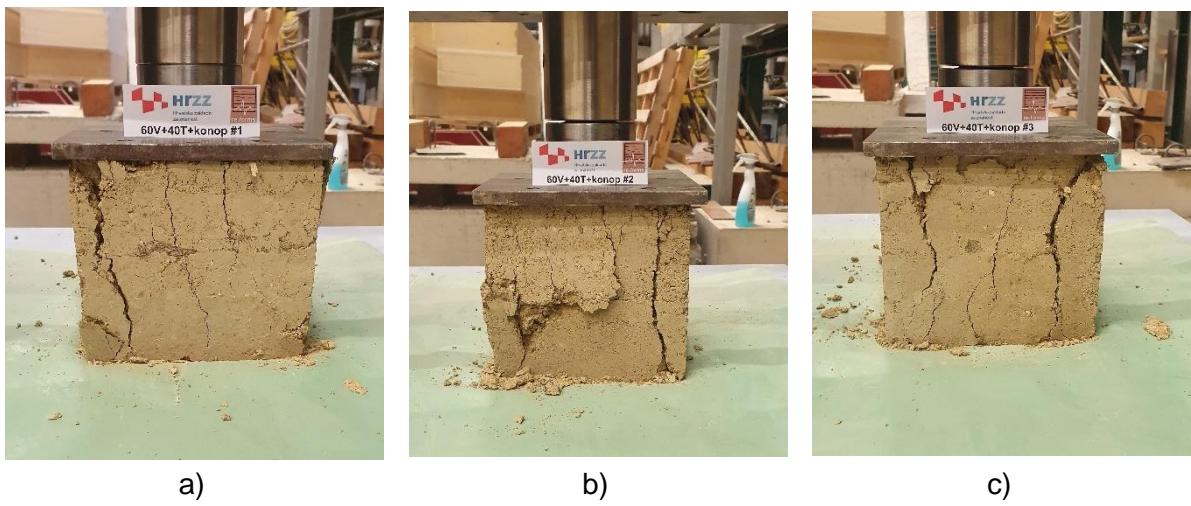
Slika P.31 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE2+V4



Slika P.32 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE2+V4

IV. Ispitivanje uzorka s konopljom

Kako bi se provjerio utjecaj dodatka konoplje, izrađeni su uzorci sa dodatkom konoplje između slojeva nabijene zemlje. Pritom je kao referentna mješavina odabrana mješavina od koje su izrađeni zidovi W3 i W4, u sastavu 60 % zemljjanog materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Vlakna konoplje ugrađena su u sloj u polovici visine kocke. U valjcima su vlakna ugrađena između dva sloja na 1/3 i 2/3 visine valjka. Vlakna konoplje narezana su na dužinu od oko 5 cm. Vlakna su se prije ugradnje namakala u vodi tijekom jednog sata, a neposredno prije ugradnje posušena su brisanjem papirnatim ubrusom. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika P.33) i tri uzorka valjka (slika P.34). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog poteškoća pri izradi uzorka prizama s dodatkom konoplje između slojeva, uzrokovana malim dimenzijama uzorka. Slike P.35 i P.36 prikazuju uzorce na kojima je određena posmična čvrstoća.



a)

b)

c)

Slika P.7 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE2+K

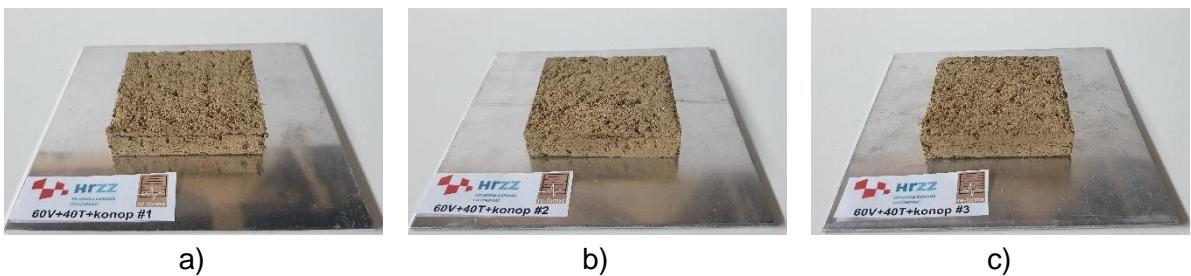


a)

b)

c)

Slika P.8 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+K



a)

b)

c)

Slika P.35 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – RE2+K



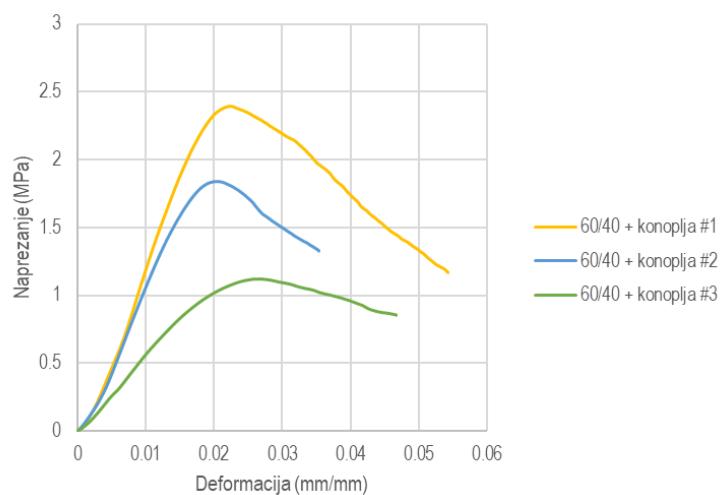
a)



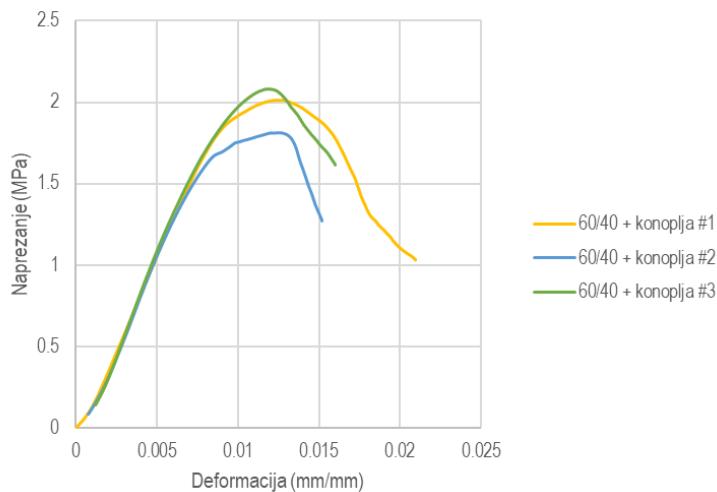
b)

