



doc. dr. Jasna Smolar, univ. dipl. inž. grad.¹
jasna.smolar@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.¹
vlatko.bosiljkov@fgg.uni-lj.si



Manca Suša, mag. inž. stavb.²
manca.susa@kolektor.com



doc. dr. David Antolinc, univ. dipl. inž. grad.¹
david.antolinc@fgg.uni-lj.si



¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

² Kolektor Sisteh, d. o. o., Zasavska cesta 95, 1231 Ljubljana - Črnuče

Znanstveni članek
UDK/UDC: 624.131:691

NAČRTOVANJE SESTAVE MEŠANICE ZEMLJINE ZA UPORABO V NENOSILNIH PREDELNIH BUTANIH STENAH

DESIGN OF THE SOIL MIXTURE COMPOSITION FOR THE USE IN NON-STRUCTURAL PARTITION WALL

Povzetek

Zemljina je, tako kot les in kamen, eden najstarejših gradbenih materialov in je lokalno dostopna ter okolju prijazna. V zadnjih letih se v konceptu krožnega gospodarstva in trajnostne gradnje uporaba butane zemljine ponovno obuja, a trenutno ni ustrezno podprta z veljavnimi področnimi standardi in tehničnimi smernicami, ki bi opredeljevali metode preiskav in minimalne zahtevane lastnosti materiala glede na namen uporabe in dosežene dolgoročne lastnosti po vgradnji. V prvem delu prispevka je povzet koncept uporabe butane zemljine v grajenem okolju, pri čemer so na kratko predstavljene tudi bistvene zahteve nekaterih tujih tehničnih smernic za načrtovanje sestave mešanic. Drugi del obravnava geomehanske laboratorijske preiskave, izvedene pri načrtovanju mešanice za izdelavo nenosilnih testnih sten iz butane zemljine, ter primerja lastnosti mešanic z zahtevami tujih smernic. V tretjem delu so predstavljene mehanske lastnosti dveh nenosilnih testnih sten, izdelanih iz izbrane mešanice. Rezultati geomehanskih laboratorijskih preiskav so spodbudni, saj potrjujejo možnost uporabe standardnih geomehanskih preiskav za načrtovanje sestave in začetno oceno lastnosti mešanice. Za doseganje ustrezne tlačne trdnosti vgrajene mešanice sta ključnega pomena zrnavostna sestava – zlasti delež gline – ter primerna vlaga ob vgradnji. Tlačni preizkus testnih sten je pokazal razmeroma dobro tlačno trdnost, vendar tudi zelo neugoden porušni mehanizem. Slednje je treba v okviru nadaljnjih preiskav in optimizacije mešanice za izdelavo sten izboljšati, predvsem z dodatki naravnih vlaken. Za sledljivo načrtovanje sestave in rabe butane zemljine bi bilo treba izdelati tudi nacionalne tehnične smernice, ki bi upoštevale veljavne področne standarde in zakonodajo ter lokalne posebnosti (razpoložljive lokalne materiale, vplive okolja).

Ključne besede: butana zemljina, laboratorijske mehanske preiskave, načrtovanje mešanice, vgradljivost, nenosilna stena, zgoščanje, tlačna trdnost

Summary

Soil, similar to wood and stone, is one of the oldest construction materials, locally available and environmentally sustainable. In recent years, within the broader framework of the circular economy and sustainable construction practices, interest in rammed earth has grown. However, its wider implementation in Slovenia is still limited by the absence of valid national standards and technical guidelines prescribing testing methods, required material properties, and construction rules. The first part of the article introduces the concept of using rammed earth in contemporary built environments and summarizes key requirements from selected international technical guidelines for mixture design. The second part presents geotechnical laboratory tests performed to develop mixtures suitable for non-structural rammed earth walls, comparing the obtained properties with the criteria defined in foreign standards. The third part examines the mechanical properties of two non-structural test walls built from the selected mixture. The laboratory results are promising, demonstrating that standard geotechnical procedures can be effectively applied to mixture design and to the initial assessment of rammed earth characteristics. The achieved compressive strength of the compacted mixture is shown to depend mainly on particle size distribution and on ensuring appropriate moisture levels at the time of compaction. Compressive testing of the walls indicated relatively high compressive strength but also revealed an unfavourable failure mechanism. Addressing this behaviour in future research will likely require modifications to the mixture, such as the incorporation of natural fibres. To support systematic mixture design and encourage broader use of rammed earth construction in Slovenia, the development of national technical guidelines is essential. These guidelines should harmonize with existing international standards while taking into account local conditions (material availability, environment).

Key words: Rammed earth, laboratory mechanical testing, soil mixture design, workability, non-structural wall, compaction, compressive strength

1 UVOD

Gradbeni sektor je zaradi velike porabe surovin in energije v celotnem življenjskem ciklu objektov odgovoren za nastanek približno 40 % vseh emisij toplogrednih plinov [United Nations Environment Programme, 2023]. Uporaba naravnih in lokalno dostopnih gradbenih materialov se zato uveljavlja kot pomemben vidik trajnostnih rešitev, ki ne vključujejo energijsko potratne predelave ter na ta način pripomorejo k zmanjšanju porabe energije in ogljičnega odtisa materialov. Zaradi lokalne razpoložljivosti surovin, nizke vgrajene energije in potenciala za recikliranje se v kontekstu krožnega gospodarstva (Slika 1) in trajnostne gradnje objektov obuja tudi uporaba butane zemljine [Asal, 2021]. Butana zemljina (angl. rammed earth) je ena najstarejših tehnik gradnje, pri kateri v opaž s pnevmatskim ali ročnim nabijalom po plasteh zbijemo mešanico gline ali ilovice in agregata z dodatkom veziv in različnih naravnih vlaken ali brez tega.

Raziskave kažejo, da je butana zemljina trajno in trpežno gradivo, ki regulira vlago v prostoru, ne gori, shranjuje toploto, je dobro zvočnoizolativna in nima negativnih vplivov na okolje in zdravje ljudi in živali. V primerjavi s konvencionalnimi gradivi pa ima butana zemljina tudi pomanjkljivosti, ki jih je treba pri načrtovanju uporabe skrbno upoštevati [Zbašnik-Senegačnik, 2005]. Nekatere izmed teh so:

- spremenljive lastnosti, ki so vezane na območje pridobivanja surovine. Lastnosti surovine je treba raziskati za vsak primer posebej in načrtovati sestavo mešanice;
- krčenje zaradi sušenja. Zaradi zagotavljanja vgradljivosti mora imeti zemljina oz. mešanica ustrezno vlažnost ob vgradnji. Vlaga butanih elementov se s časom uravnoteži z okoljem, pri čemer pa (lahko) nastanejo razpoke kot posledica krčenja materiala. Krčenje lahko zmanjšamo z ustreznim načrtovanjem sestave mešanice (npr. manjši delež gline) in ustrezno nego butanega elementa med sušenjem (npr. počasna enakomerna ekvilibracija vlage z zračno vlažnostjo okolice ...);
- občutljivost na vodo. V stiku z vodo se butani element, katerega vlaga je uravnotežena z okoljem, ponovno navlaži. Vlaženje neugodno vpliva na mehanske lastnosti, zato

morajo biti butani elementi zaščiteni pred vodo in zmrzaljo (npr. strešni napušč, ustrezno visok kamnit temelj in cikel, hidroizolacija, površinska obdelava s premazi, opleški, ometi ...). Ob zasičenju z vodo, daljšem od pol ure, lahko material razpade.

Na vprašanje, ali je zemljina primerna za izdelavo butanih elementov, ni enostavnega odgovora [Houben, 1994]. Prav tako ne obstaja splošno uporaben recept za pripravo mešanice zemljine, agregata in veziv (v nadaljevanju mešanica), primerne za izdelavo butane zemljine. Fizikalne in mehanske lastnosti nabite mešanice so odvisne predvsem od lastnosti surovin (zemljine, agregata in veziva), njihovega razmerja v mešanici, vlage ob vgrajevanju ter postopka vgrajevanja (debelina plasti, ročno ali strojno zbijanje itd.) [Sabbà, 2021].

1.1 Tehnične smernice in standardi za načrtovanje sestave in lastnosti mešanice

Enotnih evropskih tehničnih smernic in standardov za preiskave in načrtovanje sestave mešanic za izdelavo butanih elementov ni. V Sloveniji tudi nimamo nacionalnih področnih tehničnih smernic, saj je butana gradnja, ki je bila veskozi aktualna v Prekmurju in na Ptujskem polju, še posebej pa se je razmahnila po drugi svetovni vojni, ko je bila na tem območju večina hiš v vaseh zgrajena iz butane zemljine, v sedemdesetih letih popolnoma zamrla [Zbašnik-Senegačnik, 2005].

