

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

MANCA HROVAT

**POTENCIAL UPORABE BUTANE ZEMLJINE
V SODOBNEM STAVBARSTVU**

Magistrsko delo št.:

**THE POTENTIAL OF RAMMED EARTH IN
CONTEMPORARY BUILDINGS**

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

Somentorja:

asist. dr. David Antolinc

asist. dr. Jasna Smolar

Član komisije:

Ljubljana, 2020

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.8:691(497.4)(043.3)
Avtorica:	Manca Hrovat, dipl. inž. str. (UN)
Mentor:	prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentorja:	asist. dr. David Antolinc , asist. dr. Jasna Smolar
Naslov:	Potencial uporabe butane zemljine v sodobnem stavbarstvu
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	71 str., 14 preg., 38 sl.
Ključne besede:	gradnja z zemljino, butane stene, enoosna tlačna trdnost, trajnostna gradnja, standardni Proctorjev preizkus

Izvleček

Butana zemljina predstavlja potencialno alternativo konvencionalnim materialom za nenosilne stene. Z butanimi stenami lahko ustvarimo ugodno bivalno okolje, saj predstavljajo dober toplotni akumulator, hkrati pa ne emitirajo človeku škodljivih snovi. Zaradi enostavnega načina gradnje ter z uporabo lokalne zemljine pa lahko tudi znižamo vpliv na okolje v primerjavi z ostalimi konvencionalnimi materiali. V okviru magistrske naloge je bila pregledana tuja literatura na področju gradnje butanih sten, aktualni standardi in predpisi. Sledi praktični del gradnje dveh butanih sten iz lokalne zemljine. V okviru spremljevalnih preiskav osnovnega materiala se je na manjših preizkušancih iz zračno sušene zmlete zemljine in z dodatki peska izvedlo več preiskav, s katerimi smo določili optimalno mešanico. Na stenah smo spremljali potek sušenja in krčenja ter jim končno določili še enoosno tlačno trdnost, togost in porušni mehanizem. Dobljene rezultate smo primerjali s podatki iz literature. Na podlagi lastnih ugotovitev smo predstavili potrebne ukrepe za nadaljnji razvoj gradnje butanih sten v Sloveniji. Ti zajemajo uvedbo standardov prilagojenih za Slovenijo in nadaljevanje preiskav na butani zemljini. Izpostavili smo tudi pomembnost praktičnega dela za ugotavljanje ekonomske upravičenosti tovrstne gradnje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.8:691(497.4)(043.3)
Author: Manca Hrovat, BSc
Supervisor: Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.
Co-supervisor: assist. David Antolinc, Ph.D., assist. Jasna Smolar, Ph.D.
Title: The potential of rammed earth in contemporary buildings
Document type: Master thesis
Scope and tools: 71 p., 14 tab., 38 fig.
Key words: rammed earth, rammed earth walls, unconfined compressive strength, sustainable building, standard Proctor test

Abstract

Rammed earth walls present a potential alternative to conventional partition and non-structural walls. Earth as a building material does not cause adverse effects on humans and nature. Rammed earth walls can be a great heat-accumulating element and due to its simplicity and use of local materials it is also less harmful for the environment than highly processed conventional materials. This thesis includes internationally recognised literature, current standards and regulation review. This is followed by practical part of building two rammed earth walls from local material. Apart from main tests several side experiments were conducted on samples of air-dried ground earth with added aggregate to determine the optimal mixture. The process of drying and shrinkage of walls was monitored and finally the compressive strength, stiffness and failure mechanism of the walls were determined. The results were compared with the results obtained from literature review. Based on our findings, we presented the necessary measures for further development of rammed earth construction in Slovenia. These include introduction of rammed earth standards specific for Slovenia and continuation of conducting experiments on rammed earth. We also emphasize the importance of practical work with rammed earth to determine the economic viability of this type of construction.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Vlatku Bosiljkovu za usmerjanje in vodenje pri izdelavi magistrskega dela.

Zahvaljujem se tudi somentorjema dr. Davidu Antolincu in dr. Jasni Smolar za vso potrebno pomoč in podporo pri izdelavi naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem zaposlenim na Katedri za geotehniko in Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij, ki so mi pomagali pri realizaciji naloge.

Hvala tudi gospodu Domnu Zupanu, ki je z veseljem posodil potrebno opremo za izdelavo sten in delil praktične izkušnje dela z naravnimi materiali.

Posebna zahvala gre partnerju in družini za podporo in spodbudo v času študija.

KAZALO VSEBINE

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	V
Zahvala	VII
Kazalo vsebine	IX
Kazalo preglednic	XII
Kazalo grafikonov	XIII
Kazalo slik	XIV
Simboli	XVI
Okrajšave	XVIII
1. Uvod in cilji	1
1.1. Nove priložnosti iz stare tradicije	2
2. Butane stene	5
2.1. O butani zemljini	5
2.1. Butana zemljina v Sloveniji in po svetu	6
2.2. Standardi	9
2.3. Ustreznost zemljine	11
2.4. Glina kot vezivo	11
2.5. Največja suha gostota, optimalna vlaga in zgoščenost	11
2.6. Sušenje, krčenje in razpoke	12
2.6.1. Razpoke kot posledica krčenja	13
2.6.2. Preventivni ukrepi za preprečevanje nastanka razpok zaradi krčenja	13
2.7. Tlačna trdnost	13
2.8. Zrnavostna sestava in tlačna trdnost	15
2.9. Vpliv sukcije na mehanske lastnosti	16
2.9.1. Sukcija pri stabilizirani zemljini	17
2.10. Meja krčenja	17
2.11. Ekologija in vpliv na okolje	18
2.11.1. Ocena vpliva na okolje	18
2.12. Stabilizacija	19
2.13. Zaščitni premazi	20
3. Materiali v raziskavi	21

3.1.	Zemljina.....	21
3.2.	Agregat	21
3.3.	Mešanice.....	21
4.	Geomehanske laboratorijske preiskave	22
4.1.	Priprava preizkušancev za raziskave	22
4.2.	Priprava zemljine.....	22
4.3.	Priprava mešanic	22
4.4.	Izvedba standardnih geomehanskih preiskav	23
4.5.	Areometrija-Pario in standardni postopek.....	24
4.6.	Meja židkosti in meja plastičnosti	25
4.7.	Vodovpojnost Enslin–Neff.....	26
4.8.	Proctorjev preizkus	26
4.9.	Enoosni tlačni preizkus.....	27
4.10.	Določanje meje krčenja	27
4.11.	Meritve sukcije	28
4.12.	Določanje gostote zrn	28
4.13.	Navlaževanje in sušenje preizkušancev	28
5.	Izdelava sten	30
5.1.	Material.....	30
5.2.	Preiskave.....	30
5.3.	Priprava mešanice.....	31
5.4.	Priprava opaža	31
5.5.	Izdelava stene	32
5.6.	Sušenje in krčenje stene.....	33
5.7.	Preiskava tlačne trdnosti sten	34
5.7.1.	Pozicije LVDT merilnikov	35
5.7.2.	Vrednotenje rezultatov	38
6.	Rezultati in diskusija	40
6.1.	Lastnosti osnovnih materialov	40
6.2.	Laboratorijske recepture mešanic.....	41

6.2.1.	Krivulje zrnivosti mešanic.....	41
6.2.2.	Sejalne analize mešanic.....	43
6.3.	Vgradljivost mešanic.....	43
6.4.	Enoosni tlačni preizkus	46
6.5.	Primer rezultatov za vzorec B8 SPP.....	46
6.6.	Enoosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev	50
6.7.	Sukcija.....	52
6.8.	Navlaževanje in sušenje preizkušancev	53
6.9.	Krčenje sten zaradi sušenja	56
6.10.	Temperatura in RH jedra stene tekom sušenja.....	58
6.11.	Temperatura jedra in okoliškega zraka	59
6.12.	Meritev tlačne trdnosti stene	60
7.	Zaključek.....	67
8.	Viri	69
8.1.	Standardi in smernice	70
8.2.	Elektronski viri.....	71

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pojmi in definicije	3
Preglednica 2: Primerjava prednosti in slabosti materialov	6
Preglednica 3: Standardni in smernice za gradnjo butanih sten	11
Preglednica 4: Tlačne trdnosti preizkušancev iz različnih zemljin	16
Preglednica 5: Izbrana razmerja mešanic	23
Preglednica 6: Pregled izvedenih preiskav glede na material	24
Preglednica 7: Zrnavostna sestava in vlaga mešanic pri nabijanju.....	30
Preglednica 8: Izvedene preiskave na mešanicah za izdelavo stene in stenah	30
Preglednica 9: Lastnosti osnovnih materialov	40
Preglednica 10: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic.....	42
Preglednica 11: Rezultati Proctorjevih preizkusov in gostote zrn za vse mešanice	46
Preglednica 12: Enosne tlačne trdnosti preizkušancev	47
Preglednica 13: Končne vrednosti krčenja sten.....	56
Preglednica 14: Rezultati preizkusa tlačne trdnosti.....	66

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: Zrnavostna sestava G1, G2 in agregata.....	41
Graf 2: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic A, B in C	41
Graf 3: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic D, E in F	42
Graf 4: Primerjava izračunane in dejanske zrnivostne sestave.....	43
Graf 5: Rezultati SPP za mešanico A in ponovitevno serijo	44
Graf 6: Rezultati SPP za B in D	44
Graf 7: Rezultati SPP za C in E.....	45
Graf 8: Rezultat SPP, MPP in simuliran preizkus za mešanico F	45
Graf 9: Napetost v odvisnosti od deformacije za vzorec B8 SPP	47
Graf 10: Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od začetne vlage	51
Graf 11: Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od zračne vlage.....	51
Graf 12: Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od zračne vlage-serije preizkušancev	52
Graf 13: Sukcija mešanic in zemljine G2.....	53
Graf 14: Navlaževanje preizkušancev v vlažni komori.....	54
Graf 15: Navlaževanje in sušenje preizkušancev na vlažni polsti.....	54
Graf 16: Sušenje stene 1	57
Graf 17: Sušenje stene 2.....	57
Graf 18: Primerjava povprečnih vertikalnih in horizontalnih deformacij med stenama	58
Graf 19: T in RH jedra stene 1 in 2 v času sušenja	58
Graf 20: Primerjava temperatur okoliškega zraka z jedrom sten skozi celotno obdobje sušenja	60
Graf 21: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 1	63
Graf 22: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 1 - območje do prve razpoke	64
Graf 23: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 2	64
Graf 24: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 2 - območje do prve razpoke	65

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz gradnje butane stene (Vir: www.firstinarchitecture.co.uk)	5
Slika 2: Butanje ilovnatih sten na Ptujskem polju v začetku 70-tih (Zbašnik-Senegačnik, 2005) (levo), stavba iz butane zemljine zgrajena leta 1828, Weilburg, Nemčija (Minke, 2006) (desno).....	7
Slika 3: Gradnja z zemljino po svetu skozi zgodovino (Vir: craterre.org)	7
Slika 4: Alnatura Arbeitswelt (vir: www.dgnb-system.de)	8
Slika 5: WISE Building (Vir: www.cat.org.uk)	8
Slika 6: PERA Building (Vir: lockwood-construction.com)	8
Slika 7: Dekorativna fasadna stena iz butane zemljine (vir: www.gnezdo.si)	9
Slika 8: Graf meje krčenja (Hobbs et al., 2018)	18
Slika 9: Primer nestabilizirane butane stene pod 20-letnimi vremenskimi vplivi (Bui et. al, 2009)(levo), primer stabilizirane butane stene pod 20-letnimi vremenskimi vplivi (Bui et al., 2009)(desno)	20
Slika 10: G2 v big bag vreči	21
Slika 11: Uporabljen mlin za mletje zemljine (levo), zmleta zemljina (desno)	22
Slika 12: Naprava za areometrijo Pario (levo), areometrija po standardnem postopku (desno)	25
Slika 13: Primer pnevmatskega orodja (Vir: Amazon, 2020)	26
Slika 14: Kocka iz improviziranega preizkusa (levo), serija kock iz improviziranega preizkusa (desno)	27
Slika 15: Naprava za določanje enoosne tlačne trdnosti (levo), preizkušane po porušitvi (desno)	27
Slika 16: Shematski prečni prerez naprave (Maček, 2012) (levo), naprava za merjenje sukcije WP4-T (desno)	28
Slika 17: Preizkušane v vlažni zaprti komori (levo), preizkušane na navlaženi polsti v kontaktu z vodo (desno)	29
Slika 18: Preizkušanci v skledah pripravljeni za vlažno komoro (levo), preizkušanci na podstavkih s filter papirji, preko katerih so se navzemali vode (desno)	29
Slika 19: Mešalec za beton (levo), pripravljena mešanica v big bag vreči (desno)	31
Slika 20: Opaž stena 1 (levo), opaž z ojačitvami stena 1 (desno)	32
Slika 21: Opaž stena 2 (levo), opaž stena 2, končni sestav (desno)	32
Slika 22: Nasuta plast mešanice v opažu pred nabijanjem (levo), stena 1 po odstranitvi opaža (sredina), stena 1 z nameščenimi merilniki pomika in senzorjem relativne vlage (RH) (desno)	33
Slika 23: Postavitev merilnikov pomika (L1, L2, VL, VD, D2 in D1) na steni 1 (levo) in 2 (desno), enote so v mm	33
Slika 24: Stena 1 po končanem krčenju z vidno razpoko (levo), zapolnitev razpoke z enako mešanico višje vlage (desno)	34
Slika 25: Stena 2 prekrita z vlažno prevleko (levo), stena 2 po končanem krčenju (desno)	34
Slika 26: Vlivanje betona za izravnavo (levo), stena z izravnalnim slojem betona (desno)	35

Slika 27: Stena 1 pred tlačnim preizkusom (levo), stena 1 z merilniki horizontalnega in vertikalnega pomika (desno).....	35
Slika 28: Položaj LVDT merilnikov spredaj (levo) in desno STENA 1 (desno)	36
Slika 29: Položaj LVDT merilnikov zadaj (levo) in levo STENA 1 (desno).....	36
Slika 30: Položaj LVDT merilnikov spredaj (levo) in desno STENA 2 (desno)	37
Slika 31: Položaj LVDT merilnikov zadaj (levo) in levo STENA 2 (desno).....	37
Slika 32: Masa sklopa za raznos obtežbe z bata na steno 1 (levo), masa sklopa za raznos obtežbe z bata na steno 2 (desno).....	38
Slika 33: Vzorec G po 8h navlaževanja, meja navlaževanja na tretjini do sredini preizkušanca (levo), vzorec G po 24 urah direktnega kontakta z vodo (desno)	55
Slika 34: Vzorec E po 8 urah navlaževanja (levo), vzorec E po 28 dneh (17 dni sušenja) (sredina), vzorec F po 28 dneh (17 dni sušenja) (desno)	55
Slika 35: Stena 2 spredaj-sredinska vertikalna razpoka (levo), stena 2 zadnja stran-sredinska vertikalna razpoka (desno)	61
Slika 36: Stena 2 desna stran-vertikalna razpoka (levo), stena 2 leva stran-robna vertikalna razpoka (desno).....	61
Slika 37: Končne razpoke stene 1 desno (levo), končne razpoke stene 1 zadaj (desno).....	62
Slika 38: Končne razpoke stene 1 spredaj in levo (levo), končne razpoke stene 1 zadaj in levo (desno)	62