Slika P.36 Uzorci nakon ispitivanja posmične čvrstoće – RE2+K: a) prilikom vađenja iz uređaja, b) nakon rastvaranja uzorka

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.37 i P.38. U tablici P.8 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 P.9 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika P.37 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE2+K



Slika P.38 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+K

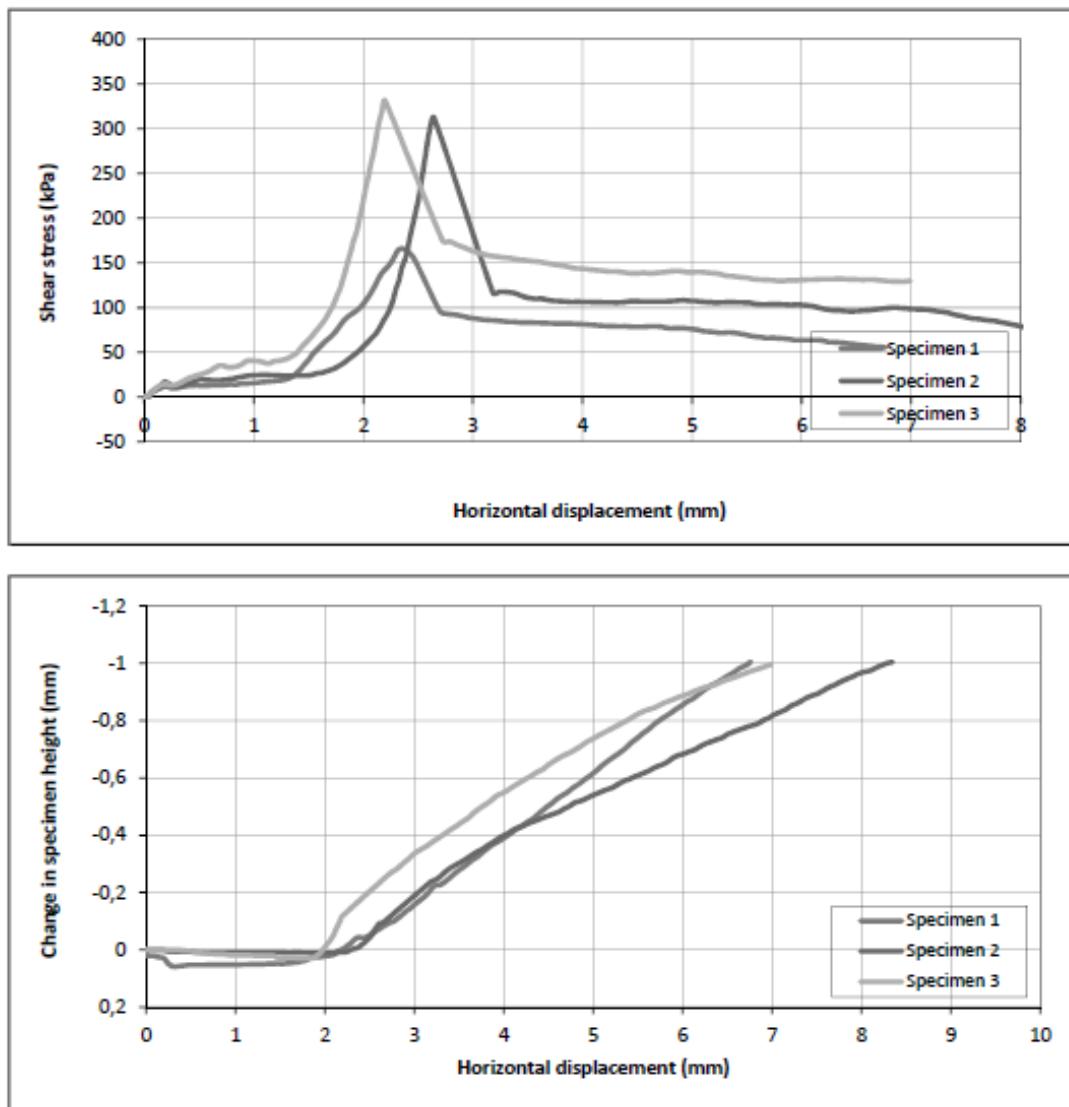
Tablica P.8 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – RE2+K

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	2,40	1,84	1,12
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,79	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,01	1,82	2,08
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,97	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	101,80	90,67	52,12
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		81,53	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	172,80	182,49	194,51
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		183,26	