Pregled obstoječih področnih tehničnih smernic in standardov v Preglednici 1 pa kaže, da so zrnavostna sestava, vsebnost organskih snovi in vodotopnih soli ter plastičnost ključne lastnosti za vrednotenje ustreznosti mešanice oz. zemljine v mešanici, medtem ko je v vgrajenem stanju najbolj pomembna ustrezna tlačna trdnost.



Slika 1. Življenjski cikel butane zemljine v grajenem okolju [Asal, 2021].

Država	Standardi in tehnične smernice	Lastnosti mešanice							
		Pred vgradnjo				Po vgradnji			
		Zrnavostna sestava	Organska snov	Vodotopne soli	Plastičnost finih zrn	Tlačna trdnost	Natezna trdnost	Linearno krčenje	Zmrzljinska obstojnost
Avstralija	CSIRO Bulletin 5 (1995)								
	EBAA (2004)	✓	✓			✓		✓	✓
	HB 195 (2002)								
Nemčija	Lehmbau Regeln (2009)		✓	✓		✓		✓	
Indija	IS: 2110 (1980)			✓	✓	✓			
	IS: 13827 (1998)	✓							✓

Kirgizi- stan	PCH-2-87 (1988)	✓		✓	✓	✓				
Nova Zelandija	NZS 4297 (1998)									
	NZS 4298 (1998)	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓
	NZS 4299 (1998)									
Združene države Amerike	14.7.4 NMAC (2006)									
	ASTM D560 (1996)	✓	✓	✓		✓			✓	✓
	ASTM D559 (2003)									
	ASTM E2392/ E2392M-10(2016)									
Afrika	SADCSTAN TC 1/ SC 5/CD SAZS 724 (2001)	✓	✓	✓		✓				✓
Poljska	BN-62/6738-01	✓				✓		✓		✓
	BN-62/6738-02									
Španija	MOPT Tapial (1992)	✓	✓			✓				
Velika Britanija	Rammed Earth Design and Con- struction Guidelines (2005)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Preglednica 1. Pregled področnih tehničnih smernic in standardov z navedenimi parametri mešanic, ki jih je treba preiskati (povzeto po [ASTM, 2016b; IS:2110, 1981; Rogala, 2021; SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014; Walker, 2005]).

Eden ključnih parametrov pri načrtovanju sestave mešanice je zrnavost. Minke [2006] navaja, da je optimalna zrnavostna se-

stava mešanice tista, ki jo opiše modificirana Fullerjeva krivulja zrnivosti, določena z enačbo:

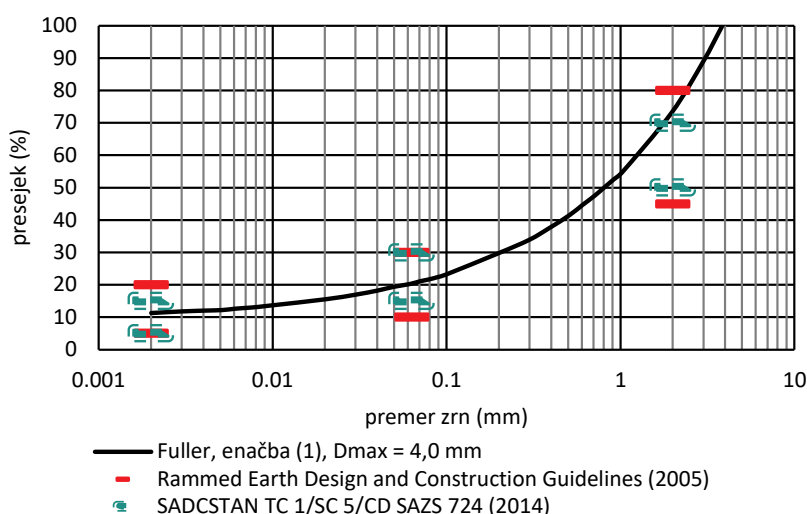
$$a = 100 * \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} + 10 \quad (1)$$

kjer je: a ... presejek (%), d ... premer zrn (mm), D_{max} ... premer največjega zrna (mm).

Enačba velja za zrna, večja od 0,002 mm, priporočena najmanjša vsebnost gline (zrn < 0,002 mm) pa je 10 %.

Na Sliki 2 je s črno črto prikazana modificirana Fullerjeva krivulja za mešanico, v kateri premer največjega zrna ne presega 4,0 mm, z rdečimi in zelenimi horizontalnimi črticami pa sta prikazani območji zrnavostne sestave mešanic, kot ju predvidevata britanska in afriška smernica [SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014; Walker, 2005]. Britanska smernica [Walker, 2005] tudi omejuje premer maksimalnega zrnave mešanice na $D_{max}=6,0$ mm. Izjemoma so sicer na podlagi inženirske presoje lahko v mešanici tudi večja zrna, do $D_{max} = 50$ mm. Z vidika volumske stabilnosti (nabrekanje in krčenje) so pomembne tudi lastnosti drobnih zrn v mešanici. Generalno so bolj ugodna nizkoplastična drobna zrna, mešanice, ki vsebujejo visokoplastična drobna zrna, pa je možno tretirati z apnom ali drugimi hidravličnimi vezivi.

Poleg indeksnih lastnosti mešanice (zrnavostna sestava, vsebnost organskih snovi, vsebnost vodotopnih soli, plastičnost ...) sta za doseganje mehanskih lastnosti butanega elementa pomembni tudi vlaga mešanice pri vgrajevanju in dosežena gostota vgrajene mešanice. V nekaterih standardih in smernicah, navedenih v Preglednici 1, sta kot referenca največkrat podana dopustno odstopanje od optimalne vlage (w_{opt}) mešanice in minimalna predpisana dosežena zgoščenost (D_{PR}), ki je definirana kot % dosežene referenčne maksimalne suhe gostote (ρ_{dmax}) mešanice po zgoščanju v butani element (Preglednica 2). Navedeni parametri vgradljivosti so v splošni rabi v geotehnični praksi, preiskave pa se izvajajo po Proctorjevem preizkusu (npr. [DIN 18127, 2012a; SIST EN 13286-2, 2013]). Namen in cilj preiskav je, da za določeno energijo zgoščanja



Slika 2. Optimalna zrnavostna sestava mešanice za butano zemljino – Fullerjeva krivulja (črna črta) in območji zrnavostne sestave mešanic, ki ju priporočata britanska in afriška smernica (rdeči in zeleni simboli) [SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014; Walker, 2005].

določimo vlago, pri kateri se bo mešanica najbolje zgoščala (w_{opt} , ρ_{dmax}) in posledično dosegala s projektom predvidene mehanske lastnosti.

Za oceno odstopanja vlage mešanice od njene optimalne vlage nekatere tehnične smernice in standardi podajajo enostavno metodo »drop test«, pri kateri iz vlažne mešanice oblikujemo kroglo premera 40-50 mm in jo z višine približno 1,5 m spustimo na trdno ravno podlago. Če je vlaga mešanice prenizka, krogla razpade v več manjših grud in drobcev (se zdrobi), če je vlaga blizu optimalne vlage, krogla razpade v nekaj kompaktnih kosov. Če krogla ne razpade (ostane v enem kosu) pa je vlaga mešanice previsoka.

Mehanske lastnosti mešanice se najpogosteje vrednotijo na podlagi tlačne trdnosti in vremenske obstojnosti nabitih preizkušancev (Preglednica 1). V povezavi z načinom priprave preizkušancev in njihovimi dimenzijami ter načinom preiskovanja

so podane tudi mejne vrednosti tlačne trdnosti, ki morajo biti izpolnjene. Primeri so navedeni v Preglednici 3.

V nadaljevanju članka so predstavljeni in interpretirani rezultati laboratorijskih preiskav, ki smo jih zasnovali na podlagi usmeritev tujih standardov in tehničnih smernic. Mešanico za izdelavo testnih nenosilnih butanih elementov smo pripravili iz gline in agregata, brez dodatka apna ali drugih hidravličnih veziv. Glede na to, da tuji standardi in tehnične smernice navajajo parametre in opisujejo postopke preiskav, ki se uporabljajo tudi v geotehniki, smo preiskave osnovnih komponent v mešanici ter preiskave za načrtovanje sestave in lastnosti sveže in vgrajene mešanice (zrnavostna sestava, vgradljivost, tlačna trdnost) izvedli po standardnih geomehanskih preiskovalnih metodah. Na podlagi rezultatov vseh izvedenih preiskav smo določili dve mešanici z različno vsebnostjo gline, iz katerih smo v laboratoriju izdelali nenosilni testni steni, ki smo ju po uravnoteženju vlage z zračno vlago v laboratoriju tudi preiskali.