SIMBOLI

a	presejek
D	premer zrn
D ₆₀	premer zrn pri 60% presejku
D ₃₀	premer zrn pri 30% presejku
D ₁₀	premer zrn pri 10% presejku
D _{max}	največji premer zrn
D _p	povprečni premer vzorca
d	premer odprtin na situ
e	količnik por
f	karakteristična tlačna trdnost (NZS 4298)
f _a	povprečna izmerjena tlačna trdnost (Britanska smernica)
f _c	karakteristična tlačna trdnost (Britanska smernica)
g	težnostni pospešek
h _p	povprečna višina vzorca
I _p	indeks plastičnosti
MB, MB _f	metilen modro vrednost
m	masa
m _s	masa suhe zemljine
m _w	masa vode
p	tlak
R	plinska konstanta
RH	relativna vlaga
q _u	enoosna tlačna trdnost
Sr	stopnja zasičenosti
s	sukcija (totalna)
T	temperatura
t	čas
u _a	porni tlak zraka
u _w	porni tlak vode
V	volumen zemljine
V _a	volumen zraka

V_s	volumen zrn zemljine
V_v	volumen por
V_w	volumen vode
w	gravimetrična vlaga
w_A	vodovpojnost
w_f	končna vlaga zračno sušene zemljine
w_i	začetna vlaga zemljine
w_L	meja židkosti
w_{opt}	optimalna vlaga
w_P	meja plastičnosti
w_s	meja krčenja
w_0	naravna vlaga (gravimetrična)
w_v	molska masa vodne pare
ε	deformacija
ρ	gostota
ρ_d	suha gostota
$\rho_{d \max}$	maksimalna suha gostota
ρ_s	gostota zrn
σ	totalna napetost
$\sigma_{\max}$	maksimalna napetost
σ_{n-1}	standardna deviacija (Britanska smernica)
χ_1	najnižja izmerjena tlačna trdnost (NZS 4298)
χ_a	povprečna izmerjena tlačna trdnost (NZS 4298)
χ_s	standardna deviacija (NZS 4298)

OKRAJŠAVE

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	International Organization for Standardization
IZS	Inženirska zbornica Slovenije
KGT	Katedra za geotehniko
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MPP	Modificirani Proctorjev preizkus
NZS	New Zealand Standards
SIST	Slovenski inštitut za standardizacijo
SPP	Standardni Proctorjev preizkus
UL FGG	Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
USCS	Unified Soil Classification System, sistem klasifikacije

1. UVOD IN CILJI

Vedno strožje zahteve po ekološki odgovornosti nas spodbujajo k iskanju novih rešitev v grajenem okolju. V vseh fazah objekta, med katerimi je najdaljša faza uporabe, moramo zagotavljati, da bodo vplivi objekta na okolje in ljudi sprejemljivi. Na ekološki odtis objekta lahko vplivamo s premišljeno in trajnostno zasnovo objekta in izbiro gradbenih materialov. Razvoj gradbenih materialov generalno poteka v dveh smereh. Prva so visokotehnološki materiali, ki vpliv na okolje znižujejo posredno. To je z boljšimi mehanskimi in toplotnimi karakteristikami, zaradi česar potrebujemo manj materiala, ki je hkrati bolj obstojen v primerjavi s konvencionalnim. Drugo rešitev predstavljajo naravni lokalni materiali, ki so okolju bolj prijazni zaradi minimalne stopnje predelave in transporta. Čeprav se je v preteklosti gradilo le z naravnimi materiali, je večina teh znanj pri nas pozabljena, zaradi pomanjkanja prakse pa tudi ni ustreznih standardov za gradnjo s temi materiali.

V primeru visokotehnoloških materialov je ekološka cena za izboljšane lastnosti nemalokrat višja od konvencionalnih, saj so za izdelavo potrebni novi, zahtevni procesi z več energije in kemikalij. Minimalno predelani lokalni materiali imajo zelo verjetno manjši vpliv na okolje kot visokotehnološki in konvencionalni materiali, vendar pa pogosto ne ustrezajo zakonskim predpisom-npr. niso požarno odporni, niso obstojni na klimatske pogoje in biološke dejavnike (mah, plesen, živali,...), dovoljujejo dvig kapilarne vlage itn. Da bi te zahteve izpolnili je treba naravni material dodatno predelati ali ga izboljšati z anorganskimi dodatki. Za predelavo oz. izboljšavo so pogosto potrebni tehnološki postopki, primerljivi postopkom proizvodnje konvencionalnih materialov. Glede na dosežene lastnosti predelanih oz. izboljšanih naravnih materialov, se lahko izvede primerjalna študija vzdržne rabe predelanega (izboljšanega) naravnega materiala in konvencionalnega materiala.

Glede na opisano dilemo vidimo, da je okolju prijazna gradnja, ki izpolnjuje vse zakonske zahteve izziv. Ta od nas zahteva stalno kontrolo in sposobnost pogleda na širšo sliko, brez da bi z doseganjem enega cilja ogrozili doseganje ostalih, enakovrednih ciljev. Z iskanjem pravega ravnotežja se ukvarja t.i. trajnostna gradnja, ki medsebojno usklajuje vpliv na okolje, ekonomijo ter družbeno-socialni vidik (IZS, 2013). To pomeni, da moramo stavbo zasnovati na način, da ima najmanjši možen vpliv na okolje, je cenovno dostopna, izvedljiva ter ustreza končnemu uporabniku. Vsaka stavba mora seveda izpolnjevati tudi 8 bistvenih zahtev za objekte (GZ Ur.l.RS 61/17 in 72/17).

Rast interesa po okolju prijaznem delovanju dokazujejo tudi spremembe v zakonodaji in političnih strategijah:

- 8. točka 15. člena aktualnega gradbenega zakona narekuje, da je bistveno zagotoviti trajnostno rabo naravnih virov. Poudarek je predvsem na uporabi okoljsko sprejemljivih surovin in sekundarnih materialov v objektih.

- Strategija EU Trajnostna Evropa do leta 2030 spodbuja dejavnosti, ki gospodarno ravnaajo z naravnimi materiali (Svet Evropske Unije, 2020).
- Pojav sistemov certificiranja trajnostnosti stavb kot so Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), ipd.

Čeprav je družbi uspelo dodobra izpopolniti kombinacijo ekonomije z družbenimi merili, nas sedaj čaka še ekološki izziv, ki je verjetno najbolj kompleksen od vseh treh. Žal ima skrb za ekologijo to pomanjkljivost, da ne zagotavlja takojšnjega in otipljivega rezultata. Posledice onesnaževanja se v okolju v večini primerov kažejo šele na dolgi rok. Temu pogosto sledijo kurativni ukrepi, ki le v nekaterih primerih povrnejo obravnavano območje v prvotno stanje pred onesnaženjem. Zato je poleg iniciative posameznikov potrebna posodobitev tehnične in zakonodajne regulative na način, da bi ta spodbujala razvoj in rabo preventivnih ekoloških rešitev v praksi.

1.1. Nove priložnosti iz stare tradicije

Butana zemljina je danes v Sloveniji že pozabljen način gradnje, ki pa ga zaradi majhnega vpliva na okolje ponovno obujamo v grajenem okolju. Zemljino za izdelavo butanih sten je možno dobiti v Sloveniji, priprava ustrezne mešanice za stene pa zahteva minimalno predelavo. Po prenehanju uporabe lahko steno (iz neonesnažene zemljine) vrnemo v naravno okolje, brez povzročene škode. Izpolnjevanje ekoloških zahtev je njena prednost, večji izziv pa se pojavi pri doseganju ustreznih fizikalno mehanskih lastnosti.

Za boljše razumevanje mehanskih lastnosti zemljin si lahko pomagamo z znanjem in izkušnjami iz geotehnike. V geotehniki se zemljino za boljšo mehansko odpornost stabilizira z dodatki kot je npr. apno. S stabilizacijo se izboljša tudi odpornost zemljine na vlago in zmrzal. Podatki v literaturi kažejo, da je stabilizacija zemljin, tradicionalno v rabi v geotehniki (zemeljskih delih), lahko učinkovit ukrep tudi pri izboljšanju fizikalno mehanskih lastnosti butanih sten. Dodatek veziva v butani steni poslabša okoljski odtis, zaradi proizvodnega procesa veziva.

Z ozirom na to je večinski del naloge osredotočen na raziskave ustreznosti lokalnega materiala, priprave mešanic in izdelave butanih sten brez veziv. Cilji naloge so:

1. Pregled literature in standardov.
2. Izbira lokalne zemljine za izdelavo mešanice.
3. Določitev parametrov za izbiro optimalne mešanice lokalne zemljine za izdelavo butanih sten.
4. Izdelava dveh sten in določitev enoosne tlačne trdnosti ter pripadajočih parametrov pri enoosnem tlačnem preizkusu.

S temi cilji smo poskušali osvetliti pretekla znanja in podati smernice za nadaljnje možnosti raziskovanja in uporabe zemljine v stavbarstvu. Preverili smo tudi ali so laboratorijske preiskave, prvenstveno

namenjene za identifikacijo geomehanskih lastnosti zemljin, ustrezne za izbiro zemljine in načrtovanje sestave mešanic. Na podlagi rezultatov laboratorijskih raziskav in primerjave s podatki iz literature smo poskušali izdvojiti parametre, ki so merodajni v posameznih fazah načrtovanja izdelave butanih sten (izbira zemljine, priprava receptur mešanic in izvedba stene).

Preglednica 1: Pojmi in definicije

butana stena (angl. <i>rammed earth wall</i>)	Stena izdelana iz vlažne zemljine, z ali brez veziv, vgrajena v začasni opaž z nabijanjem po slojih
butana zemljina (angl. <i>rammed earth</i>)	Vlažna zemljina, z ali brez veziv, vgrajena v začasni opaž z nabijanjem po slojih
glina (angl. clay)	zemljina, ki pade pod sito 0,002 mm, ki se v vlažnem stanju obnaša plastično, zračno suha pa dosega znatno trdnost
konvencionalni materiali	materiali v gradbeništvu, ki so splošno znani, uveljavljeni in pogosto uporabljeni
mehanska stabilizacija (angl. <i>mechanical stabilization</i>)	postopek dodajanja in mešanja drugega materiala k osnovni zemljini s specifično zrnastostno sestavo in/ali obliko zrn in/ali vsebnostjo gline
melj (angl. silt)	del zemljine, ki pade pod sito 0,063 mm in ostane nad 0,002 mm, ki se v navlaženem stanju obnaša neplastično oz. malo plastično in v zračno suhem stanju ne dosega bistvene trdnosti
mešanica (angl. <i>mixture</i>)	za namene te naloge pojem mešanica predstavlja zmes osnovne zemljine in agregata
organska zemljina (angl. <i>organic soil</i>)	zemljina, ki je temne barve in ima izrazit vonj
pesek (angl. sand)	del zemljine, ki pade pod sito 2mm in ostane na situ 0,063mm
recikliranje	ponovna uporaba že uporabljenih, odpadnih snovi v proizvodnem procesu

se nadaljuje ...

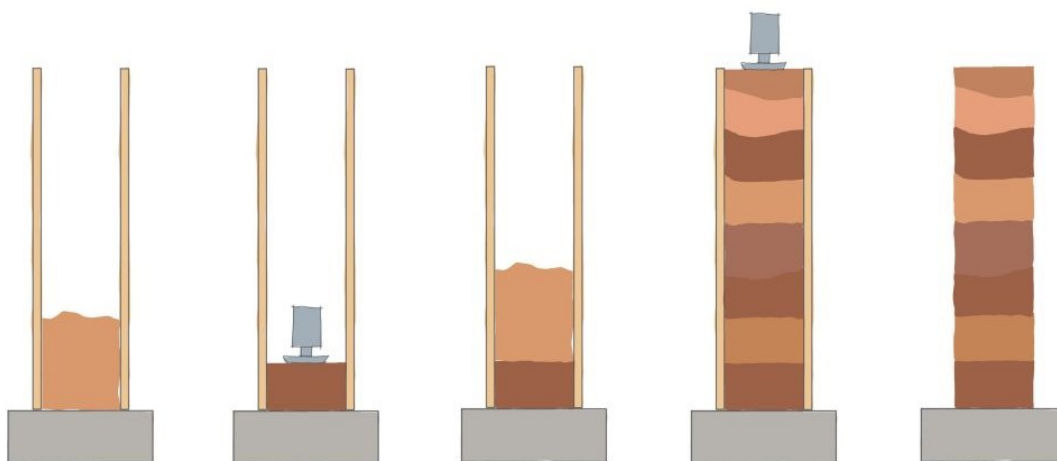
... nadaljevanje Preglednice 1

stabilizacija zemljin (angl. <i>soil stabilization</i>)	postopek priprave homogene mešanice zemljine z vezivom (vezivi) in po potrebi z vodo, ki z ustreznim vgrajevanjem zemljine bistveno spremeni (srednje in dolgoročno) karakteristike zemljine na način, da so le te stabilne predvsem v smislu odpornosti na vodo in zmrzal
vezivo (angl. <i>binder</i>)	snov, ki kratkoročno ali dolgoročno izboljša lastnosti materiala, v katerega je vmešana
visokotehnološki materiali	specializirani materiali izdelani z najsodobnejšo tehnologijo
zemljina (angl. <i>soil</i>)	zmes nevezanega agregata mineralnih zrn, organskih delcev, zraka in vode

2. BUTANE STENE

2.1. O butani zemljini

Butana zemljina (angl. *rammed earth*) je tehnika gradnje, pri kateri v opaž nabijamo mešanico gline in peska pri relativno nizki vlagi (Slika 1). Je ena najstarejših gradbenih tehnik, ki izhaja iz pokrajin bogatih z zemljino. Butane stene so se ohranile in razvijale predvsem v suhih vročih podnebjih, saj zaradi velike mase predstavljajo dober toplotni akumulator, ki omili vpliv zunanjih temperatur in tako ustvarja bolj udobno notranje okolje. Izdelava stene je ročna-z enostavnim nabijalom ali s pnevmatskim orodjem. V preteklosti se je zaradi pomanjkanja ostalih gradbenih materialov na ta način gradilo tudi nosilni del stavb, danes pa zaradi novih znanj, ekonomije in tudi določenih regulativnih zahtev butane stene predstavljajo potencialno rabo predvsem kot nenosilni elementi pri načrtovanju zdravega bivalnega okolja, učinkovite rabe energije in v trajnostni gradnji. Za izgradnjo stene lahko uporabimo le zemljino z dodatkom gline ali peska, zaradi česar je možno butano zemljino 100% reciklirati. Z butanimi stenami lahko ustvarimo zdravo bivalno okolje, saj ne emitirajo človeku škodljivih snovi-ob pogoju, da je zemljina inertna. Z uporabo lokalne zemljine lahko znižamo stroške prevoza materiala in s tem vpliv na okolje. Butana stena je običajno debelin 15cm ali več.



Slika 1: Shematični prikaz gradnje butane stene (Vir: www.firstinarchitecture.co.uk)

Kljub vsem naštetim prednostim so butane stene v Sloveniji redke. Glavni razlog je uporaba konvencionalnih materialov kot so opeka, beton in ostalih umetnih kompozitov. Ti materiali so bolj prilagojeni na naše podnebje. Zaradi kemičnih in toplotnih procesov pri izdelavi so v primerjavi z butano zemljino mehansko bolj odporni. Poleg pomanjkanja znanja o butanih stenah je lahko odpor do tega materiala tudi psihološki. Ljudje smatrajo zemljino za umazano, pogosto tudi ne ločimo med pojmom glina, zemlja, zemljina, prst itn. (Minke, 2006). Ravno zaradi tega se pojavljajo skrbi tudi v zvezi z pojavom insektov in ostalih škodljivcev v stenah. Ta skrb je odvečna, če poskrbimo, da v mešanici ni organskih snovi in je stena pravilno izvedena. To pomeni, da izločimo potencialna hranila za škodljivce z uporabo izključno anorganske zemljine, s pravilno izvedbo (nabijanje) pa steno zadostno zgostimo.