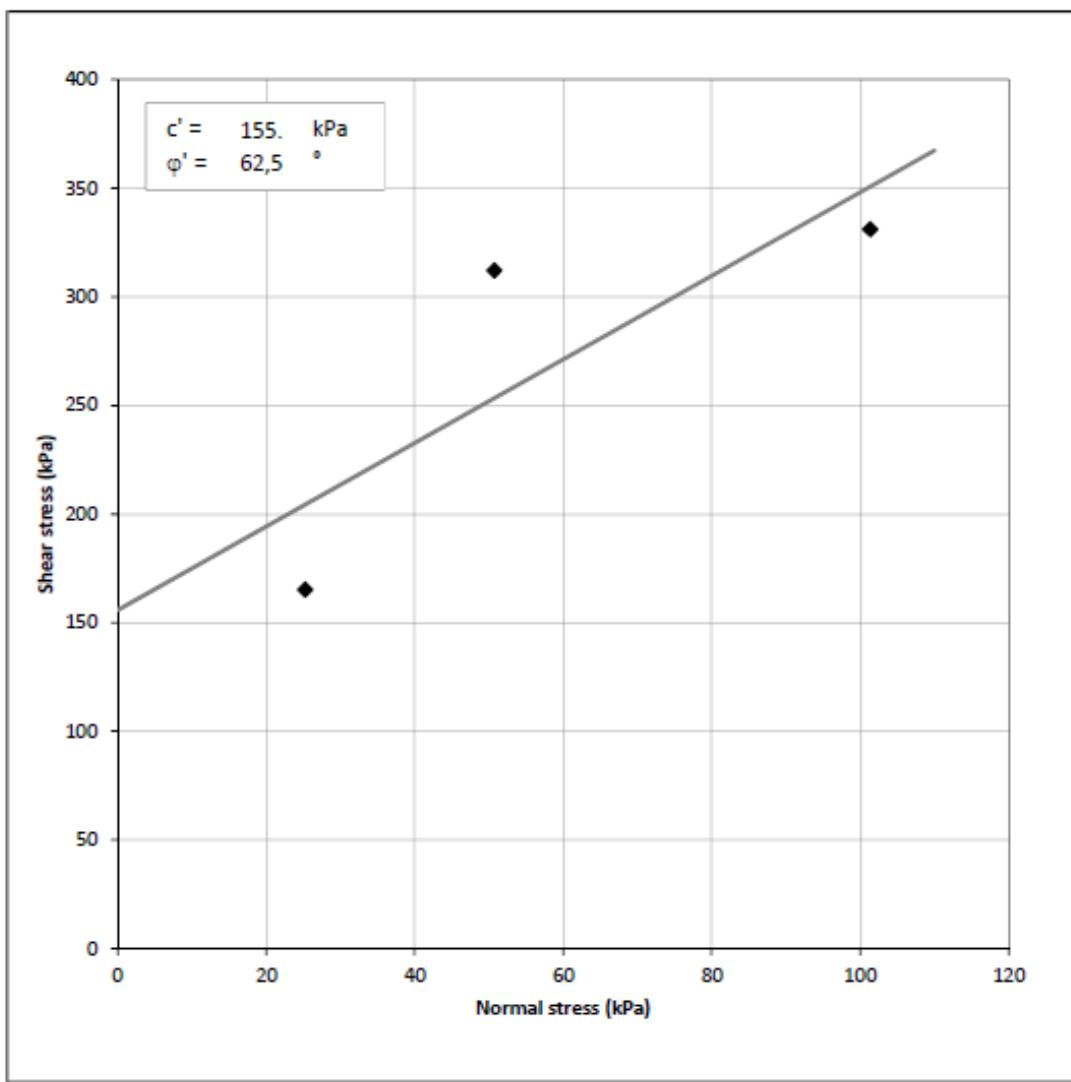
Tablica P.9 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - RE2+K

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,61	5,79	4,57
Prosječna vlažnost (%)		4,32	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,52	2,39	2,44
Prosječna vlažnost (%)		2,45	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama P.39 i P.40.



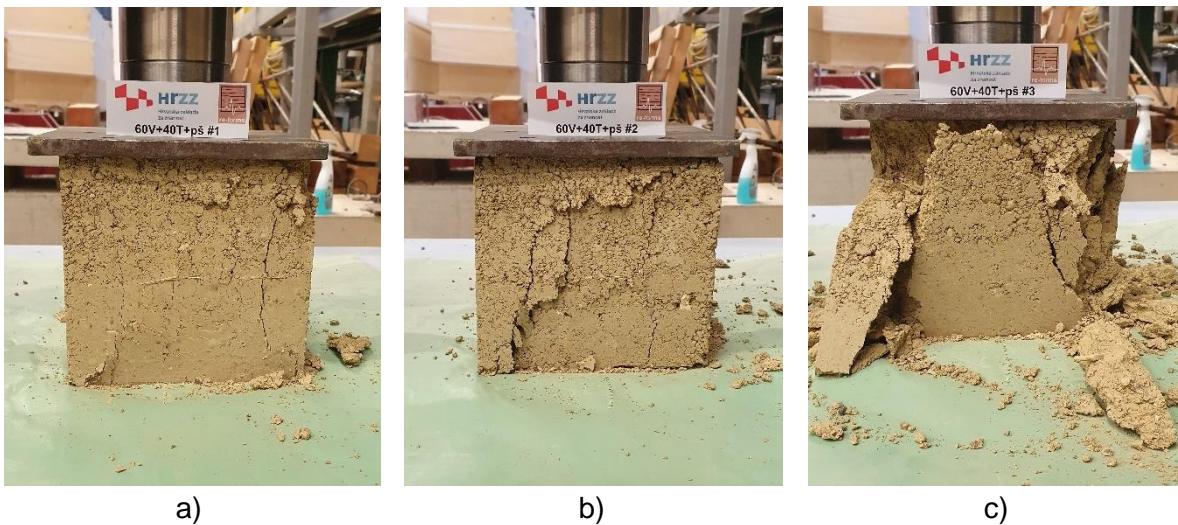
Slika P.39 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE2+K



Slika P.40 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE2+K

V. Ispitivanje uzorka s pšenicom

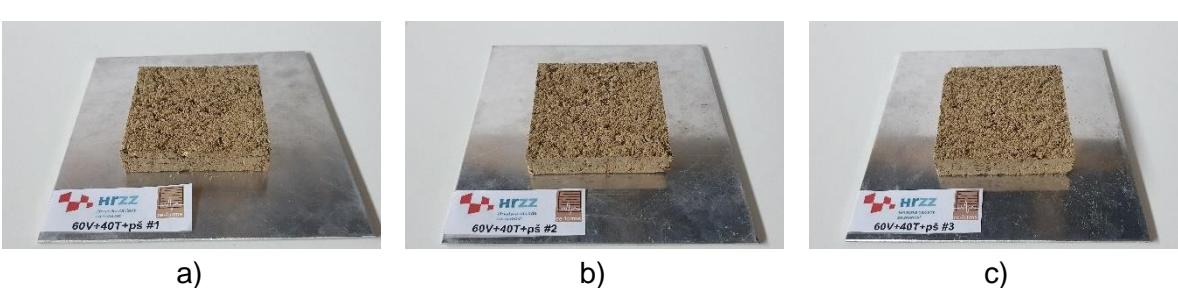
Kako bi se provjerio utjecaj dodatka pšenice, izrađeni su uzorci sa dodatkom pšenice između slojeva nabijene zemlje. Pritom je kao referentna mješavina odabrana mješavina od koje su izrađeni zidovi W3 i W4, u sastavu 60 % zemljanih materijala te 40 % sitnog dravskog šljunka. Vlakna slame narezana su na dužinu od oko 5 cm. Vlakna su se prije ugradnje namakala u vodi tijekom jednog sata, a neposredno prije ugradnje posušena su brisanjem papirnatim ubrusom. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri uzorka kocke (slika P.41) i tri uzorka valjka (slika P.42). Vlačna čvrstoća nije ispitana zbog poteškoća pri izradi uzorka prizama s dodatkom konoplje između slojeva, uzrokovana malim dimenzijama uzorka. Slika P.43 prikazuje uzorce na kojima je određena posmična čvrstoća.