Standard / tehnična smernica	Vlaga mešanice, w (%)	Dosežena zgoščenost, D_{pr} (%)
Materials and workmanship for earth buildings [NZS 4298, 1998]	$w_{opt} \pm 3\%$ <i>izjemoma, če se s preiskavami dokaže:</i> $w_{opt} - 4\%$ do $w_{opt} + 6\%$	98
Rammed Earth Design and Construction Guidelines, Appendix A [Walker, 2005]	$w_{opt} \pm 1-2\%$	98
SADC harmonized standard for rammed earth structures – code of practice [SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014]	w_{opt}	95

Preglednica 2. Priporočena vlaga mešanice pred vgradnjo in zahtevana minimalna dosežena zgoščenost butane zemljine po različnih standardih in smernicah.

Standard/tehnična smernica	Minimalna tlačna trdnost (MPa)	Postopek priprave preizkušancev in izvedbe preiskave
Materials and workmanship for earth buildings [NZS 4298, 1998]	1,3	iz splošnega opisa v prilogi B ni možno razbrati podatkov o dimenzijah preizkušancev, načinu nege in starosti pri preiskavi.
Rammed Earth Design and Construction Guidelines, Appendix A [Walker, 2005]	1,0 (generalno) 2,0 (nosilni elementi)	preiskava na 28 dni starih, zračno suhih valjastih preizkušancih z razmerjem $h:d = 2$. Možna je tudi izvedba na preizkušancih višine $h = 115$ mm in premera $d = 105$ mm, pri čemer je treba rezultat reducirati s faktorjem 0,7.
SADC harmonized standard for rammed earth structures – code of practice [SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014]	1,5 (generalno) 2,0 (butane stene višine med 3,0 in 6,0 m)	postopek neporušne preiskave stene je opisan v normativnem dodatku D-standarda, starost stene pri preiskavi najmanj 7 dni.
Indian standard IS: 2110 [IS, 1981]	1,4 (zračno suh) 0,7 (zasičeno stanje)	mešanica izboljšana s cementom, valjast preizkušanelec z razmerjem $h:d = 2$

Preglednica 3. Mejne vrednosti tlačne trdnosti v povezavi z načinom priprave preizkušancev, njihovimi dimenzijami in načinom preiskovanja.

2 NAČRTOVANJE SESTAVE MEŠANIC

Mešanice za izdelavo nenosilne testne butane stene smo izdelali iz treh osnovnih sestavin: (1) gline (**G**), (2) drobljenega agregata (**A**) frakcije 0-4 mm (gradbeni proizvod) in (3) vode iz ljubljanskega vodovoda. V luči krožnega gospodarstva smo v mešanicah uporabili glino, ki kot jalovina nastaja pri pridobivanju kremenovega peska.

Ker so spremenljive lastnosti zemljin, ki so vezane na območje pridobivanja, eden glavnih izzivov pri načrtovanju sestave mešanic in doseganju zahtevanih lastnosti butanih elementov, smo preiskali skupno približno 600 kg gline iz dveh ločenih odvzemov (1. odzem – oznaka G1, 2. odzem – oznaka G2). Vzorca gline sta bila v laboratorij dostavljena vlažna, v obliki večjih grud. Pred pripravo mešanice smo glino posušili na zraku in zmleli v namenskem mlinu. Zračno suhi zmleti glini smo enakomerno primešali določeno količino zračno suhega drobljenega agregata in homogeni mešanici dodali želeno količino vode. V mešalniku homogenizirano mešanico smo pred pripravo preizkušancev za laboratorijske preiskave in pred izdelavo sten za 24 ur tesno zaprli v vreče, da je bila zagotovljena enakomerna porazdelitev vlage po celotnem vzorcu.

2.1 Preiskave za ugotavljanje lastnosti gline, agregata in mešanic

V Preglednici 4 so navedene geomehanske laboratorijske preiskave, ki smo jih izvedli na osnovnih sestavinah ter na mešanicah z različnimi razmerji osnovnih sestavin.

Parameter	Postopek (standard, navodila)	G	A	M
Gravimetrična vlaga, w (%)	SIST EN ISO 17892-1 [SIST, 2015]	✓		✓
Gostota zrn, ρ_s (Mg/m ³)	SIST EN ISO 17892-3 [SIST, 2016]	✓		✓
Zrnavostna sestava, d (mm), p (%)	SIST EN ISO 17892-4 [SIST, 2017]	✓	✓	✓
Enosna tlačna trdnost, q_u (kPa)	SIST EN ISO 17892-7 [SIST, 2018a]			✓
Meja židkosti w_L (%), meja plastičnosti, w_p (%)	SIST EN ISO 17892-12 [SIST, 2018b]	✓		
Metilen modro vrednost, MB_F (g/kg)	SIST EN 933-9:2009+A1:2013 [EN, 2013]	✓		
Vodovpojnost, Enslin – Neff, w_A (%)	DIN 18132:2012-04 [DIN, 2012b]	✓		
Vgradljivost, SPP, MPP, w_{opt} (%), ρ_{dmax} (Mg/m ³)	DIN 18127:2012-09 [DIN, 2012a]			✓
Meja krčenja, w_s (%)	ASTM D4943 [ASTM, 2018]	✓		
Totalna sukcija	ASTM D6836 [ASTM, 2016a]			✓
Vpliv vlage	Interna metoda (opisana v [Hrovat, 2020])			✓

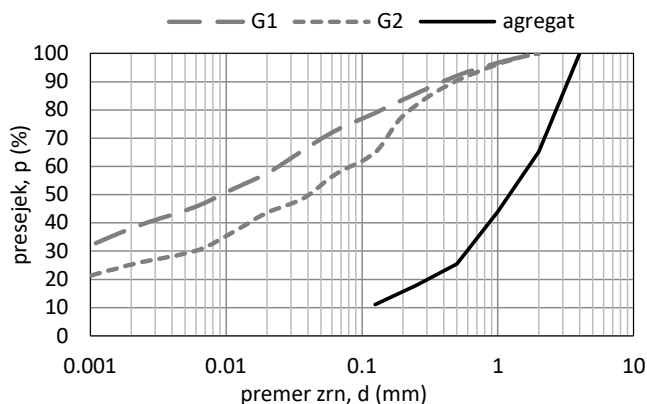
Preglednica 4. Kazalo izvedenih laboratorijskih preiskav gline (**G**), agregata (**A**) in mešanic (**M**).

3 LASTNOSTI OSNOVNIH SESTAVIN IN MEŠANIC

3.1 Lastnosti gline in agregata

Zrnavostna sestava gline in agregata, iz katerih smo pripravili mešanice za izdelavo sten, je prikazana na Sliki 3. Kljub nekoliko različni zrnavostni sestavi so indeksne geomehanske lastnosti gline iz različnih odvzemov primerljive (Preglednica 5). Preiskana zemljina je peščena pusta glina (CL) in je z vidika USCS-klasifikacije [ASTM D2487, 2011] primerljiva zemljinama, ki so ju v raziskavi butanih zemljin uporabili Hajjar et al. [2018] in François et al. [2017].

Glede na izmerjeno vodovpojnost ($w_A = 53\% - 71\%$) in metilen modro vrednost ($MB_F = 21$ g/kg) spada glina med zemljine z nizkim oz. srednjim nabrekalnim potencialom [Petkovšek, 2010], kar ocenjujemo kot ugodno, saj volumske deformacije butanih elementov niso zaželeno.



Slika 3. Krivulje zrnivosti gline (G1, G2) in agregata.

Parameter	G1	G2
Meja židkosti w_L (%)	36	32
Meja plastičnosti, w_p (%)	11	11
Meja krčenja, w_s (%)	11	14
Gostota zrn, ρ_s (Mg/m ³)	2,60	2,62
Vodovpojnost, Enslin – Neff, w_A (%)	71	53
Metilen modro vrednost, MB_F (g/kg)	21	21

Preglednica 5. Indeksne geomehanske lastnosti gline.