Problem predstavlja tudi občutljivost butanih sten na vlago. To pomanjkljivost podobno kot pri ostalih materialih rešimo z zaščitnimi premazi, napušči in hidroizolacijo, da preprečimo direkten stik z vodo in kapilarni dvig, lahko pa tudi s stabilizacijo. V Preglednici 2 so prikazane nekatere prednosti in slabosti butanih sten glede na konvencionalne materiale.

Preglednica 2: Primerjava prednosti in slabosti materialov

Butane stene	Konvencionalni materiali
Nestandardizirani-vsaka nova mešanica zahteva svoje raziskave	Standardizirani
Zamudna izvedba in priprava materiala	Enostavna izvedba
Pomanjkanje znanja in izkušenj	Obsežno in napredno znanje ter veliko izkušenj
Predsodki in zadržki	Splošno znani materiali
Spremenljive mehanske lastnosti glede na material, na katere lahko vplivamo le deloma	Definirane mehanske lastnosti
Časovno in ekonomsko nepredvidljivi projekti	Čas in ceno izdelave je možno določiti
Za izdelavo ustrezne mešanice potrebujemo mehansko energijo in toplotno za sušenje zemljine do ustrezne vlage	Proizvodnja (opeke, cementa,...) zahteva visoke temperature in dodatne kemične procese
100% recikliranje	Po prenehanju uporabe postane material odpadek, nekatere je možno ponovno uporabiti, vendar nikoli z enakimi lastnostmi kot prvotni izdelek
Nima škodljivega vpliva na človeka	Prisotnost določenih aditivov lahko negativno vpliva na človeka
Za Slovenijo ne obstajajo standardi za projektiranje in preskušanje butanih sten	So standardi in tehnična regulativa

2.1. Butana zemljina v Sloveniji in po svetu

V Sloveniji se je gradnja butanih hiš razvila v severovzhodnem delu v 19. stoletju. Na Ptujskem polju so tehniko gradnje imenovali butana gradnja oz. but. Butane stene so pred vodo zaščitili z ustrezno visokimi temelji, hidroizolacijo in napuščem, saj so se zavedali, da so v stiku z vodo slabo obstojne. Na redkih butanih hišah brez ustrezne zaščite pred vodo, ki so se ohranile do danes, so vidne trajne poškodbe zaradi vpliva vode. Butane hiše, ki so bile ustrezno zaščitene pred vodo, teh poškodb tudi po 50 letih ne kažejo (Zbašnik-Senegačnik, 2000).

Arheološka najdišča po svetu pričajo o uporabi zemljine za gradnjo že 10 000 let nazaj. Nekatere stavbe iz zemljine so v uporabi še danes. V Evropi (predvsem Nemčija in Francija) so ohranjeni razni

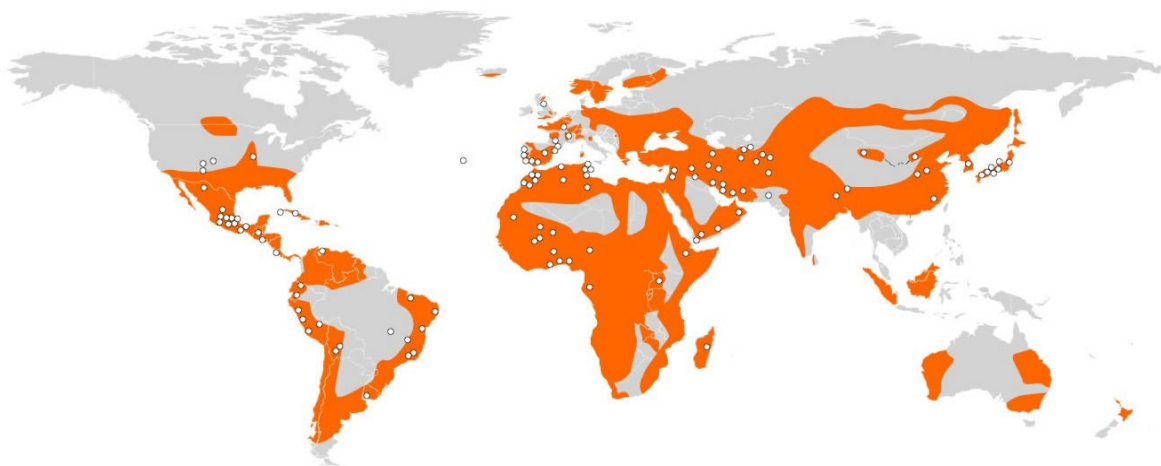
dokumenti, med drugim tudi francoski priročnik za gradnjo z zemljino iz druge polovice 18. stoletja, ki je bil kasneje preveden in uporabljen tudi v ZDA, Italiji, na Danskem in v Avstraliji. Gradnja z zemljino se je v Evropi širila predvsem zaradi poceni dostopnega materiala, pomanjkanja lesa in tudi zaradi odpornosti sten na ogenj (Zbašnik-Senegačnik, 2005).



Slika 2: Butanje ilovnatih sten na Ptujskem polju v začetku 70-tih (Zbašnik-Senegačnik, 2005) (levo), stavba iz butane zemljine zgrajena leta 1828, Weilburg, Nemčija (Minke, 2006) (desno)

Slika 3 prikazuje razširjenost uporabe zemljine za gradnjo po svetu (oranžna barva). Bele pike predstavljajo stavbe pod UNESCO zaščito. Tovrstna gradnja je razširjena predvsem v vročih suhih podnebjih, kjer:

- je dostop do ostalih surovin in gradbenih materialov zelo omejen in/ali
- so količine padavin minimalne in ne prihaja do zmrzali ter ostalih poškodb zaradi vode.



Slika 3: Gradnja z zemljino po svetu skozi zgodovino (Vir: craterre.org)

Danes se ta način gradnje obuja predvsem zaradi nizkega ekološkega odtisa v razvitih državah kot so ZDA, Kanada, Nemčija, Francija, Velika Britanija, tudi v sosednji Avstriji. Stene se uporabljajo kot nosilne ali nenosilne, v več primerih so zaradi pogoste izpostavljenosti vlagi in vodi stabilizirane z apnom ali cementom. Na slikah 4-6 so prikazani primeri sodobnih stavb z butanimi stenami.



Slika 4: Alnatura Arbeitswelt (vir: www.dgnb-system.de)

Objekt: Alnatura Arbeitswelt

Lokacija: Darmstadt,

Nemčija

Leto izgradnje: 2019

Butane stene na tem objektu so del fasade in niso nosilna konstrukcija.

Objekt je prejel platinasto priznanje po DGNB in dosegel končno oceno 83,3%, pri izpolnjevanju ekoloških kriterijev je dosegel 100%.



Slika 5: WISE Building (Vir: www.cat.org.uk)

Objekt: WISE Building

Lokacija: Wales, Velika Britanija

Leto izgradnje: 2010

Stene za del stavbe predstavljajo nosilno konstrukcijo, druge so uporabljene kot predelne.



Slika 6: PERA Building (Vir: lockwood-construction.com)

Objekt: PERA Building

Lokacija: Santa Fe, ZDA

Leto izgradnje: 2010

Objekt je prejel zlato priznanje po LEED lestvici.

V Sloveniji je bila leta 2017 zgrajena dekorativna fasadna butana stena na objektu ZRC-SAZU enota Barje (Slika 7). Steno je zgradilo slovensko podjetje, ki se ukvarja s prodajo okolju prijaznih gradbenih

materialov. Industrijsko pripravljena mešanica za steno je bila dobavljena iz Nemčije. To je očitna pomanjkljivost tega projekta, saj se zaradi mase zemljine in oddaljenosti proizvodnje do mesta izgradnje poveča ekološki odtis take stene. Razlog za uvoz materiala pa je najverjetneje ta, da v Sloveniji trenutno ni uveljavljenih proizvajalcev mešanice za butane stene.



Slika 7: Dekorativna fasadna stena iz butane zemljine (vir: www.gnezdo.si)

Ker je butana zemljina vsaj na slovenskem območju dokaj nepoznana tehnika, ni aktualnih raziskav, kjer bi lahko ugotavljali prisotnost primernih zemljin za gradnjo na naših tleh. Rokavec (2014) je s pregledom znanih nahajališč gline v Sloveniji predstavila ocenjevanje potencialnega izkoriščanja teh nahajališč glede na vrsto parametrov. Raziskava je osredotočena na gline, ki so primerne za rabo v opekarstvu – te so glede na zemljino za butane stene bolj »čiste« in morajo ustrezati strožjih zahtevam o zrnavostni sestavi, primeseh itn. Ker lahko za butane stene uporabimo tudi manj čiste gline, lahko sklepamo, da je v Sloveniji glede na to raziskavo še več nahajališč zemljin ustreznih za izdelavo butanih sten. Avtorica ugotavlja, da je glina prisotna po večini Slovenije razen na območju Notranjske, Bele Krajine in Posočja. Zanimiv podatek je tudi to, da se večina glinokopov po Sloveniji ni zaprla zaradi pomanjkanja surovine, ampak zaradi nekonkurenčnosti izdelave opeke. Torej obstaja možnost rabe lokalne zemljine za izdelavo butanih sten, na kateri je predhodno potrebno izvesti določene preiskave za ugotavljanje ustreznosti zemljin.

2.2. Standardi

V Sloveniji in Evropi trenutno ni aktualnih standardov za gradnjo z zemljino, specifično za butane stene. Nova Zelandija, ZDA in Avstralija so primer razvitih držav, v katerih veljajo aktualni standardi za gradnjo z zemljino. V grobem se vsebine standardov delijo na tri področja:

- klasifikacija zemljin,
- ustrezna izbira zemljine za gradnjo,

-
- konstrukcijski sistemi gradnje z zemljino.

Te vsebine se razlikujejo glede na izbrano tehniko gradnje (omet, polnilo, opeka ali stena iz zemljine) in lokacijo gradnje (potresna ogroženost). Ti standardi ne podajajo ukrepov, kako graditi z zemljino glede na vrsto podnebja, podajajo pa splošna priporočila kako jih zaščititi pred padavinam in vremenskimi vplivi.

Med dostopnimi viri smo zasledili 3 tipe dokumentov:

- standardi in regulative priznane s strani nacionalnih standardizacijskih organov,
- normativni dokumenti priznani na ravni lokalnega oz. nacionalnega organa
- tehnične dokumentacije in smernice.

V Nemčiji je bil do leta 1971 veljaven standard DIN 18951, ki je obravnaval gradnjo z zemljino. Po prenehanju veljavnosti ni bil obnovljen, zato se je leta 2011 predlagalo nove osnutke nemških standardov gradnje z zemljino DIN 18945-18947, vendar pa noben od teh ne obravnava tehnike butanih sten, le omet, malto ter gradnjo s čerpiči t.j. opeka iz nežgane gline (Schroeder, 2018).

Ker se v tej nalogi osredotočamo predvsem na lastnosti zemljine za gradnjo butanih sten, smo ključne podatke pridobili iz standardov in smernic navedenih v Preglednici 3. Od teh se z lastnostjo materiala ukvarjajo predvsem NZS 4298, ASTM E2392 in britanska smernica z naslovom Physical properties of rammed earth (Walker et al., 2005). Glede na pregled teh dokumentov podprt z rezultati preiskav v praktičnem delu naloge smo poskušali izpostaviti vplivne parametre pri učinkoviti rabi zemljine za izdelavo butanih sten.

Novozelandski standardi so potencialno aplikativni v Sloveniji, saj del standarda obravnava gradnjo stavb iz butane zemljine na potresno ogroženih območjih. Ameriška smernica večino tehničnih priporočil povzema po novozelandskih standardih. Vsebuje pa nekoliko več splošnih podatkov kot so prednosti tovrstne gradnje, obstoječi standardi po svetu, vplivi na okolje itn. Britanska smernica je po vsebini podobna novozelandskim standardom.

Preglednica 3: Standardni in smernice za gradnjo butanih sten

	Naslov dokumenta	Država	Leto izdaje	Šifra	Vrsta dokumenta
A	Engineering design of Earth Buildings	Nova Zelandija	1998	NZS 4297:1998	Standard
B	Materials and Workmanship for Earth Buildings	Nova Zelandija	1998	NZS 4298:1998	Standard
C	Earth Buildings not requiring Specific Design	Nova Zelandija	1998	NZS 4299:1998	Standard
D	Design of Earthen Wall Building Systems	ZDA	2016	ASTM E2392 / E2392M-10 (2016)	Standard
E	Physical properties of rammed earth	Velika Britanija	2010	Appendix A	Smernica
F	Specification for rammed earth works	Velika Britanija	2010	Appendix B	Smernica
G	Structural wall design	Velika Britanija	2010	Appendix C	Smernica

Opomba: 20.02.2020 so bili NZS standardi posodobljeni. Ker je bila raziskava že v teku in so novi standardi omejeno dostopni, jih nismo vključili v nalogo.

2.3. Ustreznost zemljine

Stene iz butane zemljine so okolju manj škodljive z naslova rabe lokalnega materiala. NZS 4298 navaja, da je zemljina neprimerna za uporabo, če vsebuje organske snovi, vodotopne soli ali prevelika zrna, ki bi vplivala na homogenost mešanice. V slednjem primeru je možno tako zemljino presejati. Lastnosti zemljine lahko določimo s standardnimi geomehanskimi preiskavami, kot so določanje zrnastostne sestave, Atterbergove meje plastičnosti, ipd. Glede na rezultate geomehanskih preiskav pa določimo ali je potrebno zemljini dodati npr. pesek, glino, odstraniti prevelika zrna oz. je potrebno zemljino stabilizirati. Noben od navedenih dokumentov ne izpostavlja ali je zemljino potrebno obdelati pred pripravo mešanice. Hall (2004) npr. v postopku priprave mešanice navaja, da se je zemljino najprej sušilo na 105°C in zdrobilo, da bi zagotovili lažje mešanje in čim bolj homogeno mešanico.

2.4. Glina kot vezivo

Gline so zaradi relativno velike specifične površine in negativnega naboja sposobne vezati nase vodo. Negativni naboj je odvisen glede na vrsto kristalne strukture in posledično specifično površino. To vpliva na plastičnost glin, ki jih v geotehniki popišemo z Atterbergovimi mejami plastičnosti ter aktivnostjo (merilo za nabreklijvost glin) (Das, 2010). Zaradi teh lastnosti je ključno ugotoviti optimalno količino gline v končni mešanici za izdelavo butanih sten.

2.5. Največja suha gostota, optimalna vlaga in zgoščenost

Butane stene se izdeluje z relativno suho mešanico (gline in peska) glede na ostale tehnike gradnje z zemljino – omet, zidaki in polnila se npr. izdelujejo pri višji vlagi. Za doseganje najboljših možnih mehanskih lastnosti stene ali preizkušanca moramo za izbrano energijo zbijanja določiti optimalno vlago

mešanice. To se lahko določi s Standardnim Proctorjevim preizkusom (SPP). Rezultat preizkusa je optimalna vlaga in maksimalna suha gostota pri izbrani energiji zbijanja. Na optimalno vlago vpliva vrsta zemljine, gostota zrn, zrnastostna sestava, oblika zrn in vrsta glinenih mineralov (Das, 2010). Vsi ti našteti kriteriji posledično vplivajo na mejo židkosti, ki pa vpliva na obliko krivulje optimalne vlage (Lee et al., 1972, cit. po Das, 2010).