Slika P.41 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE2+P

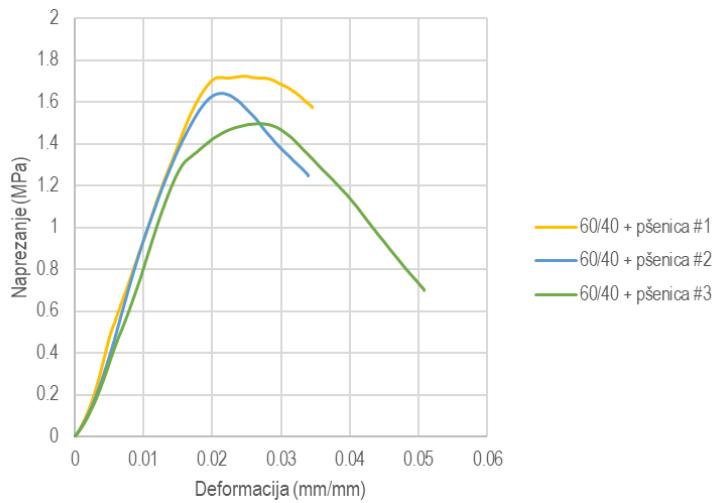


Slika P.42 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+P

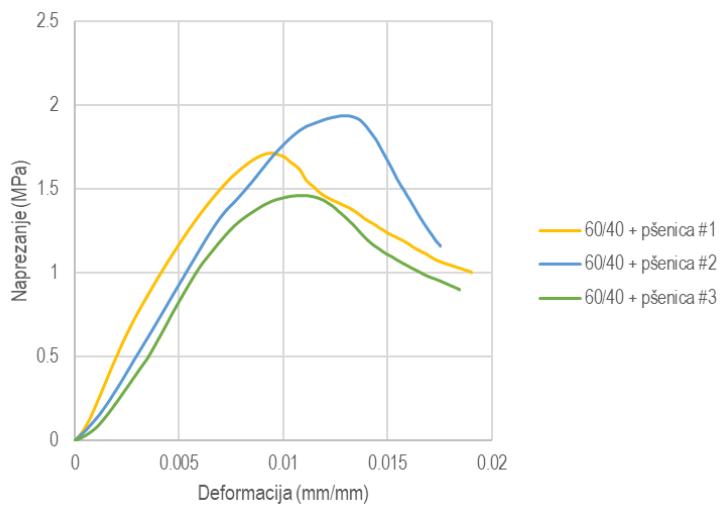


Slika P.43 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – RE2+P

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.44 i P.45. U tablici P.10 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 P.11 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



Slika P.44 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE2+P



Slika P.45 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE2+P

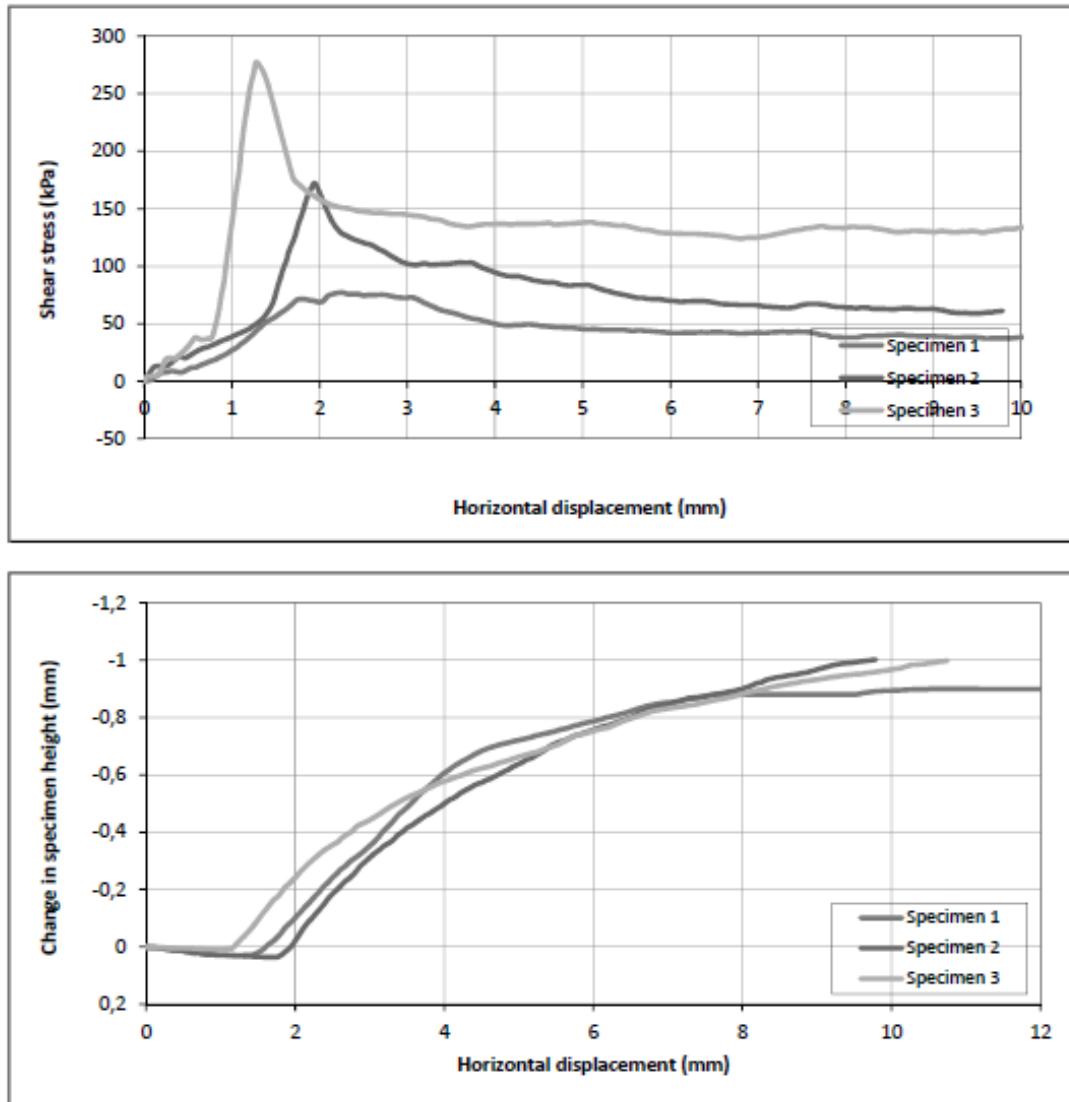
Tablica P.10 Rezultati ispitivanja tlačne i vlažne čvrstoće – RE2+P