3.2 Sestava in lastnosti mešanic

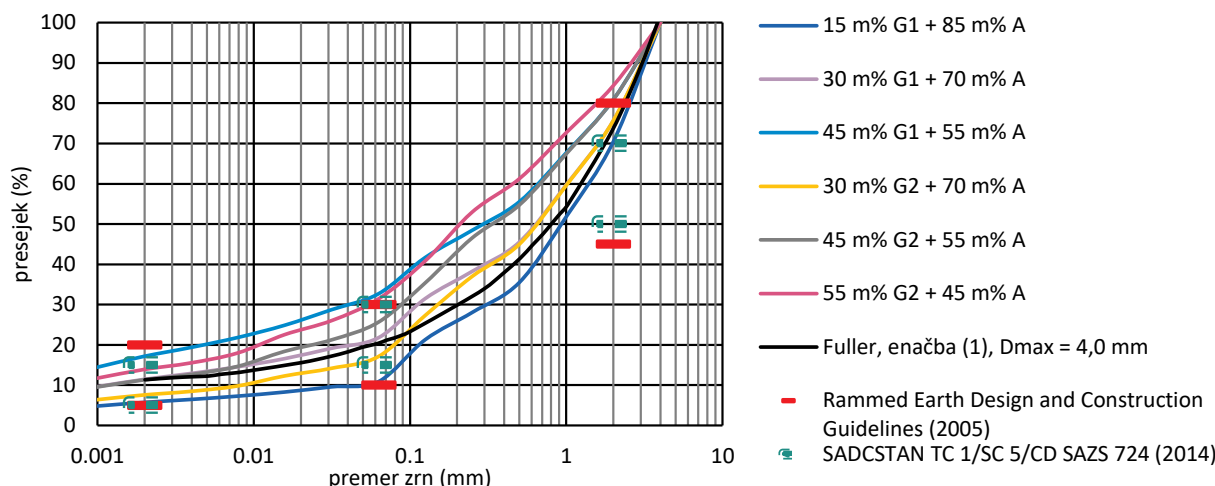
Iz gline iz posameznega odvzema (G1 in G2) smo pripravili po tri mešanice z različnimi masnimi razmerji med glino in agregatom (G:A = 15 %:85 % do G:A = 55 %:45 %). Skupno smo tako pripravili šest mešanic. Da bi preverili vpliv manjših razlik v zrnavostni sestavi gline iz različnih odvzemov na vgradljivost mešanic, smo dve mešanici (30 % G + 70 % A in 45 % G + 55 % A) pripravili iz gline iz obeh odvzemov.

3.2.1 Zrnovostna sestava

Na Sliki 4 so prikazane računske krivulje zrnivosti mešanic skupaj s Fullerjevo krivuljo, izračunano po enačbi (1) za maksimalno zrno v vzorcu $D_{\max} = 4,0$ mm in z območji zrnivosti, kot jih priporočajo nekateri standardi in tehnične smernice (Slika 2). Načrtovana zrnovostna sestava mešanic generalno ustreza priporočilom standardov in tehničnih smernic.

nekoliko različnemu razmerju gline in agregata izkazuje primerljivo obnašanje.

Optimalna vlaga in dosežena maksimalna suha gostota mešanice sta odvisni tudi od energije zgoščanja. Za mešanico, ki vsebuje 55 m% gline (G2) in 45 m% agregata (A) in je z vidika vgradljivosti primerljiva mešanici 45 m% gline in 55 m% agregata, smo parametre vgradljivosti določili tudi za energijo



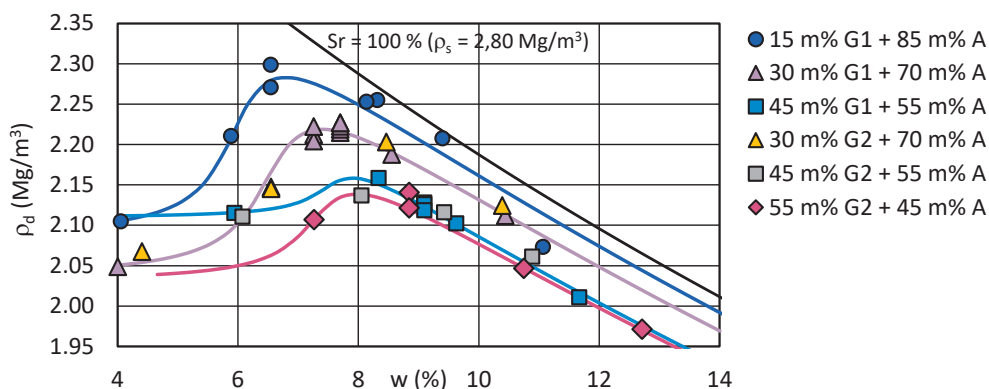
Slika 4. Računske krivulje zrnivosti preiskanih mešanic gline in agregata, Fullerjeva krivulja (črna črta) in območji zrnivosti mešanic, ki ju priporočata britanska [Walker, 2005] in afriška [SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, 2014] smernica (rdeči in zeleni simboli).

3.2.2 Vgradljivost

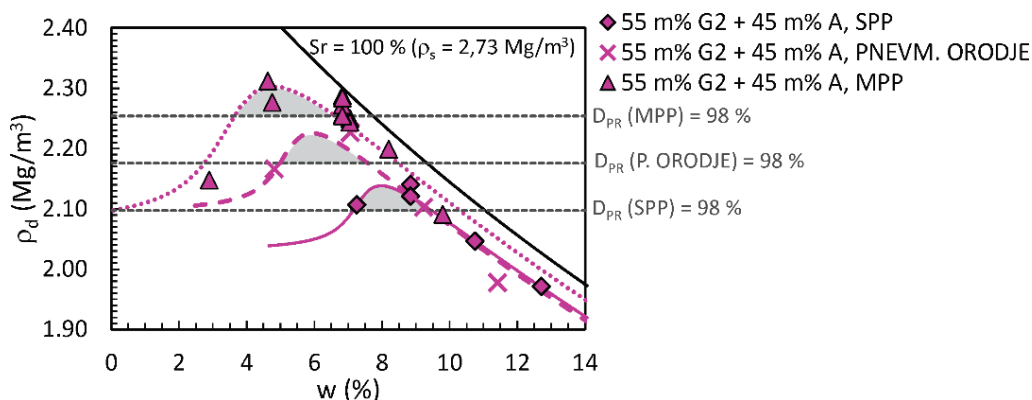
Referenčni parametri vgradljivosti mešanic so za energijo zgoščanja po standardnem Proctorjevem postopku (SPP, energija zgoščanja: $0,6 \text{ MJ/m}^3$) prikazani na Sliki 5. Mešanice z večjo vsebnostjo gline pričakovano izkazujejo višjo optimalno vlago (w_{opt}) in nižjo maksimalno suho gostoto ($\rho_{d\text{max}}$) kot mešanice z manjšo vsebnostjo gline. Ne glede na uporabljeno glino (G1 ali G2) je vgradljivost mešanic z enakim razmerjem gline in agregata primerljiva (Slika 5, 30 m% G1 + 70 m% A in 30 m% G2 + 70 m% A ter 45 m% G1 + 55 m% A in 45 m% G2 + 55 m% A), zato je za vsako razmerje mešanja prikazana le ena Proctorjeva krivulja. Mešanica iz 45 m% G in 55 m% A in mešanica iz 55 m% G in 45 m% A, zgoščeni z enako energijo (SPP), kljub

zgoščanja s pnevmatskim orodjem in za energijo zgoščanja po modificiranem Proctorjevem postopku (MPP, energija zgoščanja: $2,7 \text{ MJ/m}^3$). Zgoščanje z višjo energijo pričakovano daje nižjo optimalno vlago in višjo maksimalno suho gostoto (Slika 6, Preglednica 6). Energija zgoščanja s pnevmatskim orodjem je višja od SPP in nižja od MPP, kar ocenjujemo kot ugodno in primerno za izdelavo nenosilnih testnih sten.

Na Sliki 6 je s horizontalno sivo črtkano črto za posamezno energijo zgoščanja prikazana tudi suha gostota, ki ustreza v tehničnih smernicah in standardih priporočeni zgoščenosti $D_{\text{PR}} = 98 \%$ (Preglednica 2), sivo senčena območja pa prikazuje območje vlage, pri kateri je možno z določeno energijo zgoščanja mešanico zgostiti do zgoščenosti $D_{\text{PR}} = 98 \%$.



Slika 5. Rezultati preiskav vgradljivosti - SPP.



Slika 6. Rezultati preiskav vgradljivosti mešanice 55 m% G2 + 45 m% A za različne energije zgoščanja (SPP, pnevmatsko orodje in MPP).

Energija zgoščanja	w_{opt} (%)	$\rho_{d\text{max}}$ (Mg/m^3)
SPP	8,0	2,14
Pnevmatsko orodje	5,9	2,22
MPP	4,8	2,30

Preglednica 6. Optimalna vlaga in maksimalna suha gostota mešanice 55 m% G2 + 45 m% A za različne energije zgoščanja (SPP, pnevmatsko orodje in MPP).