Po NZS 4298 mora biti vlaga mešanice znotraj območja $w_{opt} \pm 3\%$, preizkušanci oz. stena morajo dosegati stopnjo zgoščenosti 98% relativno na rezultate preizkusa po NZS 4402.1.1:1986, ki predstavlja novozelandsko različico SPP. Ker pa se zemljine med seboj razlikujejo, je potrebno to območje prilagoditi glede na izbrano mešanico, sploh v primeru zelo nizke optimalne vlage. V tem primeru je 3% nižja vlaga od optimalne zelo verjetno neprimerna za vgradnjo. Britanska smernica dovoljuje območje vlage mešanice znotraj $w_{opt} \pm 1-2\%$. Optimalno vlago se določa po standardu BS 1377-4:1990, ki predstavlja Britansko različico SPP. Relativno glede na to je določena tudi stopnja zgoščenosti 98%.

2.6. Sušenje, krčenje in razpoke

Na stenah se lahko zaradi okolja, kateremu so izpostavljene, takoj po izgradnji pojavijo volumske deformacije – krčenje in razpoke. Razpoke so lahko tanke in plitke, lahko pa so izrazite in segajo nekaj centimetrov v globino stene. Čas sušenja vlažnega elementa iz zemljine je odvisen od več dejavnikov (Schroeder, 2016):

- Začetna vlaga
- Temperatura, relativna vlažnost ter konvekcija okoliškega zraka
- Direktni vpadi sončnega sevanja na preizkušanece
- Geometrija preizkušanca
- Mineralna sestava gline

Proces sušenja se smatra za idealnega, ko se proces evaporacije vode s površine ter difuzija vodne pare skozi opazovano steno odvijata enako hitro. Pri uporabi mešanice z visoko vsebnostjo gline in/ali visoko vlago nabijanja je ključnega pomena, da se zagotovi homogeno sušenje. To pomeni, da je steno potrebno zaščititi pred direktnim vpadom sončnega sevanja in ostalimi vremenskimi vplivi, prav tako je potrebno zagotoviti, da se stena suši na vse smeri enako hitro.

NZS 4298 predpisuje upoštevanje minimalno 28 dni za sušenje preizkušancev oz. elementov iz nestabilizirane zemljine, za zemljine ki vsebujejo portlandski cement se priporoča minimalno 7 dni sušenja v vlažnem okolju pred sušenjem na zraku, za mešanice z apnom pa 21 dni v vlažnem okolju pred sušenjem na zraku. V tem času naj bi se odvila večina krčenja zaradi sušenja, celotno sušenje pa se lahko nadaljuje tudi 6 mesecev ali več.

2.6.1. Razpoke kot posledica krčenja

NZS 4298 dovoljuje največ 0,05% linearnega krčenja za butane stene in razpoke do 3mm širine. Podobno svetuje tudi britanska smernica in sicer največja dovoljena širina razpok je 3mm, dolžina pa 75mm. Za nosilne elemente je največja mera krčenja 0,5%, za nenosilne pa 1,0%.

Vsebina NZS 4298 predpisuje testni postopek za določanje krčenja. V grobem gre za prizmatični kalup standardnih dimenzij, v katerega se nabije zemljino, ki se jo predpisan čas suši v vlažnem in nato še v suhem okolju. Po predpisanem času sušenja se izmeri najdaljše stranice in določi linearno deformacijo.

Britanska smernica priporoča določanje krčenja na cilindričnih preizkušancih, pripravljenih na enak način kot za enosno tlačno trdnost, katerim se določi linearno krčenje glede na spremembo višine valja.

V ASTM E2392/E2392M-10 ni podanih navodil kako določiti krčenje.

2.6.2. Preventivni ukrepi za preprečevanje nastanka razpok zaradi krčenja

Krčenje in posledično pojav razpok lahko zmanjšamo z naslednjimi ukrepi (Schroeder, 2016):

- 1) Krivulja zrnastostne sestave mora biti čim bližja Fullerjevi modificirani krivulji.
- 2) Priporočena vsebnost gline je do 10%.
- 3) Razmerje pesek-fini delci (melj in glina) naj bo približno 70%-30%.
- 4) Krčenje materiala nabitega pri optimalni vlagi po Proctorju ne sme presegati 2% po 72 urah sušenja.
- 5) Mešanici dodamo vlakna (npr. slamo).

Pri tem je potrebno upoštevati, da lahko z upoštevanjem teh ukrepov neugodno vplivamo na tlačno trdnost materiala. Ta se veča z višanjem vsebnosti gline v mešanici.

Pojav razpok lahko zmanjšamo tudi na sledeče načine (Minke, 2006):

- 1) Namesto peska zrnastosti 0-2mm, za dodatek uporabimo pesek zrnastosti 1-2mm.
- 2) Ustrezna geometrija elementa-zmanjšanje dolžine in višine, izvedba dilatacij.
- 3) Stabilizacija mešanice s cementom, apnom ali emulzijo bitumna.
- 4) Zaščita površine z vodnim steklom, sintetičnimi voski, lateksom, lanenim oljem ipd.

Tudi ti ukrepi vplivajo na mehanske lastnosti elementa, sposobnost prehajanja vodne pare ter možnost recikliranja po končani uporabi.

2.7. Tlačna trdnost

Mejne vrednosti, oblike preizkušancev, čas in način nege se razlikujejo med standardi.

NZS 4298 o določanju tlačne trdnosti:

- Preizkušanci naj bodo prizmatične oblike, razmerje med višino in krajšo širino mora biti med 0,4 in 5,0. Pogosto razmerje v praksi je 2:1.

- Tlačno trdnost vsakega preizkušanca je potrebno pomnožiti s korekcijskim faktorjem oblike k_a .
- Preizkušanci morajo biti pripravljeni na enak način kot stena, z enako mešanico in morajo dosegati zgoščenost 98%.
- Preizkušanci morajo biti na dan preizkušanja 28 dni sušeni na zraku.
- Rezultatom se nato določi povprečna vrednost, standardna deviacija in karakteristična oz. nazivna tlačna trdnost po enačbi (velja za število preizkušancev $n=5-10$):

$$f' = \left(1 - 1,5 * \frac{x_s}{x_a}\right) * x_1 \quad (1)$$

Pri čemer je:

f ... karakteristična tlačna trdnost (MPa)

x_s ... standardna deviacija

x_a ... povprečna izmerjena tlačna trdnost (MPa)

x_1 ... najnižja izmerjena tlačna trdnost (MPa)

- Zahtevana tlačna trdnost je 1,3 MPa ali več.

Britanska smernica (Walker, 2005) predpisuje sledeč način določanja enoosne tlačne trdnosti:

- Preizkušanci naj bodo cilindrične ali prizmatične oblike. Geometrija cilindra naj bo v razmerju višina:premer 2:1.
- Tlačno trdnost se lahko določi tudi na preizkušancih ostalih od določanja optimalne vlage zgoščanja. V tem primeru je potrebno končni rezultat pomnožiti s faktorjem 0,7.
- Preizkušanci naj bodo pripravljeni pri optimalni vlagi in morajo dosegati vsaj 98% maksimalne suhe gostote po britanski različici SPP.
- Premer zrn v mešanici ne sme presegati 19 mm oz. je potrebno povečati dimenzije preizkušancev na kocko s stranico $a = 30$ cm oz. cylinder premera 30 cm.
- Preizkušanci morajo biti na dan preizkušanja 28 dni sušeni na zraku. Čas sušenja je lahko tudi drugačen, pomembno je, da se je vlaga preizkušancev stabilizirala.
- Pred preizkusom je potrebno izravnati obe ploskvi cilindra z do 5 mm debelo plastjo mavca ali podobnega materiala.
- Bat na preši se mora pomikati enakomerno, do porušitve. Priporočena hitrost je 1,0 mm/min oz. 0,2 MPa/min.
- Iz izmerjenih vrednosti se določi karakteristična tlačna trdnost po enačbi:

$$f_c = f_a - 1,65 * \sigma_{n-1} \quad (2)$$

Pri čemer je:

f_c ... karakteristična tlačna trdnost (MPa)

σ_{n-1} ... standardna deviacija

f_a ... povprečna izmerjena tlačna trdnost (MPa)

- Splošna zahtevana enoosna tlačna trdnost je 1,0 MPa
- Minimalna tlačna trdnost za nosilne stene pa 2,0 Mpa

Novozelandski standard in britanska smernica ne podajata posebnega postopka za določanje tlačne trdnosti zidovja iz butane zemljine. Povezava med tlačno trdnostjo majhnih standardnih preizkušancev in tlačno trdnostjo zidovja je le oblikovni korekcijski faktor.

2.8. Zrnavostna sestava in tlačna trdnost

Eden glavnih parametrov pri ugotavljanju ustreznosti zemljine je zrnavostna sestava. Zaradi sposobnosti vezanja gline (Das, 2010) lahko predvidevamo, da z njenim deležem v končni mešanici vplivamo na mehanske lastnosti, med drugim na enoosno tlačno trdnost. Preglednica 4 prikazuje primerjavo rezultatov več del različnih avtorjev, ki so določali enoosno tlačno trdnost različnim mešanicam. Ker gre za rezultate del različnih avtorjev jih med seboj ne moremo enolično primerjati. Nekateri avtorji v rezultatih navajajo že karakteristično tlačno trdnost, ostali pa dejansko izmerjeno. Preizkušanci se glede na avtorja razlikujejo v obliki, dimenziji, energiji zbijanja, vlagi mešanice ter času, temperaturi in relativni vlažnosti okoliškega zraka v katerem so se sušili. NZS 4298 in britanska smernica s tem razlogom narekujeta obvezno uporabo korekcijskih faktorjev glede na dimenzije preizkušanca za določitev karakteristične tlačne trdnosti. Ker se v literaturi pogosto navaja rezultate preiskav butanih sten, ki so bile pripravljene po različnih postopkih, lahko te rezultate obravnavamo kot usmeritev kakšne mehanske lastnosti je možno doseči, ne moremo pa sklepati koliko in kateri parameter vpliva na enoosno tlačno trdnost, če se njihov vpliv ne preverja v sklopu ene raziskave.

Vpliv energije zbijanja na enoosno tlačno trdnost so opazovali Hajjar et al. (2018). Dokazali so vpliv cikličnega obremenjevanja s prešo na tlačno trdnost preizkušancev – tisti, ki so bili izpostavljeni 3 ciklom obremenjevanja so dosegli do 1,5 MPa višjo tlačno trdnost, kot preizkušanci, katerih se ni dodatno ciklično obremenjevalo.

Preglednica 4: Tlačne trdnosti preizkušancev iz različnih zemljin

Avtor	Material	Zrnastostna sestava [mm], [%]	Vlaga mešanice [%]	Oblika in dimenzija preizkušanca [mm]	Način izdelave	Tlačna trdnost [N/mm ²]
Miccoli, 2016	Claytec GmbH, Germany	< 0,002, 11% ; 0,002-0,063; 25% ; >0,063, 64%	10	Stena, 500 x 500 x 110	Ročni, 28 dni sušenja pri 50% RH, 23°C	3,73
Hall et al., 2004	Chesterfield Builder's Supplies (pesek), Rotherham Sand and Gravel Ltd (glina)	»Tip 613« Glina in melj 30% ; < 10mm 10% ; >10mm 60%	7-9 (območje w _{opt})	Kocka, 100 x 100 x 100	Ročni, 3 sloji, 30 cm, 28 dni sušenja pri 75% RH, 20°C	1,45 Karakteristična vrednost določena po NZS 4298:1998
François, 2017	Zemljina tipa CL po USCS, Belgija, w _L = 32,5% IP = 15%	< 0,002, 13% ; 0,002-0,063; 61% ; >0,063, 26%	8 (w _{opt})	Valj, 360/720	Mehanski, 3 sloji, 28 dni sušenja na zraku pri 40% RH	7,0
Hajjar et al., 2018	Lokalna zemljina, Francija, CL po USCS w _L = 27,4% IP = 11,03%	< 0,002, 7% ; 0,002-0,063; 53% ; >0,063, 40%	12,5 (w _{opt})	Valj, 50/100	Mehanski, s prešo, sušeni 40 dni na RH = 9,0-97,3%	1,8-6,7

2.9. Vpliv sukcije na mehanske lastnosti

Da bi bolje razumeli vpliv vlage na stene iz butane zemljine, je potrebno preučiti vlogo sukcije. Sukcija je merilo za energijo, s katero zemljina privlači vodo (Maček, 2006). Opišemo jo s Kelvinovo enačbo:

$$s = u_a - u_w = -\frac{R \times T}{g \times w_v} \times \ln(RH) \quad (3)$$

Pri čemer je

s totalna sukcija

u_a porni tlak zraka

u_w porni tlak vode

R univerzalna plinska konstanta

g težnostni pospešek

w_v molska masa vodne pare

RH relativna vlažnost zraka

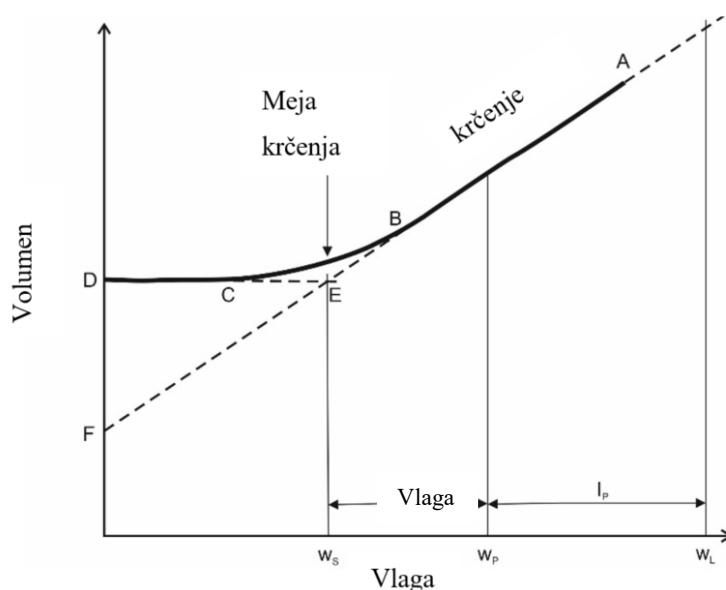
Hajjar et al. (2018) so prikazali vpliv relativne vlage zraka sušenja na tlačno trdnost vzorcev izdelanih iz iste mešanice pri enakih pogojih. Vpliv vlage na obnašanje zemljine opišemo s sukcijo. Vzorci sušeni pri relativni vlagi cca. 10 % so dosegli do 2,5 x višjo tlačno trdnost od vzorcev sušenih pri relativni vlagi nad 90%. Poleg razlike v tlačni trdnosti so dokazali, da ima sukcija vpliv tudi na vrsto porušitve preizkušanca – preizkušanci z nizko sukcijo, torej bolj vlažni, se obnašajo bolj plastično in pri porušitvi dosežejo večje deformacije kot preizkušanci z visoko sukcijo – pri teh pride do krhke porušitve. Podoben vpliv sukcije na tlačno trdnost je dokazal tudi Francois (2017).

2.9.1. Sukcija pri stabilizirani zemljini

Bui et al. (2014) so dokazali, da dodatek apna k zemljini zmanjša občutljivost zračno suhih preizkušancev na nihanje zračne vlage okoliškega zraka. Ta povezava velja za preizkušance narejene iz zemljine z 8 % apna. Zračno suhim preizkušancem z manj (2 %) apna se je tlačna trdnost spreminjala glede na spremembo relativne vlage okoliškega zraka, vendar manj kot preizkušancem brez apna.