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	1,72	1,64	1,50
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		1,62	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	1,71	1,94	1,46
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		1,70	
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	94,03	81,26	73,32
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		82,87	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	248,63	173,87	137,38
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		186,63	

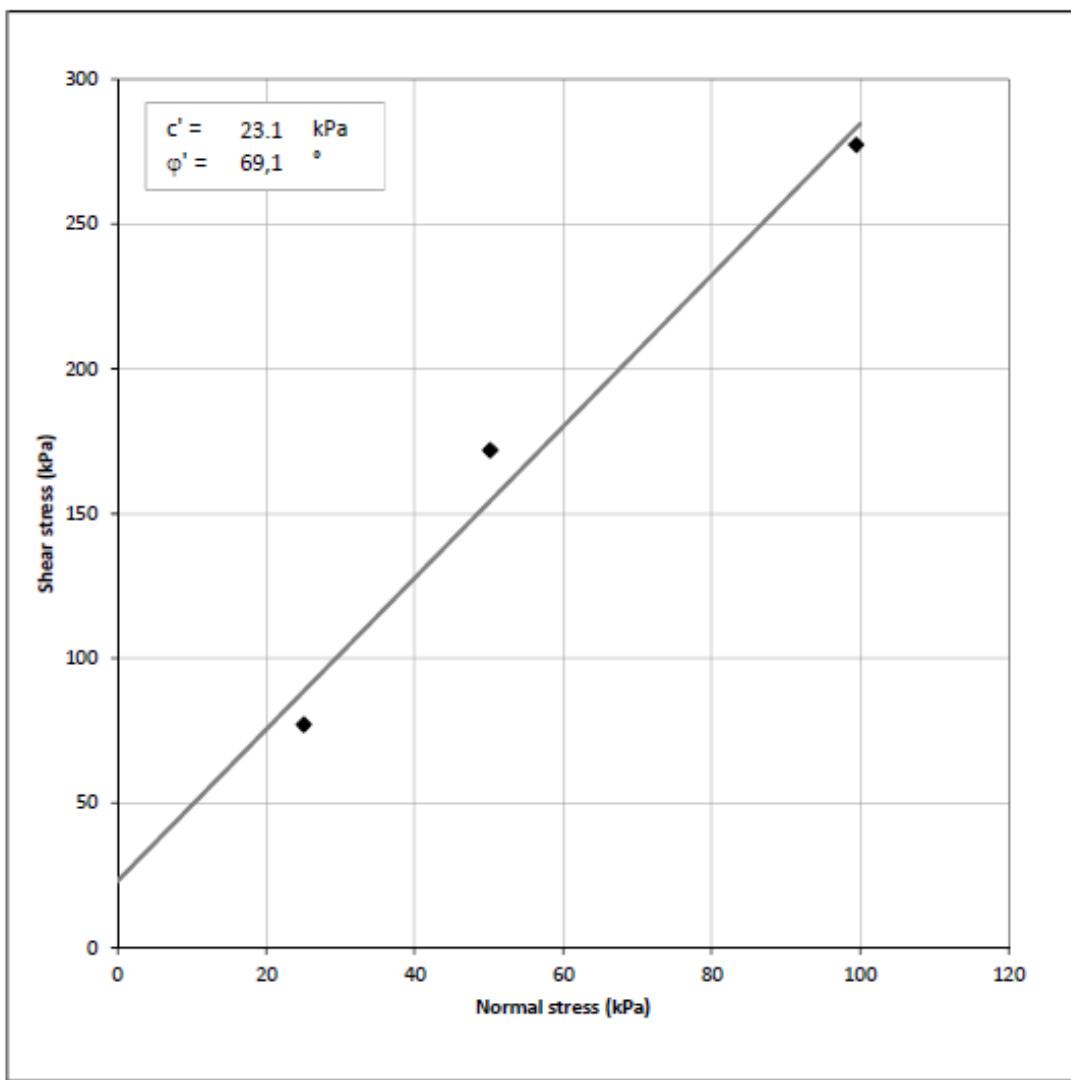
Tablica P.11 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka - RE2+P

	#1	#3	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,57	2,35	2,69
Prosječna vlažnost (%)		2,54	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,79	2,22	2,54
Prosječna vlažnost (%)		2,52	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama P.46 i P.47.