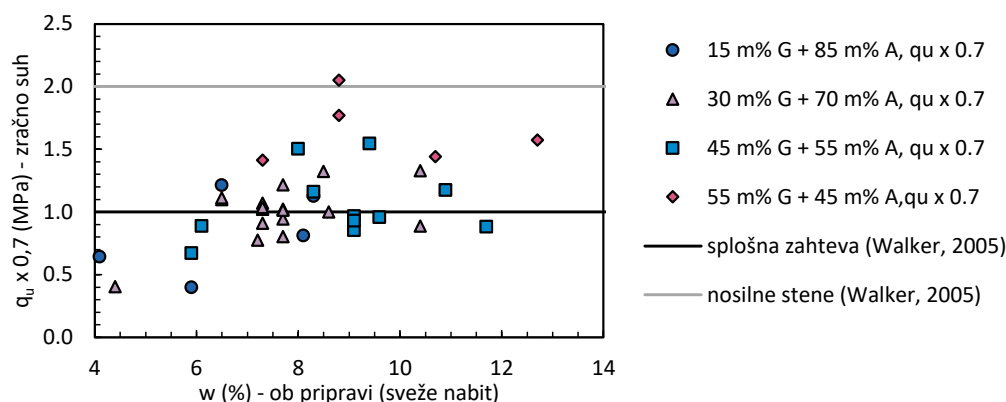
3.2.3 Tlačna trdnost nabitih preizkušancev

Tlačno trdnost smo izmerili na nabitih valjastih preizkušancih, premera 100 mm in višine 120 mm (dimenzija Proctorjevega kalupa), ki smo jih pred izvedbo preiskave do konstantne mase sušili na zraku. Sušenje preizkušancev na zraku smo prekinili, ko v dveh zaporednih tehtanjih v času 24 ur ni bilo spremembe mase, kar je skladno z [Walker, 2005]. Vlaga zračno suhih preizkušancev je bila odvisna od deleža glin v mešanici. Zračno suhim preizkušancem iz mešanice z najnižjim deležem glin (15 m% G) smo izmerili vlago med 0,2 % in 0,4 %. Preizkušanci iz mešanice s 30 m% glin so bili preiskani pri vlagi med 0,5 % in 0,8 %, najvišjo vlago po sušenju na zraku pa so izkazovali preizkušanci iz mešanice s 45 % glin (0,8 % do 1,2 %) ter tisti iz mešanice s 55 % glin (1,1 % do 1,2 %).

Razmerje med višino in premerom valjastih preizkušancev je 1,2 in ne izpolnjuje priporočila tehnične smernice [Walker, 2005] ($h:d = 2:1$). Ista tehnična smernica za preizkušance premera $d = 105 \text{ mm}$ in višine $h = 115 \text{ mm}$ predvideva zmanjšanje izmerjene tlačne trdnosti s faktorjem 0,7 (Preglednica 3). Na Sliki 7 so zato, v odvisnosti od vlage mešanice pri nabijanju po SPP, prikazane izmerjene vrednosti enosne tlačne trdnosti zračno suhih preizkušancev, pomnožene s korekcijskim faktorjem 0,7. Ker so mešanice z enako sestavo, ne glede na uporabljen gline (G1, G2), z vidika vgradljivosti primerljive (Slika 5), so rezultati preiskav enosne tlačne trdnosti nabitih, zračno suhih preizkušancev, prikazani le za različne sestave mešanic.

Tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev je odvisna od zrnastostne sestave mešanice in vlage mešanice pri nabijanju. Večji delež glin v mešanici v splošnem vodi do višje izmerjene enosne tlačne trdnosti zračno suhih preizkušancev.

Zračno suhi preizkušanci, nabiti pri vlagi, nižji od optimalne vlage (Slika 5), izkazujejo nekoliko nižjo enosno tlačno trdnost kot preizkušanci, nabiti pri optimalni vlagi oz. pri vlagi, ki je nekoliko višja od optimalne. Kljub temu da standardi in tehnične smernice dopuščajo tudi vlago, nižjo od optimalne (Preglednica 2), pa rezultati kažejo, da je ta za preiskane mešanice z vidika doseganja zahtevane enosne tlačne trdnosti (Slika 7, horizontalni črti, [Walker, 2005]) neugodna.



Slika 7. Reducirana (0,7 q_u) enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od vlage mešanice pri nabijanju po SPP.

3.2.4 Vpliv vlage

Da bi ugotovili obnašanje nabitih zračno suhih preizkušancev v vlažnem okolju, smo jih izpostavili visoki zračni vlagi (nega v vlažnih komorah) oz. stiku z vodo na način, da smo jih postavili na vlažno polst (Slika 8). Spremembo mase preizkušancev zaradi vlaženja/sušenja smo spremljali s tehtanjem. Posamezno fazo preiskave (vlaženje/sušenje) smo zaključili, ko se masa preizkušancev v dveh zaporednih kontrolnih tehtanjih z razmakom vsaj 12 ur ni spremenila [Hrovat, 2020].

Na Sliki 9 je prikazano razmerje mase preizkušancev po določenem času izpostavljenosti vlagi oz. po določenem času sušenja na zraku (m_{trenutna}) in mase zračno suhih preizkušancev pred stikom z vlago ($m_{\text{zračno suh}}$). Preizkušanci, postavljeni v vlažno komoro, ki niso bili v neposrednem stiku z vodo, so se vlažili počasi. Po približno 40 dneh v pogojih konstantne vlage se je njihova masa ustalila (Slika 9, vlažna komora), dosežena povprečna vlaga pa je znašala 3,5 %. Nasprotno so se preizkušanci, postavljeni na vlažno polst, navlažili hitreje in bolj ter že po 10 dneh dosegli konstantno maso (Slika 9, vlažna polst) in

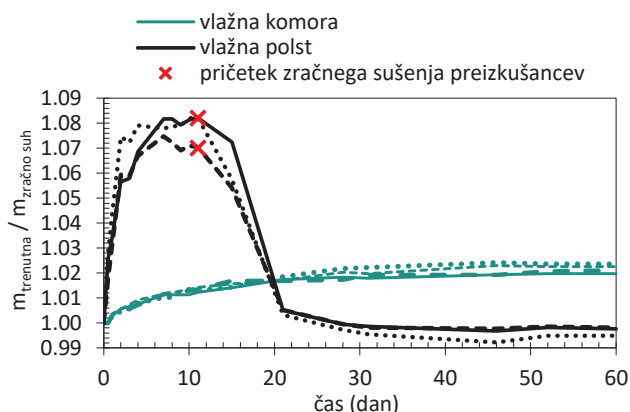
vlago višjo od 9,0 %. Po 11 dneh stika z vodo smo zato preizkušance, postavljene na vlažno polst, počasi začeli sušiti na zraku do konstantne mase.

Končna masa preizkušancev po ponovnem sušenju je bila primerljiva z začetno maso zračno suhih preizkušancev (Slika 9). Manjše odstopanje pa je posledica trajnih deformacij in odpadanja drobcev preizkušanca v času izpostavljenosti vodi, kar lahko neugodno vpliva tudi na njihove mehanske lastnosti (Slika 8, desno). Nasprotno pa na preizkušancih, ki so bili izpostavljeni višji relativni vlažnosti, brez neposrednega stika z vodo (vlažna komora), očitnih vizualnih sprememb nismo zaznali.

François et al. [2017] so v raziskavah mehanskih lastnosti nestabiliziranih butanih zemljin, izpostavljenih spremembam vlage v okolici, poudarili tudi pomen sukcije. Na Sliki 10 je prikazana retencijska krivulja preiskanih mešanic z višjo vsebnostjo gline. S horizontalnimi črtami so na isti sliki prikazane tudi značilne vlage preizkušancev; optimalna vlaga ($w_{\text{opt spp}}$), vlaga zračno suhih preizkušancev ($w_{\text{zračno suh}}$) in vlaga zračno suhih preizkušancev, ki so bili izpostavljeni vlagi ($w_{\text{vlažna polst}}$, $w_{\text{vlažna komora}}$).



Slika 8. Zračno suh preizkušanec po 8 urah stika z vodo preko vlažne polsti (levo) in isti preizkušanec po 11 dneh stika z vodo preko vlažne polsti in 17 dneh sušenja na zraku (sredina). Na desni sliki je paralelni preizkušanec, ki je bil 11 dni v stiku z vodo preko vlažne polsti in 17 dni sušen na zraku z vidno večjo razpoko.