2.10. Meja krčenja

Vsebina je povzeta po Hobbs et al. (2018), če ni drugače navedeno. Meja krčenja zemljine (w_s) je definirana kot vlaga zemljine, pri kateri se njeno konsistenčno stanje spremeni iz poltrdnega v trdno. Postopek preiskave je opisan v standardu ASTM D4943-18. Iz rezultatov lahko določimo mejo krčenja na dva načina – grafično s presečiščem premic AF in DE (Slika 8) ali računsko z enačbo, kot navaja standard. Na Sliki 8 območje od A do B predstavlja spremembo volumna vzorca, ki se odvija zaradi zmanjševanja volumna vode. Krčenje, ki se odvija od B do C je posledica desaturacije vzorca – točko B imenujemo točka vstopa zraka. A-F predstavlja linijo 100% saturacije. Preizkus se izvaja na vzorcih iz pregnetene zemljine z delci manjšimi od 0,425 mm z vlago okoli mejo židkosti. Da bi z mejo krčenja opisali tudi obnašanje mešanice butane stene in ne le gline, bi bilo potrebno preizkus prilagoditi tako, da bi dovoljeval uporabo večjih frakcij zemljine.



Slika 8: Graf meje krčenja (Hobbs et al., 2018)

2.11. Ekologija in vpliv na okolje

Pojem trajnostnost (angl. *sustainability*) opisuje harmonijo ekologije, ekonomije in družbeno-socioloških vrednot. Splošno definicijo podaja ASTM E2392M-10(2016) in sicer predstavlja izpolnjevanje vseh potreb sedanje generacije brez omejevanja zmožnosti prihodnjih generacij za izpolnjevanje lastnih potreb.

2.11.1. Ocena vpliva na okolje

Vpliv gradbenih materialov na okolje je zaradi vrste parametrov težko kvantitativno oceniti. Obstaja vrsta certificiranj in deklaracijskih sistemov s pomočjo katerih lahko določimo vpliv izbranega materiala na okolje. Za gradbene materiale si lahko pomagamo s t.i. ekološkimi bilancami (EPD) ali oceno življenjskega cikla izdelka (LCA). EPD-ji prikazujejo vpliv izbranega izdelka na okolje s 6 osnovnimi parametri, med drugim tudi izpusti CO₂. Ko EPD-je različnih materialov med seboj primerjamo hitro naletimo na dilemo, kateri parameter ima večjo težo. Zato je odločitev o tem kateri material je okolju bolj prijazen od drugega redkokdaj enolična (le kadar ima en material vrednosti vseh parametrov nižje od materialov, s katerimi ga primerjamo).

Dober primer te problematike je rezultat primerjalne študije o ekološkem vplivu različnih gradbenih materialov. Cabeza et al. (2013) so prikazali vrednosti vgrajene energije različnih gradbenih materialov (angl. *embodied energy*) na volumsko enoto materiala (m³). Vgrajena energija je energija potrebna v celotnem življenjskem ciklu materiala ali izdelka za pridobivanje surovin, rafiniranje, procesiranje, izdelavo, transport, montažo, uporabo, vzdrževanje, odstranjevanje in recikliranje ali deponiranje vseh njegovih sestavin (ASTM E2392M-10(2016)). Za nestabilizirane butane stene znaša vgrajena energija od 0,0 do 0,18GJ, za stabilizirane od 0,45 do 0,60GJ, armiran beton 0,80 do 0,85 GJ, klasična gradnja z žganimi opekami pa dosega kar 2,0 do 3,40GJ utelešene energije. Če bi te vrednosti prilagodili na

funkcionalno enoto (npr. MPa za tlačno trdnost materiala), bi se razmerja med njimi verjetno spremenila. Z drugimi besedami – za enako tlačno trdnost bi potrebovali manj armiranega betona kot butane zemljine. Z gotovostjo vemo le malo podatkov, s katerimi lahko hitro in v grobem ločimo med bolj in manj ekološkimi materiali. Butana zemljina pred vgradnjo ne potrebuje kemične predelave. Za pripravo mešanice je v nekaterih primerih glino potrebno predhodno posušiti (lahko tudi na zraku) in zmleti. Če je zemljina iz bližnje okolice, vemo tudi koliko transporta je potrebno za prenos zemljine. Glede na to ali je izdelava sten ročna, mehanska in/ali avtomatizirana ocenimo porabo energije za izdelavo. Po končani uporabi oz. porušitvi zemljino lahko vrnemo v naravo ali pa jo ponovno uporabimo. Pri tem ne potrebujemo dodatnih procesov, razen mehanske energije za rušitev in morebitne energije za transport, v primeru ponovne uporabe pa je zemljini potrebno dodati vodo.

2.12. Stabilizacija

Razvoj tehnologije in nove zahteve nas vzpodbujata tudi k razmišljanju kako lastnosti materiala izboljšati. Konkretno v primeru rabe zemljine v gradbeništvu nas zanima kako lahko z vezivi izboljšamo njeno odpornost na vodo in posledično njene mehanske lastnosti. Vpliv veziv na lastnosti zemljine opisuje standard za zemeljska dela – Tretiranje zemljin z apnom in/ali hidravličnimi vezivi SIST EN 16907-4:2019. Ta definira stabilizacijo kot postopek, s katerim pridobivamo homogeno zmes zemljine in veziv(a), po potrebi z dodano vodo, pri kateri se z ustreznim nabijanjem karakteristike srednje do dolgoročno bistveno spremenijo, in sicer na način da postanejo stabilne, predvsem postanejo bolj odporne pred vodo in zmrzaljo. Pojem stabilizacije se je prenesel tudi na področje gradnje z zemljine in je omenjen v novozelandskem in ameriškem standardu ter britanski smernici.

Z dodajanjem veziv v mešanico lahko podobno vplivamo tudi na odpornost butanih sten na vodo. Ker so butane stene občutljive na kapilaren dvig in meteorno vodo, lahko zaradi stika z vodo pride do erozije, volumskih deformacij in poslabšanja mehanskih lastnosti. Da bi se temu izognili je v nekaterih primerih dovolj, da se zagotovi boljše zaščito butanih sten pred vremenom z napuščem, hidroizolacijo temeljev, ustrezno vzdržuje omete ali tudi izvede debelejšje stene (ASTM E2392M-10(2016)). Lahko pa uporabimo tudi veziva.

NZS 4298 za stabilizacijo butanih sten dovoljuje uporabo portlandskega cementa, bitumenske emulzije ter apna. Za nobenega od teh dodatkov ni priporočenih količin dodatkov, saj le te variirajo glede na optimalno vlago ter tudi mineralno sestavo gline. ASTM E2392M-10(2016) priporoča uporabo veziv v primeru vsebnosti visoko-plastičnih glin za izboljšanje mehanskih lastnosti ter večjo odpornost na poškodbe kot so erozija ali volumske deformacije.

Občutljivost butanih sten na vlago se v nekaterih primerih smatrajo kot pozitivna lastnost – stene naj bi uravnavale notranjo relativno vlažnost zraka (Minke, 2006). V primeru, da so stene izpostavljene vremenskim vplivom lahko pride do neželenih sprememb. Bui et al. (2009) so v 20 letni raziskavi opazovali vpliv vlažnega kontinentalnega podnebja na butane stene narejene iz nestabilizirane in

stabilizirane zemljine. Stene brez dodatkov so izgubile v povprečju 1,6% celotne debeline stene, stabilizirane s 5% apna pa le 0,5% debeline stene. Iz slik je razviden predvsem vpliv na izgled stene-stabilizirana stena (Slika 9 desno) ima manj vidnih poškodb od nestabilizirane (Slika 9 levo).



Slika 9: Primer nestabilizirane butane stene pod 20-letnimi vremenskimi vplivi (Bui et. al, 2009)(levo), primer stabilizirane butane stene pod 20-letnimi vremenskimi vplivi (Bui et al., 2009)(desno)

2.13. Zaščitni premazi

Z zaščitnimi premazi lahko na butanih stenah preprečimo vdor vlage, erozijo in prašenje, spremenimo izgled in podaljšamo obstojnost. Pri izbiri premaza je potrebno zagotoviti, da premaz prepreči vdor vode v steno, hkrati pa dovoljuje prost prehod vodne pare. Zaščito mora tvoriti s stabilizacijo delcev zemljine na površini stene, sloj mora biti odporen na UV svetlobo. Apneni, mavčni in tudi glineni premazi so najbolj kompatibilni z butanimi stenami. Silikoni, silikati, cementni premazi ter barve na osnovi vode ali olja pa se dobro obnesejo le na nekaterih zemljinah, sicer v primeru nekompatibilnosti premaz začne odstopati (NZS 4298).

3. MATERIALI V RAZISKAVI

3.1. Zemljina

V raziskavi smo uporabili zemljino iz okolice Moravč. Gre za sloj t.i. jalovine – rumene glin nad nahajališčem kremenovega peska. Za to zemljino smo se na podlagi predhodnih znanj in izkušenj katedre za geotehniko odločili glede na UCSC klasifikacijo – ta zemljina spada med puste glin, ki se pogosto uporabljajo tudi v literaturi o butani zemljini. Z uporabo puste glin (namesto mastne) preprečimo prevelike volumske spremembe zaradi nabrekanja ali sušenja. Zemljino smo dovedli v dveh serijah. Prva serija zemljine je bila dostavljena v klasičnih vedrih za gradbene materiale zaprta s pokrovi. Druga je bila zaprta v big bag vreči (Slika 10), ki je že dlje časa stala v zaprtem prostoru. V obeh primerih so datum izkopa, čas in način shranjevanja zemljin neznani. Skupno dobavljenega materiala je bilo približno 600kg. Na pogled je bila zemljina rumeno rjave barve, s primesjo drobnega peska. Zemljina je bila na otip vlažna in težko gnetna.

Ker vsa zemljina izhaja iz iste lokacije, smo predpostavili, da imata seriji podobne indeksne lastnosti. Kljub temu smo opravili geomehanske laboratorijske preiskave na obeh serijah, zato se v nadaljevanju zemljina iz prve serije imenuje G1 in iz druge G2.



Slika 10: G2 v big bag vreči

3.2. Agregat

Za izdelavo mešanice je bil uporabljen agregat frakcije 0 do 4 mm iz kamnoloma v okolici Velenja. Skladiščen je bil v silosu laboratorija fakultete za gradbeništvo in geodezijo.

3.3. Mešanice

Iz osnovnih komponent, zračno suhe zemljine in peska smo pripravili laboratorijske recepture mešanic z različnimi razmerji. Za zagotavljanje ustrezne vlage mešanic smo uporabili čisto pitno vodo iz Ljubljanskega vodovoda.

4. GEOMEHANSKE LABORATORIJSKE PREISKAVE

4.1. Priprava preizkušancev za raziskave

4.2. Priprava zemljine

Indeksne geomehanske preiskave smo izvedli na naravno vlažni zemljini, ki smo jo osušili oz. navlažili do želene ciljne vlage. Da bi pri pripravi mešanic zagotovili homogenost, smo zemljini (G1 in G2) zračno osušili ter zmleli. Za mletje smo uporabili mlin za mletje koruze (Slika 11 levo), ki je zemljino zadostno zmel za enakomerno mešanje z dodanim agregatom (Slika 11 desno).



Slika 11: Uporabljen mlin za mletje zemljine (levo), zmleta zemljina (desno)

4.3. Priprava mešanic

Laboratorijske recepture mešanic smo določili glede na rezultate spremljevalnih raziskav vhodnih komponent in priporočil iz literature. Mešanice smo pripravili iz zračno suhe zmlete zemljine, kateri smo dodali želeno količino peska. Suhe komponente smo homogeno premešali in navlažili do želene vlage. Pripravljeno vlažno mešanico smo pred pripravo preizkušancev in izvedbo preiskav za 24 ur tesno zaprli v vrečo, da se je vlaga uravnotežila. Preglednica 5 prikazuje kazalo laboratorijskih mešanic v raziskavi.

S pomočjo Fullerjeve krivulje lahko določimo optimalno zrnastostno sestavo mešanice za butane stene. Ker imamo v osnovi na voljo le glino in agregat z že določeno zrnastostno sestavo, smo se s spreminjanjem masnega razmerja med glino in agregatom skušali najboljše približati modificirani Fullerjevi krivulji.

Modificirano Fullerjevo krivuljo določimo po enačbi 4 (Minke, 2006):

$$a = 100 * \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} + 10 \quad (4)$$

a ... presejek [%]

$D_{\max}$... premer največjih zrn [mm]

d ... premer odprtín na situ [mm]

Premer odprtín na situ za to enačbo določimo kot niz točk od največjega premera D do 0mm. Točke na grafu povežemo s krivuljo. Ta enačba predpostavlja minimalno 12% delež gline v mešanici, če je premer največjih zrn 4mm.

Za izbrana razmerja mešanic (Preglednica 5) smo se odločili na podlagi izračunanih zrnastostnih sestav.

Preglednica 5: Izbrana razmerja mešanic

Oznake mešanice	Delež gline		Delež peska	Opomba
	G1	G2		
	[%]	[%]	[%]	
A	15		85	
B	30		70	
C	45		55	
D		30	70	Enako razmerje kot B in C, le zemljina je iz druge dostave
E		45	55	
F		55	45	

4.4. Izvedba standardnih geomehanskih preiskav

V preglednici 6 je kazalo geomehanskih preiskav, ki smo jih izvedli na vhodnih komponentah in/ali mešanicah. Odstopanja od standardnih preiskav in postopki izvajanja nestandardnih preiskav so opisani v Poglavjih 4.5 do 4.13.

Preglednica 6: Pregled izvedenih preiskav glede na material

Preiskava	Standard	Zemljina	Pesek	Mešanice
Ugotavljanje vlažnosti, w (%)	SIST EN ISO 17892-1:2015	da	ne	da
Ugotavljanje gostote zrn, ρ_s (Mg/m ³)	SIST EN ISO 17892-3:2016	ne	ne	da
Ugotavljanje zrnastostne sestave, presejek (%) Areometrija z napravo Pario	SIST EN ISO 17892-4:2017	da	da	da
Enosni tlačni preizkus, q_u (MPa)	SIST EN ISO 17892-7:2018	ne	ne	da
Atterbergove meje plastičnosti w_L (%), w_P (%)	SIST EN ISO 17892-12:2018	da	ne	ne
Preizkus z metilen modrim, MB_f (g/kg)	SIST EN 933- 9:2009+A1:2013	da	ne	ne
Ugotavljanje adsorpcije vode po Enslin-Neff w_A (%)	DIN 18132:2012-04	da, G1 ne, G2	ne	ne
Proctorjev preizkus, SPP, MPP, w_{OPT} (%), ρ_{dmax} (Mg/m ³)	DIN 18127:2012	ne	ne	da
Določanje meje krčenja, w_s (%)	ASTM D4943-18	da, G1 ne, G2	ne	ne
Meritve sukcije, totalna sukcija (MPa)	ASTM D6836-16 in po navodilih proizvajalca	da, G1 ne, G2	ne	da

4.5. Areometrija-Pario in standardni postopek

Areometrijo smo opravili za material G1 in G2 po nestandardnem postopku z napravo Pario. Delovanje Paria temelji enako kot standardni areometer na principu sedimentacije zrn zemljine v vodi (suspenzija). Pri areometru odčitavamo položaj areometra v suspenziji v odvisnosti od časa. Pario s senzorjem tlaka na fiksni višini meri spremembo tlaka znotraj suspenzije, ki je tudi posledica usedanja delcev. Fizikalno osnovo predstavlja Stokesov zakon, ki pravi, da je hitrost usedanja delcev v kapljevini odvisna od velikosti in teže zrn ter viskoznosti vode. Pri tem se upošteva predpostavke, da so zrna toga, gladka in okrogle oblike, da se usedajo z laminarnim tokom, da med delci ni interakcij, prav tako ni interakcij med delci in vodo, premer suspenzijskega cilindra je znatno večji od premerov zrn, vsi delci takoj po prenehanju mešanja dosežejo končno hitrost in gostota zrn je enaka za vsa zrna.