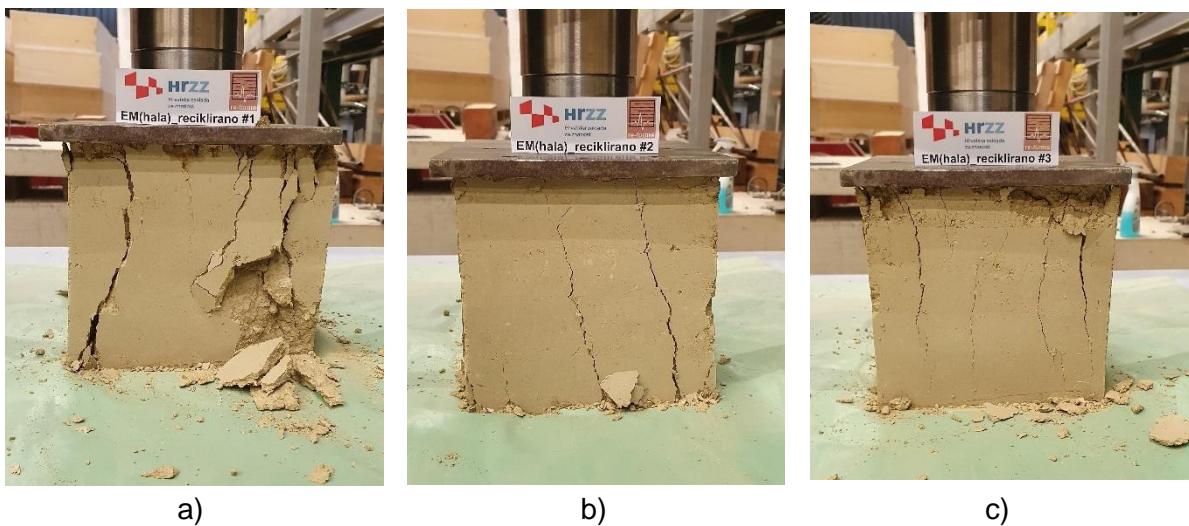
Slika P.46 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE2+P



Slika P.47 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE2+P

VI. Ispitivanje uzorka s recikliranim materijalom

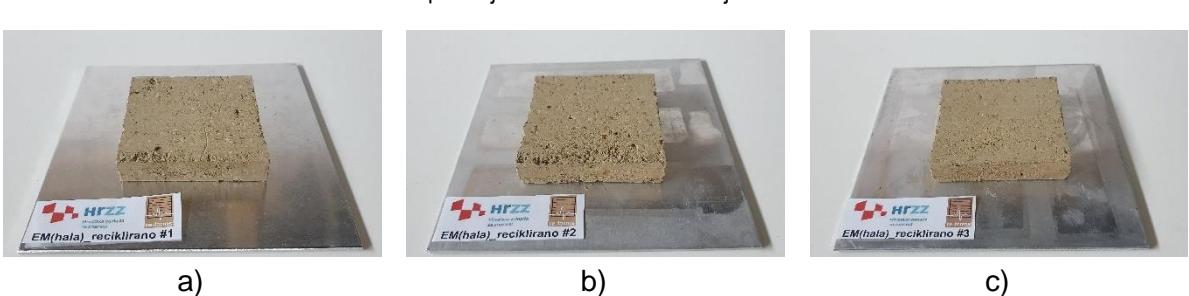
Kako bi se provjerio utjecaj recikliranja materijala na mehanička svojstva nabijene zemlje, izrađeni su uzorci primjenom materijala od kojega je izrađen zid za ispitivanje zrakopropusnosti u prethodnom razdoblju projekta. Ispitana je tlačna čvrstoća na tri kocke (slika P.48) i tri valjka (slika P.49), vlačna čvrstoća na savijanje na tri prizme te tlačna čvrstoća na polovicama od tri prizme, preostalih nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje (ukupno 6 polovica). Slika P.50 prikazuje uzorke na kojima je određena posmična čvrstoća.