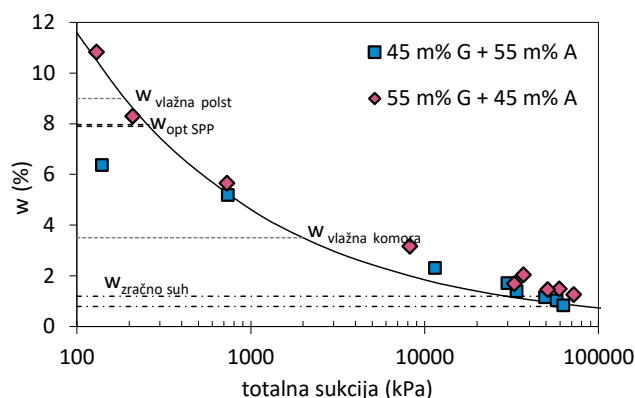
Slika 9. Vpliv vlage na zračno suhe preizkušance, podan kot razmerje trenutne mase preizkušancev (m_{trenutna}) in začetne mase zračno suhega preizkušanca ($m_{\text{zračno suh}}$), v odvisnosti od časa. S simbolom rdeče barve je prikazan čas pričetka zračnega sušenja preizkušancev, ki so bili vlagi izpostavljeni preko vlažne polsti.

Zaradi vlaženja upada totalna sukcija, in posledično tudi tlačna trdnost. Vlaga preizkušancev, ki so bili v stiku z vodo (Slika 10, $w_{\text{vlažna polst}}$), se je ustalila pri vrednosti, ki je višja od optimalne vlage mešanice.

Bui et al. [2011, 2014] za zemljino, ki je sestavljena iz 5 % gline, 30 % melja, 49 % peska in 16 % gramoza, poročajo o konstantni tlačni trdnosti zračno suhih preizkušancev ($q_u \approx 2,0$ MPa pri $w_{\text{zračno suh}} < 4,0$ %). Z višanjem vlage in nižanjem sukcije tlačna trdnost drastično upada. Preizkušanec, preiskan pri vlagi 7 % tako izkazuje tlačno trdnost 1,35 MPa, pri vlagi 11 % pa le še 0,40 MPa, kar je 20 % izmerjene tlačne trdnosti zračno suhega preizkušanca. Nabita zemljina, ki je sestavljena iz 9 % gline, 38 % melja, 50 % peska in 3 % gramoza, pa ima pri vlagi ca. 1,5 % tlačno trdnost 1,7 MPa, pri vlagi 12,5 % pa le še 0,25 MPa.

Na podlagi rezultatov preiskav in podatkov iz literature lahko sklepamo, da je vpliv vlage na mehanske lastnosti preiskanih nabitih mešanic velik, vpliv vlaženja zračno suhih nabitih preizkušancev pa neugoden. Za bolj natančno kvantitativno ovrednotenje vpliva vlage na mehanske lastnosti nabitih zrač-

no suhih mešanic bi morali nabor preiskav razširiti, preiskave pa izvesti sistematično s simulacijo možnih kritičnih stanj in njihovega trajanja v času uporabe butanih elementov.



Slika 10. Totalna sukcija mešanic s prikazanimi območji optimalne vlage ($w_{\text{opt SPP}}$), vlage zračno suhih preizkušancev ($w_{\text{zračno suh}}$) in vlage zračno suhih preizkušancev, izpostavljenih vlagi ($w_{\text{vlažna polst}}$, $w_{\text{vlažna komora}}$).

4 IZDELAVA IN UGOTAVLJANJE LASTNOSTI NENOSILNE BUTANE STENE

Na podlagi rezultatov preiskav in kriterijev, ki jih podaja literatura ([Walker, 2005], [Minke, 2006], [NZS 4298, 1998]), smo za izdelavo dveh testnih nenosilnih butanih sten izbrali mešanici z najvišjo vsebnostjo gline. V Preglednici 7 so podani parametri mešanic, iz katerih smo izdelali nenosilni testni steni.

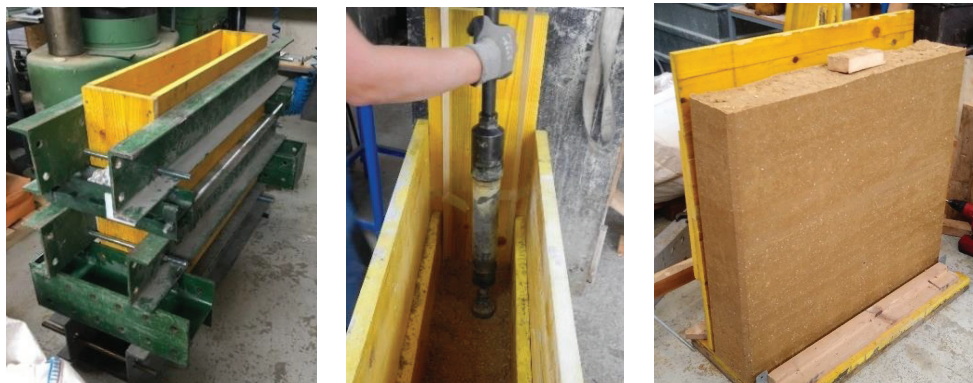
	Sestava mešanice (m% Glina + m% Agregat)	Vlažnost mešanice (%)
Stena 1	55 m% G + 45 m% A	7.5
Stena 2	45 m% G + 55 m% A	6.5

Preglednica 7. Sestava in vlažnost mešanic, uporabljenih za izdelavo Stene 1 in Stene 2.

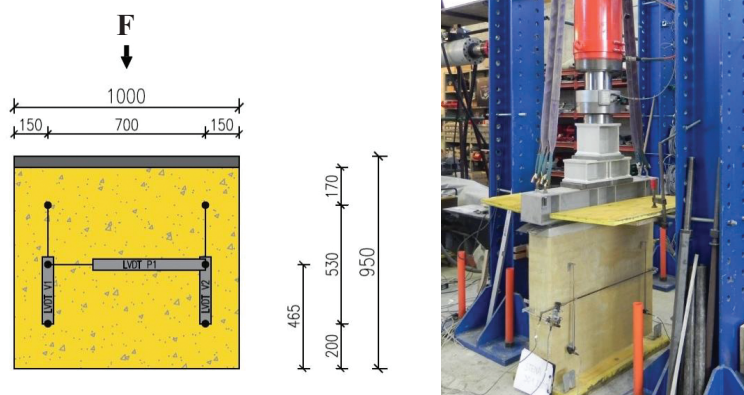
V konstrukcijskem laboratoriju smo izdelali dve nenosilni testni steni (Stena 1, Stena 2), v opažu višine 0,95 m, dolžine 1,0 m in širine 0,2 m (Slika 11, levo). V vogale opaža smo postavili trikotne lesene letve in s tem ustvarili posnete robove, ki so manj krušljivi. Za izdelavo sten smo uporabili pnevmatsko orodje, s premerom udarne ploskve približno 5 cm in hodom bata 30 cm (Slika 11, sredina). Iz primerjave parametrov vgradljivosti enake mešanice, zgoščene po različnih postopkih (Slika 6), smo ocenili, da je za vgradnjo 30 kg mešanice v eno plast stene, tlorisne površine 1,0 m x 0,2 m, potreben čas nabijanja s pnevmatskim orodjem 2–4 min, enakomerno po celotni površini. Po odstranitvi opaža smo steno sušili na zraku v laboratoriju (Slika 11, desno) in zvezno spremljali relativno vlago stene in relativno vlažnost okoliškega zraka. Po uravnoteženju vlage sten z zračno vlago v laboratoriju, smo za doseganje ustreznega naleganja sistema za obremenjevanje, zgornjo površino sten izravnali z betonom debeline približno 5 cm. Prehajanje cementnega mleka v steno smo preprečili z namestitvijo PVC-folije na stiku med butano zemljino in betonom. Izravnalni beton se je pred izvedbo preiskave tlačne trdnosti stene sušil 7 dni.

Na Sliki 12 je prikazana postavitve merskih mest in pogled na pripravljeno steno pred izvedbo tlačnega preizkusa v laboratoriju. Enakomerno razporeditev sile po celotni naležni površini stene smo dosegli s sklopom jeklenih elementov za razporeditev obtežbe, katerih maso smo pri vrednotenju rezultatov preiskave ustrezno upoštevali. Med tlačnim obremenjevanjem smo merili vertikalno silo F in pomike. Iz pomikov, izmerjenih z induktivnimi merilniki (LVDT V1, LVDT V2 in LVDT P1) nameščenimi na osrednjem delu obeh straneh največjih površin stene smo izračunali horizontalne in vertikalne deformacije stene.