Postopek

Za izvedbo preizkusa smo uporabili 30 g materiala sejanega pod 2 mm, ki je bil vsaj 24 ur sušen na zraku. Suspenzijo (material zmešan z destilirano vodo in disperzijo) smo pripravili enako kot pri standardni areometriji. Pripravljeno suspenzijo smo prelili v enega od dveh Pario cilindrov (Slika 12 levo) in dolili destilirano vodo do oznake za 1000 ml. Cilinder smo za preprečitev izhlapevanja zaprli z gumijastim pokrovom. Drug cilinder smo do oznake za 1000 ml zapolnili z destilirano vodo, v katero smo za vsaj 10 minut vstavili Pario senzor. Po priključitvi Paria na računalnik, smo v pripadajočem programu odprli novo meritev, vnesli vhodne parametre ter pričeli s preizkusom. Po pričetku odštevanja časa mešanja smo cilinder nagibali iz ene strani na drugo (enako kot pri standardni areometriji), dokler ni bilo odštevanje zaključeno. Po koncu odštevanja ($t=0s$) smo v manj kot 20s namestili Pario v suspenzijo. Po 48 urah smo z meritvijo prekinili in izvozili podatke.

Areometrijo po standardnem postopku smo izvedli na mešanicah E in F (Slika 12 desno). Za standardni postopek smo uporabili fine delce ($<0,063mm$), ki so ostali od mokre sejalne analize.



Slika 12: Naprava za areometrijo Pario (levo), areometrija po standardnem postopku (desno)

4.6. Meja židkosti in meja plastičnosti

Mejo židkosti smo določali na G1 in G2 s švedskim konusom (60g/60°). Predrobljeni glini so bila ročno odvzeta zrna večja od 0,125 mm. Pasto smo pripravili iz zmlate zračno suhe gline, kateri smo ob mešanju postopoma dodajali vodo.

4.7. Vodovpojnost Enslin–Neff

Adsorpcijo vode (w_A) po Enslin-Neff smo določili na v peči posušeni (105°C) zemljini G1, ki smo jo predrobili v frakcijo 0-0,125mm.

4.8. Proctorjev preizkus

Optimalne pogoje vgrajevanja mešanic smo določili iz rezultatov Proctorjevega preizkusa. Na vseh mešanicah smo izvedli standardni Proctorjev preizkus (SPP), na mešanici B in F pa tudi modificiran Proctorjev preizkus (MPP). Iz primerjave rezultatov SPP in MPP smo ugotovili vpliv energije nabijanja na vgrajevanje mešanic. Ker Proctorjevega aparata ni možno uporabiti za izdelavo stene, smo za izdelavo sten pridobili pnevmatsko orodje s premerom udarne ploskve cca. 5 cm in hodom bata cca. 30cm, podatek o nazivni energiji zgoščanja ni znan (Slika 13).



Slika 13: Primer pnevmatskega orodja (Vir: Amazon, 2020)

Da bi lahko ocenili učinkovitost delovanja pnevmatskega orodja smo preizkušance s pnevmatskim orodjem zbili v posebej izdelane kalupe (Slika 14), oblike kocke s stranico cca. 15cm. Kalupe smo predhodno premazali z oljem, da bi preprečili prijemanje preizkušanca na stene. Pred in po nabijanju z orodjem smo zemljino v kotih kalupa ročno nabili, da bi preprečili krušenje. Stranice kock so merile približno 15cm. Mešanico smo navlažili po enakem postopku kot za SPP in MPP ter jo nabili v treh slojih. Vsak sloj smo z orodjem nabijali 30s.



Slika 14: Kocka iz improviziranega preizkusa (levo), serija kock iz improviziranega preizkusa (desno)

4.9. Enosni tlačni preizkus

Tlačno trdnost smo določili po SIST EN ISO 17892-7:2018 z napravo prikazano na slikah 19 in 20. Preizkušanci so bili nabiti po SPP in MPP pri različnih vlagah. Vsi preizkušanci so bili zračno sušeni do konstantne mase. Pred izvedbo preizkusa smo vse preizkušance stekali ter izmerili njihove dimenzije s kljunastim merilom. Hitrost stiskanja je bila 1,0 mm/min.



Slika 15: Naprava za določanje enosne tlačne trdnosti (levo), preizkušanec po porušitvi (desno)

4.10. Določanje meje krčenja

Preizkušance višine ca. 7 mm in premera ca. 38 mm za ugotavljanje meje krčenja smo pripravili iz židke paste (pripravljena z dodajanjem vode zračno suhi zemljini). Med vgradnjo smo s potresanjem iz preizkušancev izrinili zračne žepe.

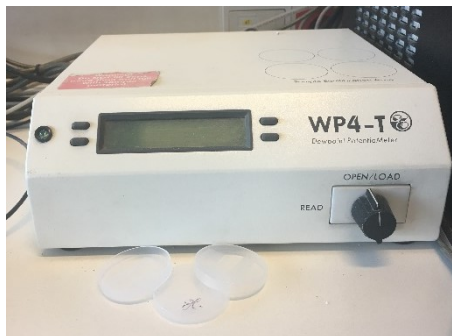
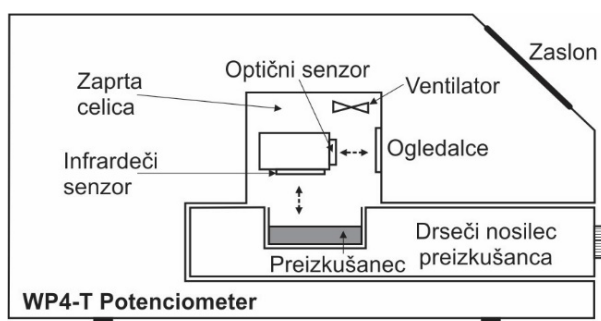
Po standardu se izmeri samo gostota povsem suhega preizkušanca. Da bi lahko izrisali celotno krivuljo krčenja, smo pripravili več preizkušancev, ki smo jih navlažili z vodo do želene vlage. Ko smo dosegli želeno vlago, smo preizkušance za najmanj 24 ur tesno zaprli v PVC posodice, da se je vlaga uravnotežila.

Prvemu vzorcu smo izmerili prostornino, ko se je odlepil od sten posodice. Prostornino smo določili še ostalim vzorcem, pri čemer smo želeli doseči, da bo vsak naslednji vzorec nekoliko bolj suh od prejšnjega. Iz izračunanega količnika por (e) in izmerjene vlage smo določili mejo krčenja (w_s).

4.11. Meritve sukcije

Totalna sukcija je bila merjena na zemljini G1 ter vseh treh mešanicah iz G2. Za meritev je bil uporabljen psihrometer Dewpoint PotentiaMeter WP4-T proizvajalca Decagon Devices, Inc (Slika 16). Naprava meri sukcijo posredno z določitvijo relativne vlage zraka nad vzorcem v zaprti komori. Ko se relativna vlaga v komori ustali (ta se spreminja glede na gravimetrično vlago vzorca), naprava določi njeno vrednost z metodo ohlajenega zrcala. To doseže s termočlenom, ki zrcalce v komori ohlaja do temperature rosišča. Optični senzor zazna prekinitve laserskega snopa, do katere pride, ko se zrcalce zarosi, torej pri temperaturi rosišča. Naprava poda vrednost sukcije izračunano s Kelvinovo enačbo. Ena meritev traja približno 15 minut oz. toliko, da se odčitek sukcije ustali na $\pm 1\%$ ali ± 100 kPa.

Preizkušance smo pripravili iz zračno suhe zemljine v posodice, pri čemer smo jih pred izvedbo meritve od zračno suhih navlažili do različnih vlag z dodajanjem kapljic vode. Preizkušance smo nato tesno zaprli za 24 ur, da se je vlaga uravnotežila. Sukcijo smo merili v območju od zračno suhih do približno 12% vlage (krivulja vlaženja).



Slika 16: Shematski prečni preizkus naprave (Maček, 2012) (levo), naprava za merjenje sukcije WP4-T (desno)

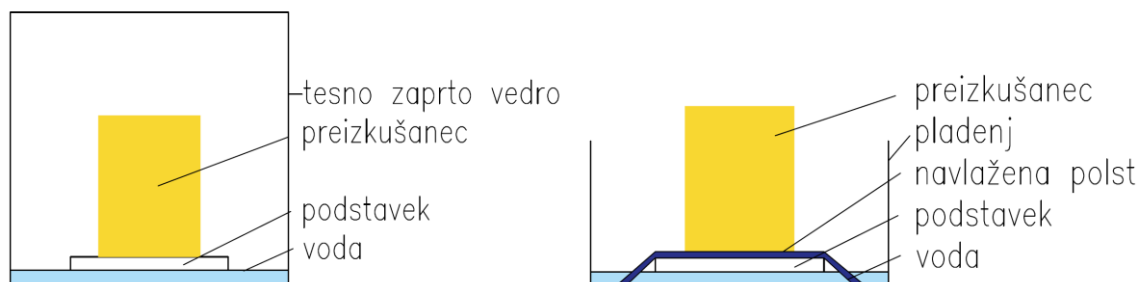
4.12. Določanje gostote zrn

Gostoto zrn smo določili za mešanice D, E, F ter G1 in agregat. Mešanice smo pred izvedbo preizkusa posušili v peči pri 105°C .

4.13. Navlaževanje in sušenje preizkušancev

Da bi ugotovili obnašanje nabitih mešanic v vlažnem okolju in stiku z vodo smo zračno suhe nabite preizkušance znane mase (SPP in MPP) postavili v vlažne komore oz. jih postavili na vlažno polst. V tesno zaprtih vlažnih komorah preizkušanci niso bili v neposrednem stiku z vodo (Sliki 17 levo in 18 levo), preizkušanci postavljeni na vlažno polst pa so se navzemali vode (Sliki 17 desno in 18 desno). Spremembo mase preizkušancev zaradi navlaževanja / sušenja smo spremljali s tehtanjem. Posamezno

fazo preiskave (navlaževanje / sušenje) smo zaključili, ko se masa preizkušancev v dveh zaporednih kontrolnih tehtanjih z razmakom vsaj 12 ur ni spremenila.

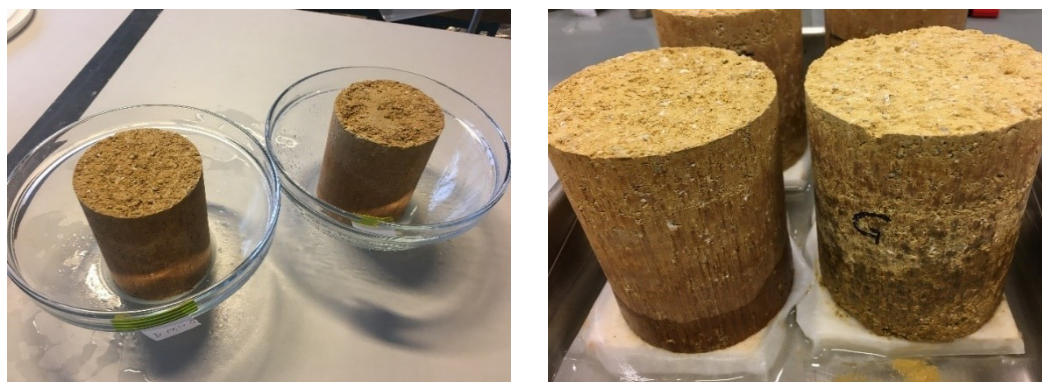


Slika 17: Preizkušanec v vlažni zaprti komori (levo), preizkušanec na navlaženi polsti v kontaktu z vodo (desno)

Protokol preiskave:

1. faza: Navlaževanje v vlažnem okolju ali v stiku z vlažno polstjo.
2. faza: Zračno sušenje preizkušancev, ki so se v 1. fazi navlažili preko vlažne polsti.

Ker dotičnim preizkušancem ni bila določena začetna vlaga, smo jo predpostavili na podlagi izmerjenih vlag ostalih zračno suhih preizkušancev testiranih na enoosno tlačno trdnost.



Slika 18: Preizkušanci v skledah pripravljeni za vlažno komoro (levo), preizkušanci na podstavkih s filter papirji, preko katerih so se navzemali vode (desno)

5. IZDELAVA STEN

5.1. Material

Izdelali smo dve steni dimenzij 900 mm (oz. 1000 mm pri steni 2) x 1000 mm x 200 mm. Za steno 1 smo uporabili mešanico s katero smo na zračno suhih preizkušancih dosegli največjo tlačno trdnost-mešanica F z razmerjem zemljina / pesek = 55% / 45%, nabita pri vlažnosti $w = 7,5\%$. Ker smo na steni 1 med sušenjem opazili razpoke zaradi sušenja smo se odločili, da steno 2 izdelamo z mešanico z manjšim deležem glin. To je bila mešanica E z razmerjem zemljina / pesek = 45% / 55%, ki smo jo pred uporabo navlažili na $w = 6,5\%$. Potrebno količino materiala smo določili glede na predvideno prostornino sten. Za vsako steno je bilo pripravljeno približno 500 kg vlažne mešanice.

Preglednica 7: Zrnastostna sestava in vlaga mešanic pri nabijanju

Stena	Mešanica	Zrnastostna sestava		Začetna vlaga mešanice w_i (%)
		D (mm)	Presejek (%)	
1	F	< 0,002	15	7,5
		0,002-0,063;	19	
		>0,063	66	
2	E	< 0,002	12	6,5
		0,002-0,063;	18	
		>0,063	70	

5.2. Preiskave

Na mešanicah za izdelavo stene in stenah smo izvedli standardne in nestandardne preiskave zbrane v Preglednici 8.

Preglednica 8: Izvedene preiskave na mešanicah za izdelavo stene in stenah

Preiskava	Standard	Mešanica	Stena		
			Med sušenjem	Zračno suha	Po poružitvi
Ugotavljanje vlažnosti, w (%)	SIST EN ISO 17892-1:2015	da	ne	ne	da
Ugotavljanje zrnastostne sestave, areometrija	SIST EN ISO 17892-4:2017	ne	ne	ne	da

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 8

Tlačni preizkus, $\sigma_{\max}$ (MPa)	/	ne	ne	da	ne
Merjenje globalnih pomikov stranic sten za določanje krčenja, d (mm)	/	ne	da	ne	ne
Merjenje lokalnih pomikov pri določanju tlačne trdnosti sten, d (mm)	/	ne	ne	da	ne
Spremljanje temperature in RH okoliškega zraka, T (°C), RH (%)	/	ne	da	ne	ne
Spremljanje RH v jedru stene, RH (%)	/	ne	da	ne	ne

5.3. Priprava mešanice

Mešanico smo pripravili na podoben način kot za preizkušance. Zračno suho zmleto zemljino in pesek smo premešali v mešalcu za beton (Slika 19 levo) in nato postopoma dodajali želeno količino vode. Zaradi omejene kapacitete mešalca smo mešanico pripravljali v več šaržah. Da bi preprečili sprotno sušenje mešanice med pripravo smo vsako šaržo navlažene in premešane mešanico iz mešalca shranjevali v big bag vrečo (Slika 19 desno) in jo tesno zaprli. Mešanica je bila zaprta v vreči vsaj 24 ur, da se je enakomerno navlažila.