Slika P.48 Ispitivanje tlačne čvrstoće na kockama – RE1-rec

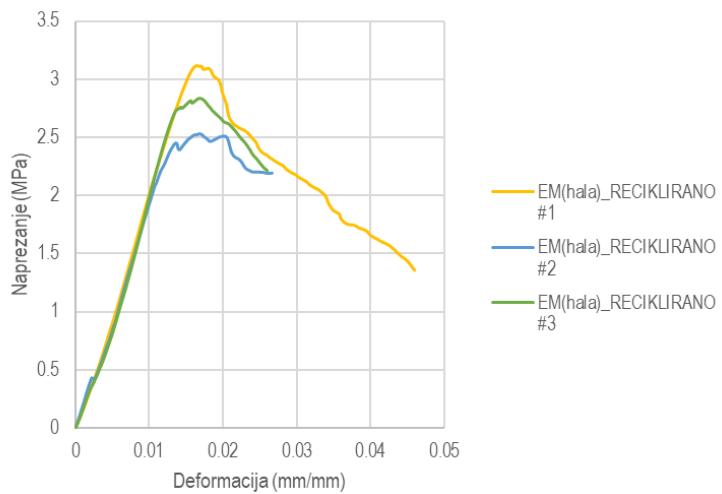


Slika P.49 Ispitivanje tlačne čvrstoće na valjcima – RE1-rec

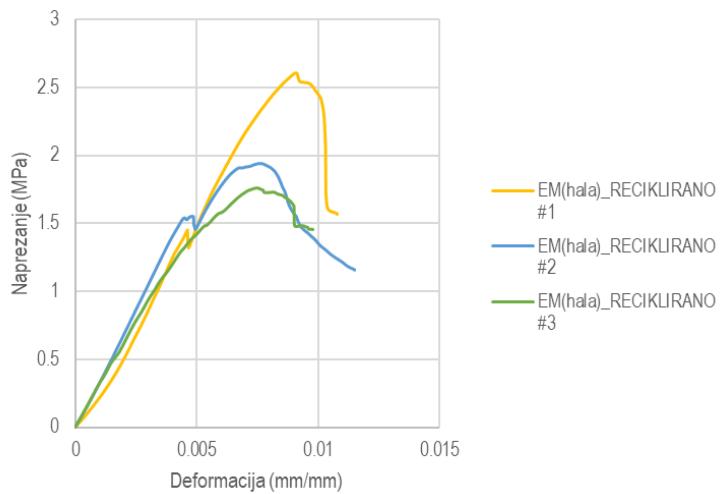


Slika P.50 Uzorci prije ispitivanja posmične čvrstoće – RE2-rec

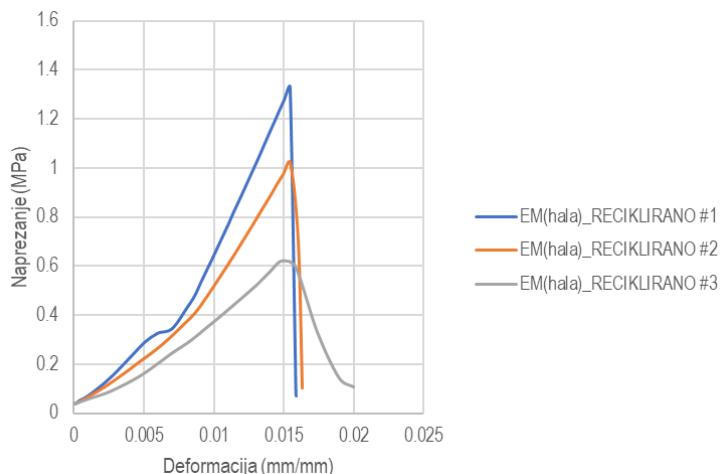
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama i valjcima grafički su prikazani na slikama P.51 i P.52. Rezultati ispitivanja uzorka prizmi prikazani su na slikama P.53 (vlačna čvrstoća) i P.54 (tlačna čvrstoća). U tablici P.12 sažeto su prikazane čvrstoće uzoraka te prosječna čvrstoća određena na svakom setu uzorka, kao i modul elastičnosti određen na temelju podataka o ispitivanju tlačne čvrstoće na svakom uzorku. U tablici P.13 prikazane su vrijednosti vlažnosti za svaki ispitni uzorak.



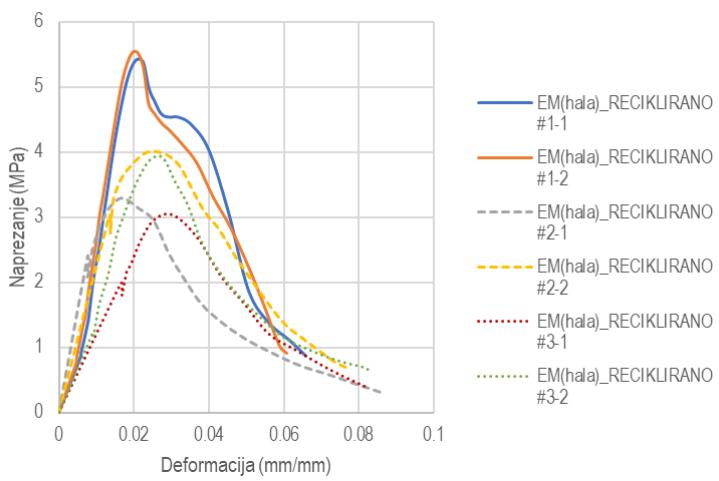
Slika P.51 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama – RE1-rec



Slika P.52 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na valjcima – RE1-rec



Slika P.53 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na prizmama – RE1-rec



Slika P.54 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na prizmama – RE1-rec

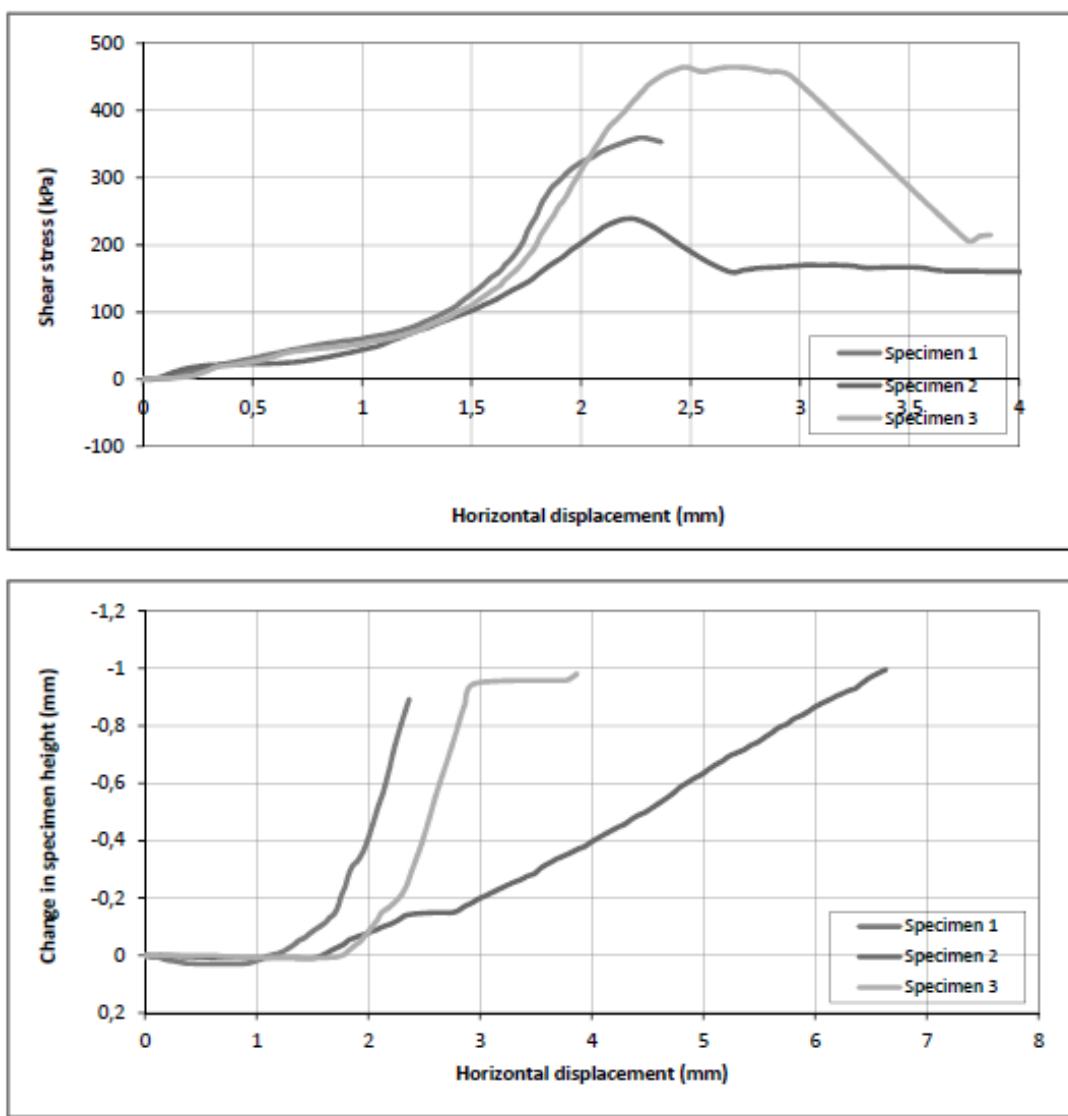
Tablica P.12 Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće – RE1-rec