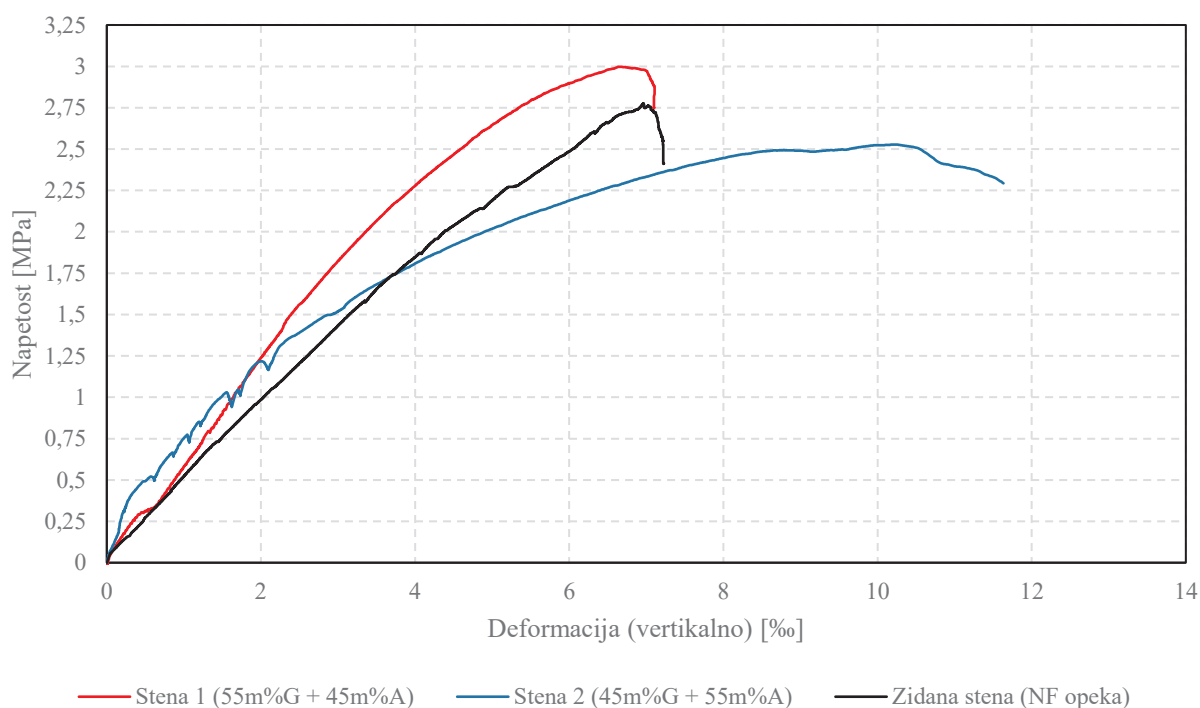
Na Sliki 13 je prikazan razvoj vertikalne napetosti v odvisnosti od povprečne vertikalne deformacije za obe steni. Zračno suha Stena 1, narejena iz mešanice z večjim deležem gline, ima za 0,5 MPa višjo tlačno trdnost kot zračno suha Stena 2, izdelana iz mešanice z večjim deležem agregata, pri kateri je bila dosežena tlačna trdnost 2,5 MPa. Razlog za izbiro sestave mešanice za Steno 2 je bil pojav razpok pri zračnem sušenju Stene 1, ki so nastale kot posledica krčenja gline. Ker je glina vezivo v mešanici in narekuje tlačno trdnost, je nižja izmerjena tlačna trdnost Stene 2 posledica



Slika 11. Opaž za izdelavo stene (levo), zbijanje mešanice v opaž s pnevmatskim orodjem (sredina) in izdelana stena po odstranitvi opaža (desno).



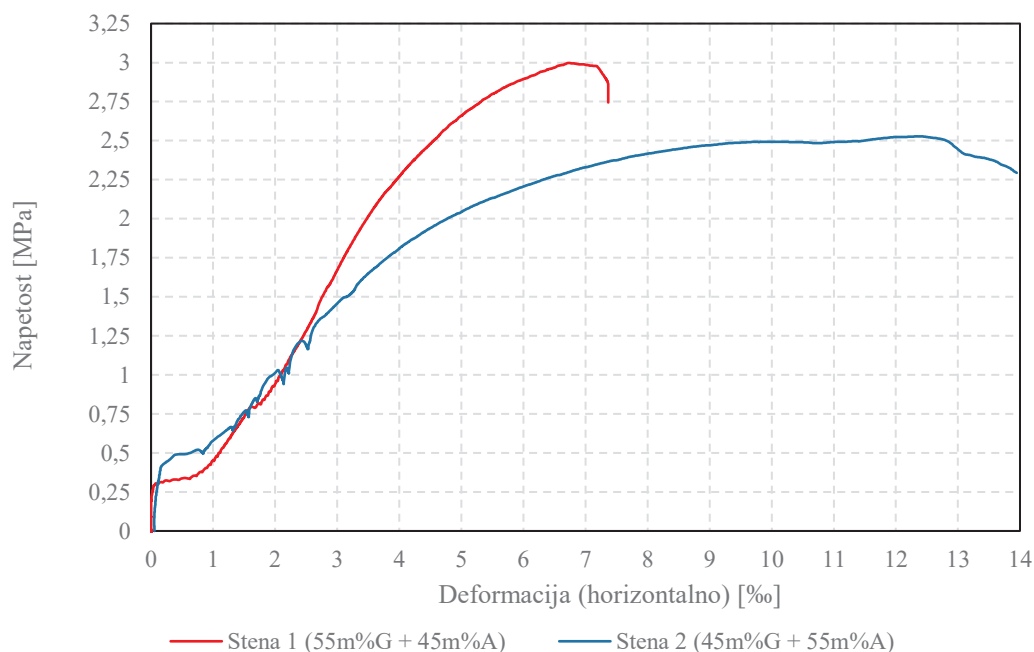
Slika 12. Shema postavitev merskih mest (levo) in prikaz postavitve Stene 1 pred izvedbo tlačnega preizkusa (desno).



Slika 13. Razvoj odnosa med vertikalno tlačno napetostjo in pripadajočo povprečno vertikalno deformacijo za obe obravnavani steni iz butane zemljine in zidane stene (NF opeka in apnena malta).

manjšega deleža gline. Prva razpoka po sredini celotne višine Stene 1 se je pojavila pri vertikalni napetosti 0,3 MPa, pri Steni 2 pa pri vertikalni napetosti 0,4 MPa, kar je razvidno iz spremembe togosti na grafih na Sliki 14. Kljub relativno zgodnjemu nastanku vertikalne razpoke sten smo za oceno modula elastičnosti pri izračunu upoštevali zgornjo mejo tlačne napetosti pri 1 MPa. Na ta način dobljena vrednost modula elastičnosti znaša za obe steni približno 500 MPa, kar je primerljivo z vrednostmi za zidovino iz opeke normalnega formata slabše in srednje kakovosti v kombinaciji z apneno malto, kar je tudi prikazano na Sliki 13 z grafom črne barve (pridobljeno v okviru projekta PERPETUATE v laboratoriju).

Poleg predstavljenih mehanskih karakteristik obravnavnih sten sta za njihovo obnašanje med obremenitvijo pomembna tudi porušna oblika in razvoj poškodb. Na Sliki 15 levo so prikazane vertikalne razpoke zaradi delovanja vertikalne obtežbe na Steni 1, kjer je prišlo do hipnega padca nosilnosti. Pri Steni 2, prikazani na Sliki 15 desno, pa je prišlo do zelo neugodne hipne porušitve, kjer se je zgornja polovica stene odlomila in odpadla. Takšna porušitev brez rezerve nosilnosti po nastanku večjih razpok je nesprejemljiva, zato se odsvetuje uporaba takšnih stenskih elementov za nosilne stene. V primeru predelnih sten običajno nimamo tako velikih vertikalnih obremenitev, ki bi povzročile takšno nesprejemljivo obliko porušitve. Za potrditev predstavljenih rezultatov je treba v laboratoriju



Slika 14. Razvoj odnosa med vertikalno tlačno napetostjo in pripadajočo povprečno horizontalno deformacijo (določeno z merilnega mesta LVDT P1) za obe steni.

izdelati in preizkusiti večje število preizkušancev. Dodatno je treba za predelne stene s preizkusi preveriti strižno in izvenravinsko nosilnost ter pripadajoče porušne mehanizme, ki bi potencialno lahko predstavljali nevarnost za uporabnike stavbe med potresom.

metode preiskav, minimalne zahtevane lastnosti materiala ter pravila za izdelavo sten in dekorativnih elementov. V raziskavi smo zato želeli preveriti, ali so rezultati standardnih geomehanskih preiskav lahko uporabni za načrtovanje sestave ter za oceno lastnosti mešanic, primernih za tovrstno gradnjo.



Slika 15. Prikaz nastanka razpok zaradi vertikalne obremenitve za Steno 1 (levo) in končna porušna oblika za Steno 2 (desno).