Slika 19: Mešalec za beton (levo), pripravljena mešanica v big bag vreči (desno)

5.4. Priprava opaža

Opaž višine 1,0m, dolžine 1,0m in širine 0,2 m smo pripravili za obe steni iz opažnih plošč. Podlaga pri steni 1 je bila iz dveh opažnih plošč, na katere smo pritrdili vertikalne plošče (Slika 20 levo). Na mestih, kjer smo zaradi zbijanja mešanic v opaž pričakovali večje deformacije opaža, smo dodatno pritrdili lesene letve (Slika 20 desno). Naknadno smo namestili tudi povezovalne trakove. V vertikalne notranje vogale opaža smo postavili trikotne lesene letve, da bi s tem ustvarili posnete robove, manj občutljive

na krušenje. Za steno 2 smo namesto lesenih uporabili jeklene profile za bočne podpore, da bi se izognili deformaciji opaža (Slika 21). Za obe steni smo opaže pred začetkom vgrajevanja mešanice na notranji strani naoljili, da bi s tem preprečili prijemanje mešanice na opaž.



Slika 20: Opaž stena 1 (levo), opaž z ojačitvami stena 1 (desno)



Slika 21: Opaž stena 2 (levo), opaž stena 2, končni sestav (desno)

5.5. Izdelava stene

Mešanico smo v opaž nabijali po slojih. Da bi lažje spremljali porabo materiala in zagotovili približno enako debele plasti, smo v vsak sloj nasuli enako količino (30kg) vlažne mešanice (Slika 22 levo). Za ugotavljanje gostote zbite mešanice smo pred in po nabijanju posameznega sloja izmerili višino sloja na več točkah. Za nabijanje smo uporabili pnevmatsko. Trajanje nabijanja smo merili s stoparico. Eno plast smo nabijali od 2 do 4 min. Do take razlike v času nabijanja je prišlo predvsem zaradi težav pri manevriranju z orodjem – zaradi teže samega orodja in hoda bata na 20 cm ozki površini je potrebno nekaj izkušenj, da dosežemo bolj kontrolirano nabijanje mešanice po celotni površini. Glavni pokazatelj za doseženo željeno gostoto je bilo pomikanje že zbite zemljine ob robu navzgor – v tej fazi smo z nabijanjem sloja prekinili. Končna višina stene 1 je bila $90\text{ cm} \pm 2\text{ cm}$, višina stene 2 pa $100\text{ cm} \pm 2\text{ cm}$. Ker je bila stena 2 enake višine kot opaž, je zgornja plast slabše zbita in predvsem bolj valovita od stene

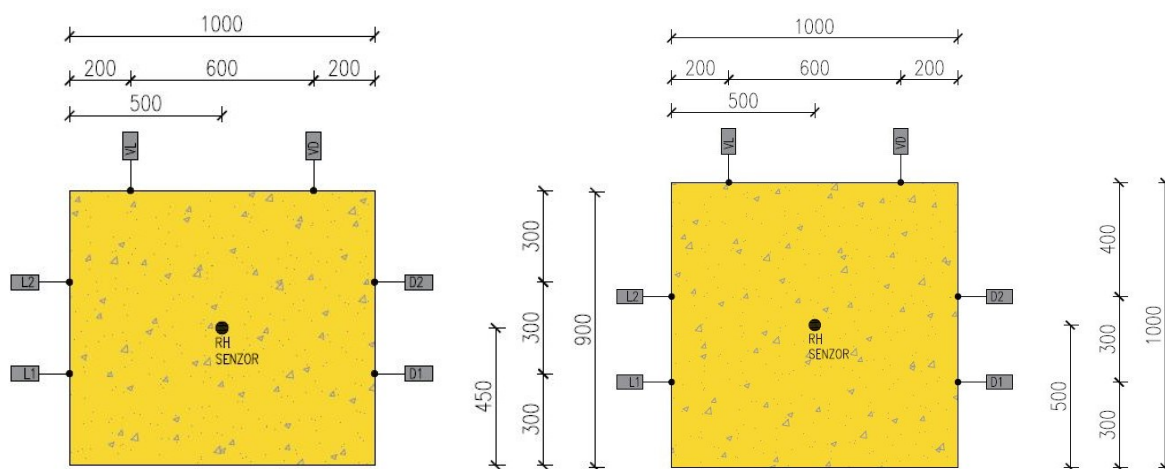
1, kjer je bilo možno zgornji sloj bolje izravnati. Po končanem nabijanju smo opaž odstranili (Slika 22 sredina). Po odstranitvi opaža smo steno premestili v drug del laboratorija, kjer smo spremljali krčenje in sušenje stene z merilniki pomika in RH senzorjem (Slika 22 desno).



Slika 22: Nasuta plast mešanice v opažu pred nabijanjem (levo), stena 1 po odstranitvi opaža (sredina), stena 1 z nameščenimi merilniki pomika in senzorjem relativne vlage (RH) (desno)

5.6. Sušenje in krčenje stene

Krčenje stene smo spremljali z LVDT merilniki pomika tipa WA-T proizvajalca HBM. V sredino stene smo namestili senzor za merjenje relativne zračne vlage (RH) proizvajalca Ahlborn tipa FHAD 46-Cx, s čimer smo želeli posredno določiti spreminjanje gravimetrične vlage jedra stene v času sušenja (kasneje se je zaradi merjenja izven merilnega območja to izkazalo za neizvedljivo). Na sliki 23 je prikazan položaj LVDT merilnikov (sivi pravokotniki) in RH senzorja (črna pika na sredini stene). Med zračnim sušenjem stene smo spremljali tudi temperaturo in relativno vlažnost okoliškega zraka z merilnikom Volcraft DL-121 TH.



Slika 23: Postavitev merilnikov pomika (L1, L2, VL, VD, D2 in D1) na steni 1 (levo) in 2 (desno), enote so v mm

V steni 1 se je v prvih nekaj dneh sušenja pojavila daljša horizontalna razpoka (Slika 24), ki se je med nadaljnjim sušenjem širila in poglobila. Razlog je verjetno direktna izpostavljenost okoliškemu zraku in posledično neenakomerno sušenje. Da bi pri steni 2 to preprečili, smo:

1. Zmanjšali količino gline v mešanici. Uporabili smo mešanico E namesto F.
2. Zmanjšali vlago mešanice. Vlaga pri steni 1 je bila nekoliko nad optimalno določeno po MPP.
3. Steno smo takoj po odstranitvi opaža prekrili z vlažno prevleko (Slika 25 levo), ki je nismo odstranili do konca sušenja.

Ukrepi so se izkazali za uspešne, saj se na steni 2 niso pojavile večje razpoke. Z meritvami pomika in RH smo zaključili, ko se je stena prenehala krčiti.



Slika 24: Stena 1 po končanem krčenju z vidno razpoko (levo), zapolnitev razpoke z enako mešanico višje vlage (desno)



Slika 25: Stena 2 prekrita z vlažno prevleko (levo), stena 2 po končanem krčenju (desno)

5.7. Preiskava tlačne trdnosti sten

Obema stenama smo izmerili tlačno trdnost sten. Pred izvedbo preiskave tlačne trdnosti smo zgornji del stene izravnali z betonom debeline cca. 5cm (Slika 26). Da cementno mleko ne bi prehajalo v steno, smo pod betonsko izravnavo namestili folijo. Izravnalni beton se je pred testiranjem sušil 5 (stena 2) oz. 6 dni (stena 1).



Slika 26: Vlivanje betona za izravnavo (levo), stena z izravnalnim slojem betona (desno)

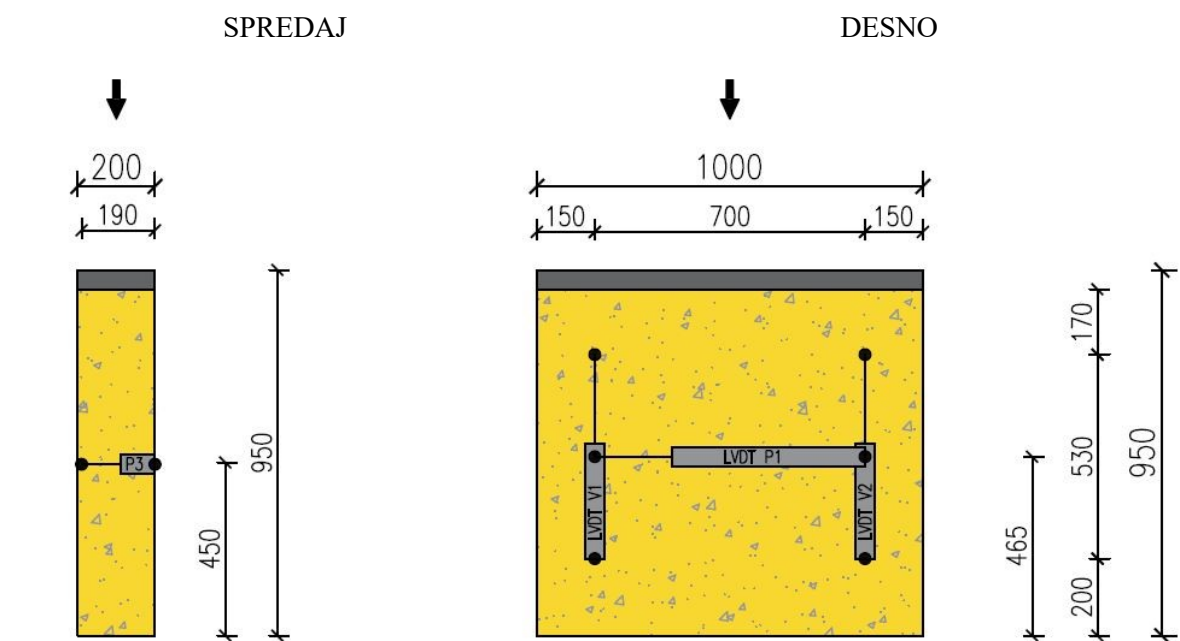
Med preizkušanjem smo merili silo z dinamometrom ter horizontalne ter vertikalne pomike stene z LVDT merilniki pomika proizvajalca HBM tipa WA-T. Porušitev obeh sten smo dokumentirali s fotografiranjem in snemanjem.



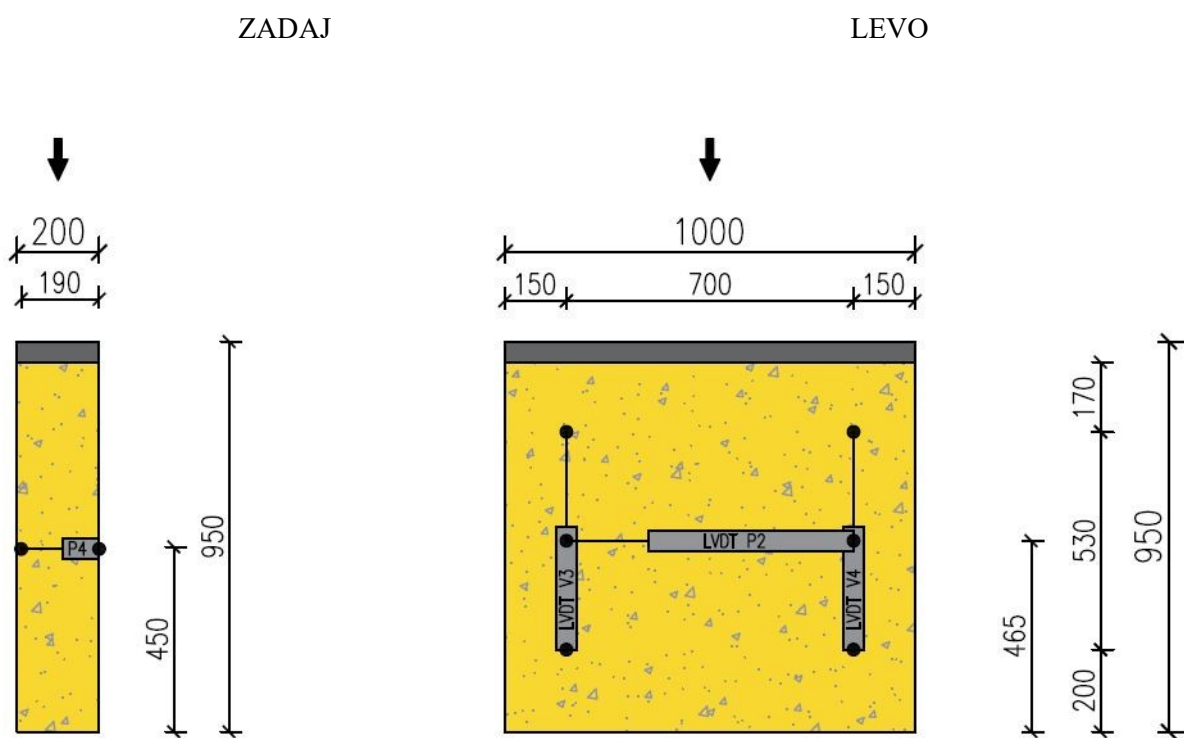
Slika 27: Stena 1 pred tlačnim preizkusom (levo), stena 1 z merilniki horizontalnega in vertikalnega pomika (desno)

5.7.1. Pozicije LVDT merilnikov

Postavitev LVDT merilnikov (Slike 30-33) se je med stenami nekoliko razlikovala, saj višina sten ni enaka (stena 1 je visoka 90 cm, stena 2 pa 100 cm). LVDT z oznakami P1-P4 so merilniki horizontalnega, LVDT z oznakami V1-V4 pa merilniki vertikalnega pomika.