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (MPa)	3,11	2,53	2,84
Srednja tlačna čvrstoća - kocka (MPa)		2,83	
Tlačna čvrstoća – valjak (MPa)	2,61	1,94	1,76
Srednja tlačna čvrstoća - valjak (MPa)		2,10	
Vlačna čvrstoća – prizma (MPa)	1,33	1,02	0,62
Srednja vlačna čvrstoća (MPa)		0,99	
Tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	5,43	5,53	3,29
Srednja tlačna čvrstoća – prizma (MPa)	5,48		4,01
Modul elastičnosti – kocka (MPa)	179,38		164,04
Srednji modul elastičnosti – kocka (MPa)		168,70	
Modul elastičnosti – valjak (MPa)	278,72		335,95
Srednji modul elastičnosti – valjak (MPa)		307,36	
Modul elastičnosti – prizma (MPa)	209,70		268,87
Srednji modul elastičnosti – prizma (MPa)		128,16	
		202,24	

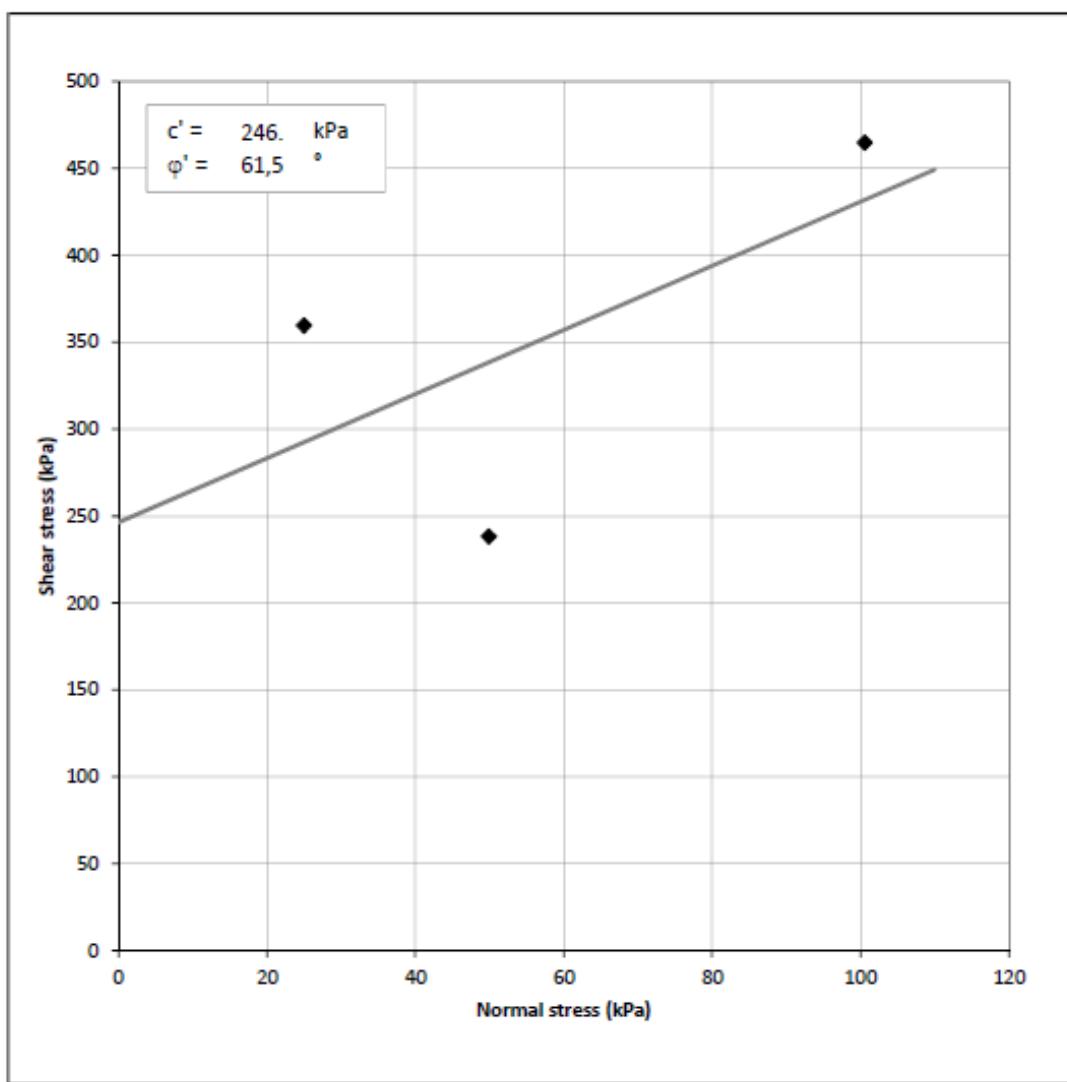
Tablica P.13 Rezultati vlažnosti ispitnih uzoraka – RE1-rec

	#1	#2	#3
Tlačna čvrstoća – kocka (%)	2,44	2,70	2,37
Prosječna vlažnost (%)		2,50	
Tlačna čvrstoća – valjak (%)	2,34	2,71	2,45
Prosječna vlažnost (%)		2,50	
Vlačna i tlačna čvrstoća – prizma (%)	1,78	1,74	1,72
Prosječna vlažnost (%)		1,75	

Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće na malim pločicama prikazani na slikama P.55 i P.56.



Slika P.55 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (veza posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka te promjene u visini uzorka i horizontalnog pomaka) – RE1-rec



Slika P.56 Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja) – RE1-rec