5 ZAKLJUČEK

V moderni arhitekturi je opazen trend uporabe tehnike butane zemljine za gradnjo različnih stenskih ali dekorativnih elementov. Gre za skoraj opuščeno tehniko gradnje, ki pa zaradi iskanja trajnostnih rešitev v gradbeništvu ponovno pridobiva veljavo. Širšo uporabo butane zemljine trenutno omejuje pomanjkanje področnih standardov in tehničnih smernic, ki bi opredeljevali

Rezultati laboratorijskih preiskav mešanic glin (jalovine) in agregata so spodbudni, saj kažejo na možnost uporabe standardnih geomehanskih preiskav pri določanju sestave in začetnem vrednotenju lastnosti butane zemljine. S preiskavami mešanic različne sestave smo pokazali, da sta predvsem zrnastostna sestava – zlasti delež gline – ter ustrezna vlaga pri vgrajevanju ključna parametra mešanice, ki vplivata na doseženo zgoščenost in posledično na lastnosti sveže nabitih in zračno

suhih preizkušancev. Ugotovili smo, da imajo zračno suhi preizkušanci, pripravljeni iz mešanic z večjim deležem gline, višjo enoosno tlačno trdnost kot tisti z večjo vsebnostjo agregata. Zračno suhi preizkušanci, nabiti pri optimalni vlagi in pri vlagi, ki je nekoliko višja od optimalne, izkazujejo višjo enoosno tlačno trdnost kot zračno suhi preizkušanci, nabiti pri vlagi, nižji od optimalne. Čeprav tuji standardi in tehnične smernice dopuščajo tudi vgrajevanje mešanic pri vlagi nižji od optimalne, rezultati kažejo, da je to za preiskane mešanice z vidika doseganja zahtevane enoosne tlačne trdnosti neugodno. Glede na zahteve tujih standardov in tehničnih smernic se je med preiskanimi mešanicami kot najprimernejša pokazala kombinacija 55 m % gline in 45 m % agregata. Omejitev možne uporabe predstavlja vlažno okolje, saj so rezultati laboratorijskih preiskav pokazali velik vpliv vlage na mehanske lastnosti preiskanih nabitih mešanic in neugoden vpliv vlaženja zračno suhih nabitih preizkušancev. Za bolj natančno kvantitativno ovrednotenje vpliva vlage na mehanske lastnosti nabitih zračno suhih mešanic bi morali nabor preiskav razširiti, preiskave pa izvesti sistematično s simulacijo možnih kritičnih stanj in njihovega trajanja v času uporabe butanih sten in dekorativnih elementov.

Izvedba tlačnega preizkusa izdelanih testnih sten je pokazala, da lahko zračno suhe stene iz butane zemljine dosežejo primerljivo tlačno trdnost kot z apneno malto obstoječe zidane stene, ki dosega vrednosti med 2 in 4 MPa [Kržan in sod., 2014]. Vrednosti modulov elastičnosti pa kažejo, da so stene iz butane zemljine bistveno bolj podajne v primerjavi s kakovostno izvedeno opečno steno in se približajo vrednostim, ki ustrezajo zidovini iz opeke normalnega formata slabše in srednje kakovosti. Porušni mehanizem obeh sten se je izkazal za zelo neugodnega, saj je v obeh primerih prišlo do hipnega padca nosilnosti ali popolne porušitve in do odloma zgornjega dela stene. Glede na izkazane porušne oblike obravnavanih preizkušancev odsvetujemo uporabo butane zemljine brez ojačitvenih vlaken za izdelavo nosilnih sten. Obstaja pa potencial za uporabo butane zemljine pri izdelavi nenosilnih in dekorativnih stenskih elementov ter polnil endoskeletne nosilne konstrukcije. Za ovrednotenje primernosti uporabe butane zemljine za te primere pa so potrebne dodatne namenske mehanske strižne in izvenravninske laboratorijske preiskave nenosilnih sten in polnil. Izboljšanje lastnosti mešanic je možno tudi z dodajanjem veziv in/ali naravnih vlaken v mešanico pred izdelavo stene, s čimer bi po vsej verjetnosti izboljšali mehansko obnašanje stene in preprečili hipno porušitev po nastanku kritičnih razpok.

6 ZAHVALA

Raziskavo je sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnih programov P2-0185 (Potresno inženirstvo) in P2-0180 (Vodarstvo in geotehnika: orodja in metode za analize in simulacije procesov ter razvoj tehnologij).

7 LITERATURA

Asal, A., Building with Earth - Sustainable Stabilization and Additive Manufacturing for Rammed Earth Construction, Bitkom Research. Bachelor thesis, HTWG Konstanz, University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, 2021.

ASTM, ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, 2011.

ASTM, (a), ASTM D6836-16, Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. ASTM International, 2016.

ASTM, (b), ASTM E2392/E2392M-10, Guide for Design of Earthen Wall Building Systems. ASTM International, 2016.

ASTM, ASTM D4943-18, Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method. ASTM International, 2018.

Bui, Q. B., Hans, S., Morel, J. C., Mollion, V., Influence of water on the mechanical characteristics of rammed-earth material, WIT Transactions on the Built Environment, 118, 565-576, <https://doi.org/10.2495/STR110471>, 2011.

Bui, Q. B., Morel, J. C., Hans, S., Walker, P., Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, Construction and Building Materials, 54, 163-169, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>, 2014.

DIN, (a), DIN 18127:2012-09, Soil, investigation and testing - Proctor-test. Deutsches Institut für Normung, 2012.

DIN, (b), DIN 18132:2012-04, Soil, testing procedures and testing equipment - Determination of water absorption. Deutsches Institut für Normung, 2012.

El Hajjar, A., Chauhan, P., Prime, N., Plé, O., Effect of suction on the mechanical characteristics of uniformly compacted rammed earth, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 143(1), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012045>, 2018.

EN, EN 933-9:2009+A1:2013, Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 9. del: Ugotavljanje finih delcev - Preskus z metilen modrim. European committee for standardization, 2013.

François, B., Palazon, L., Gerard, P., Structural behaviour of unstabilized rammed earth constructions submitted to hygroscopic conditions, Construction and Building Materials, 155, 164-175, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.012>, 2017.

Houben, H., Guillard, H., Earth Construction: A comprehensive guide. Rugby, Warwickshire, UK: Intermediate Technology Publications, 1994.

Hrovat, M., Potencial uporabe butane zemljine v sodobnem stavbarstvu. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020.

IS, IS:2110-1980, Indian standard - Code of practice for in situ construction of walls in buildings with soil - cement. Bureau of Indian standards, 1981.

Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., Bosiljkov, V., Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis

of historical buildings, *Bull Earthquake Eng*, 13, 203–236 (2015).
<https://doi.org/10.1007/s10518-014-9686-x>Minke, C., Building with earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser Basel, 2006.

NZS, NZS 4298:1998, Materials and workmanship for earth buildings. New Zealand standards, 1998.

Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B., Prispevek k boljšemu prepoznavanju nabrekalnega potenciala v zemljinah in mehkih kamninah., *Geologija*, 53(2), 181–196, 2010.

Rogala, W., Anysz, H., Narloch, P., Designing the composition of cement-stabilized rammed earth with the association analysis application, *Materials*, 14(6), <https://doi.org/10.3390/ma14061390>, 2021.

Sabbà, M. F., Tesoro, M., Falcicchio, C., Foti, D., Rammed earth with straw fibers and earth mortar: Mix design and mechanical characteristics determination, *Fibers*, 9(5), <https://doi.org/10.3390/fib9050030>, 2021.

SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724, SADC harmonized standard for rammed earth structures – code of practice THC 03. African organisation for standardisation, 2014.

SIST, SIST EN 13286-2:2010/AC:2013, Nevezane in hidravlično vezane zmesi - 2. del: Preskusne metode za določanje laboratorijske referenčne gostote in deleža vlage - Preskus po Proctorju. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2013.

SIST, SIST EN ISO 17892-1:2015, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 1. del: Ugotavljanje vlažnosti. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2015.

SIST, SIST EN ISO 17892-3:2016, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 3. del: Ugotavljanje gostote zrn. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2016.

SIST, SIST EN ISO 17892-4:2017, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 4. del: Ugotavljanje zrnastostne sestave. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2017.

SIST, (a), SIST EN ISO 17892-7:2018, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 7. del: Enosni tlačni preskus. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2018.

SIST, (b), SIST EN ISO 17892-12:2018, Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 12. del: Ugotavljanje meje tekočine in plastičnosti. Slovenski inštitut za standardizacijo, 2018.

United Nations Environment Programme, Building materials and the climate: Constructing a new future. Nairobi, 2023.

Walker, P., Keable, R., Martin, J., Maniatidis, V., Rammed earth: design and construction guidelines. BRE Bookshop, 2005.

Zbašnik-Senegačnik, M., Tradicionalna gradnja z ilovico, AR. Arhitektura, Raziskave, 5(1), 40–45, 2005.