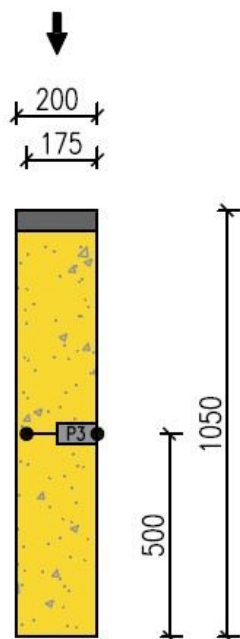


Slika 28: Položaj LVDT merilnikov spredaj (levo) in desno STENA 1 (desno)

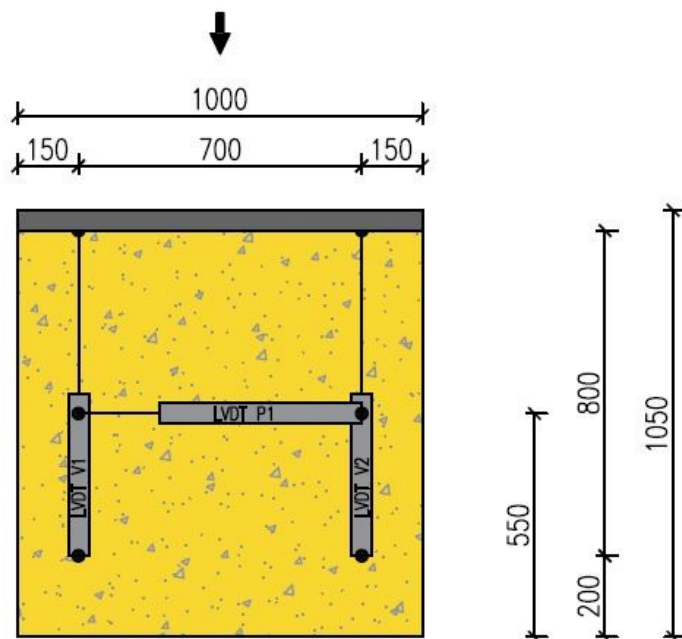


Slika 29: Položaj LVDT merilnikov zadaj (levo) in levo STENA 1 (desno)

SPREDAJ

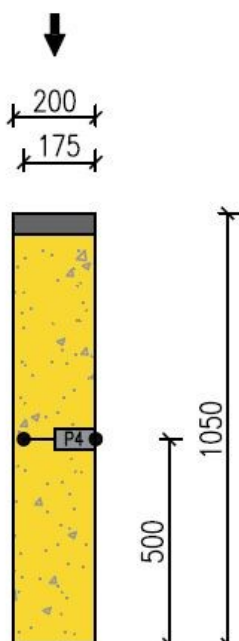


DESNO

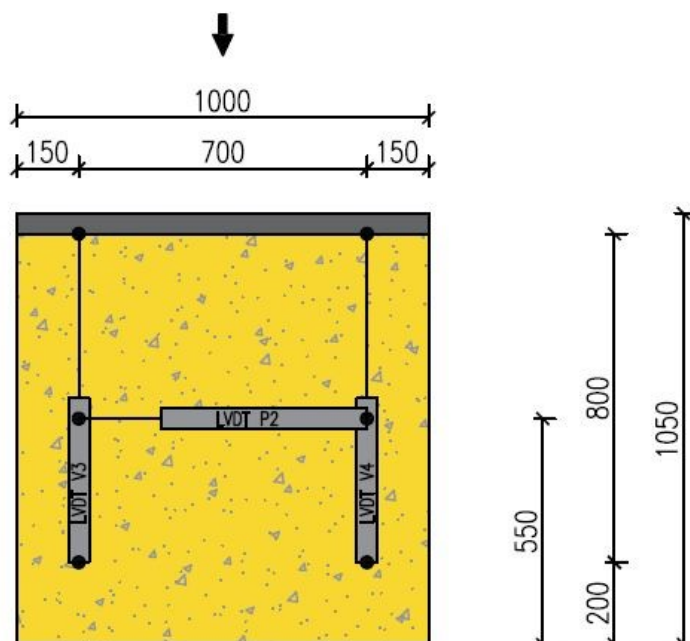


Slika 30: Položaj LVDT merilnikov spredaj (levo) in desno STENA 2 (desno)

ZADAJ

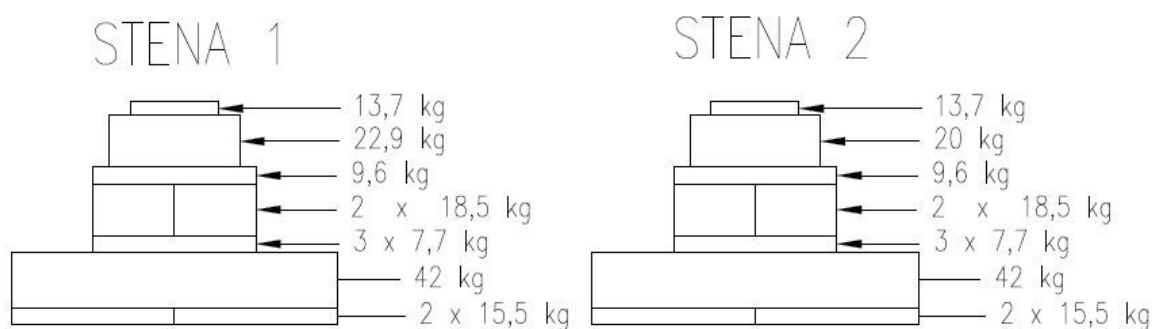


LEVO



Slika 31: Položaj LVDT merilnikov zadaj (levo) in levo STENA 2 (desno)

Da bi se sila med tlačnim obremenjevanjem karseda enakomerno razporedila po celotni površini zgornje ploskve stene je bil nanjo nameščen sklop jeklenih elementov za raznos obtežbe z vmesno plastjo gume (Slika 32). Skupno težo teh elementov smo upoštevali pri vrednotenju rezultatov.



Slika 32: Masa sklopa za raznos obtežbe z bata na steno 1 (levo), masa sklopa za raznos obtežbe z bata na steno 2 (desno)

5.7.2. Vrednotenje rezultatov

Iz izmerjenih podatkov smo obema stenama določili tlačno trdnost, končno vlago, elastični modul ter Poissonov količnik. Naštete parametre smo določili v linearnem območju meritev ter do nastanka prve razpoke. Za izračun parametrov smo uporabili enačbe:

Tlačna trdnost:

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Pri čemer je:

σ_{max} ... tlačna trdnost

F ... izmerjena najvišja sila

A ... površina preizkušanca, preko katere smo vzorec obremenjevali

Elastični modul

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6)$$

Pri čemer je:

E ... elastični modul

$\Delta\sigma$... sprememba napetosti na izbranem območju

$\Delta\varepsilon$... sprememba deformacije na izbranem območju

Poissonov količnik

$$\nu = \frac{-\Delta\varepsilon_{prečna}}{\Delta\varepsilon_{osna}} \quad (7)$$

Pri čemer je:

ν ... Poissonov količnik

$\varepsilon_{prečna}$... deformacija prečno na smer delovanja sile

ε_{osna} ... deformacija v smeri delovanja sile

Deformacije so bile določene kot razmerje med pomikom LVDT merilnika ter začetno razdaljo med prijemališčema LVDT merilnika. Za določevanje karakterističnih vrednosti parametrov bi bilo potrebno podatke statistično obdelati. Statistične obdelave naloga ne zajema, saj je bilo zaradi omejene količine materiala narejeno premalo število preizkušancev.

6. REZULTATI IN DISKUSIJA

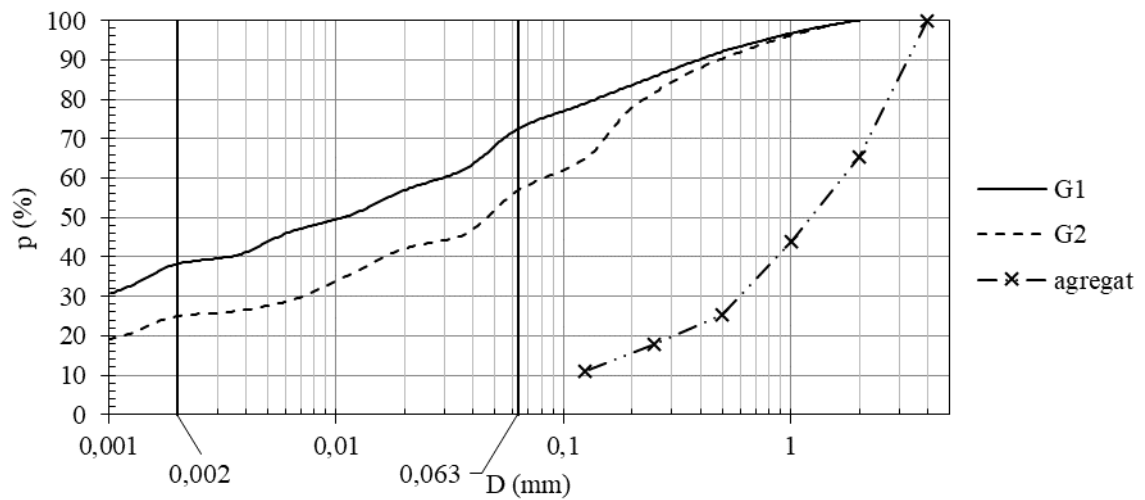
6.1. Lastnosti osnovnih materialov

V Preglednici 9 so rezultati identifikacijskih raziskav vhodnih komponent za pripravo mešanic. Podatek o naravni vlagi je pomemben predvsem zato, da znamo predvideti ali bo potrebno glino sušiti oz. kako drugače pripraviti do stanja, v kakršnem jo je možno mešati in vgrajevati. Po USCS klasifikaciji je preiskana zemljina nizko plastična glina CL. Nizkoplastične gline so pri gradnji butanih sten uporabljali tudi tuji avtorji. Glede na diagram za hitro prepoznavanje nabrekliivosti (Petkovšek et al., 2010) spada G1 v razred zemljin z nizkim oz. srednje nabrekalnim potencialom. Volumske deformacije stene niso zaželeno, saj lahko pride do formiranja razpok v fazi sušenja in do nabrekanja v fazi ponovnega navlaževanja. Oba pojava lahko vplivata na mehanske lastnosti stene.

Preglednica 9: Lastnosti osnovnih materialov

Vzorec	Naravna vlaga	Meja židkosti	Meja plastičnosti	Indeks plastičnosti	USCS klasifikacija	Zrnava sestava				Vodovpojnost Enslin-Neff	Metilen modro	Meja krčenja
	w	w _L	w _P	I _p		<2 μm	<63 μm	D ₃₀	D ₆₀	w _A	MB _f	w _s
	%	%	%	%		%	%	mm	mm	%	g/kg	%
G1	19,5	36	11	25	CL	38	72	0	0,03	71	21	11
G2	/	32	/	/	/	25	57	0,01	0,08	53	/	/
Pesek	/	/	/	/	/	/	/	0,5	1,8	/	/	/

Graf 1 prikazuje zrnava sestavo G1 in G2 izmerjeno s Pario areometrijo in agregata presejanega skozi sita od 0,125 mm do 4 mm. Za izračune mešanic smo predpostavili, da agregat ne vsebuje delcev manjših od 0,125 mm.

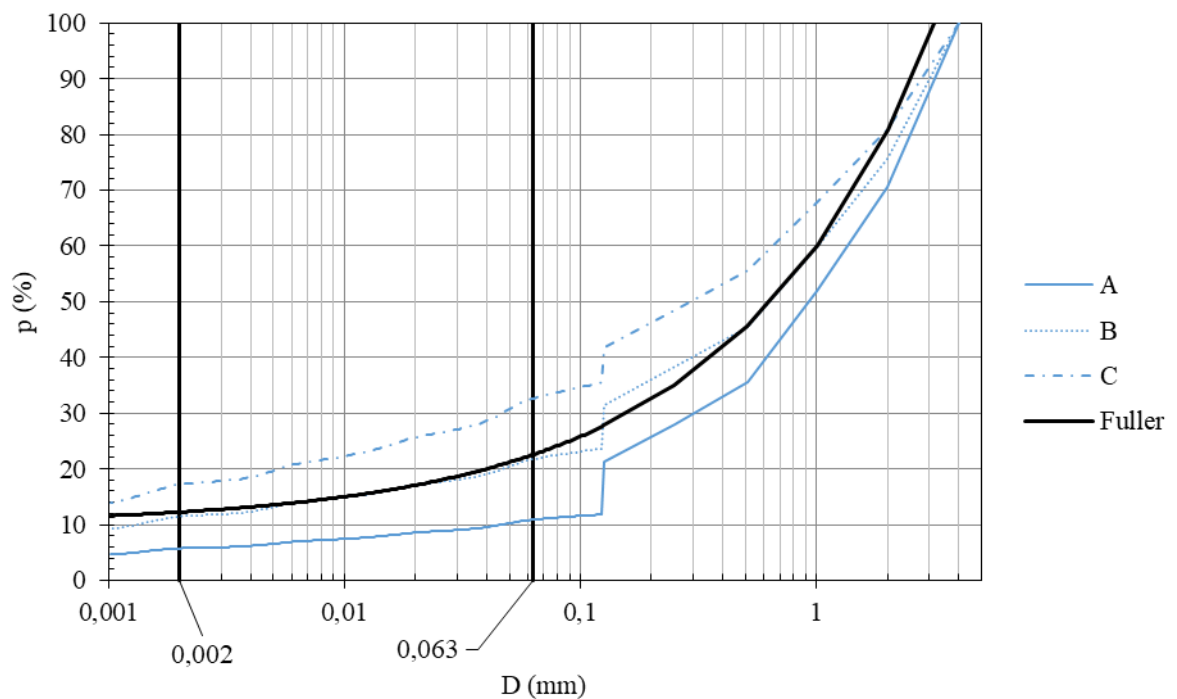


Graf 1: Zrnava sestava G1, G2 in agregata

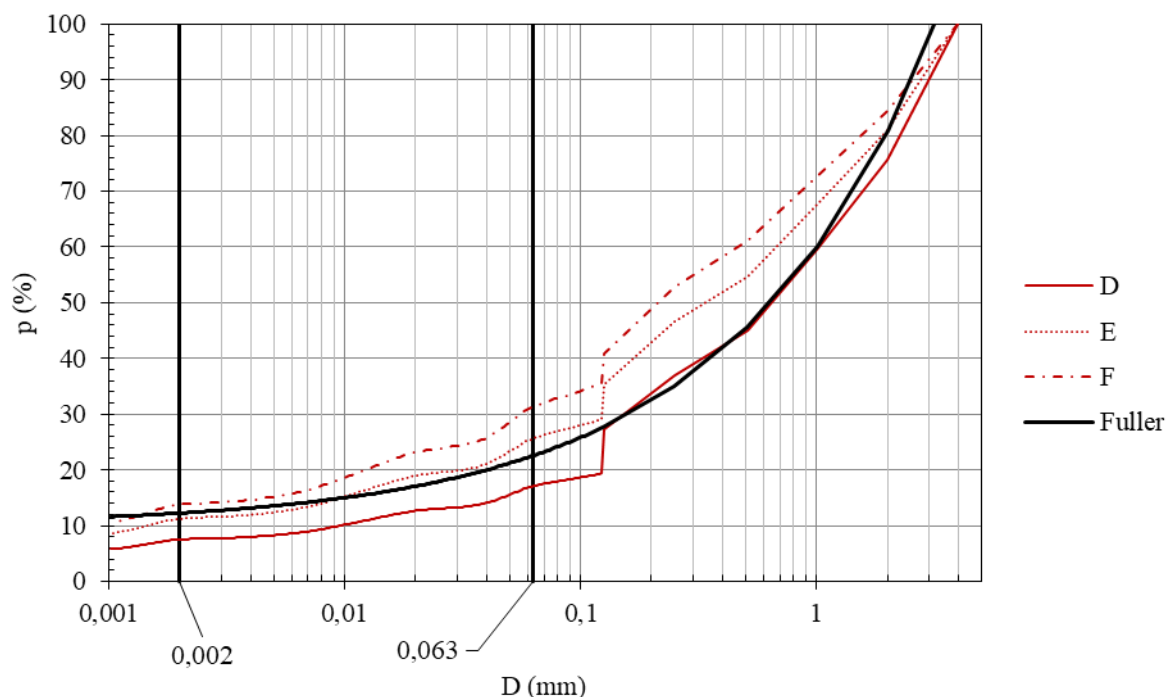
6.2. Laboratorijske recepture mešanic

6.2.1. Krivulje zrnivosti mešanic

Na Grafih 2 in 3 so prikazane krivulje zrnivosti mešanic (Preglednica 10), izračunane po modificirani Fullerjevi krivulji iz krivulj zrnivosti osnovnih materialov.



Graf 2: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic A, B in C



Graf 3: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic D, E in F

Preglednica 10: Izračunane krivulje zrnivosti mešanic

Oznake mešanice	Delež gline		Delež peska	< 0,002 mm	< 0,063 mm	D ₃₀	D ₆₀
	G1	G2					
	%	%	%	%	%	mm	mm
A	15		85	6	11	0,3	1,2
B	30		70	12	22	0,01	1
C	45		55	17	33	0,05	0,65
D		30	70	8	17	0,13	1
E		45	55	11	26	0,01	0,65
F		55	45	14	31	0,06	0,45
modificirana Fullerjeva krivulja				12	23	0,16	1

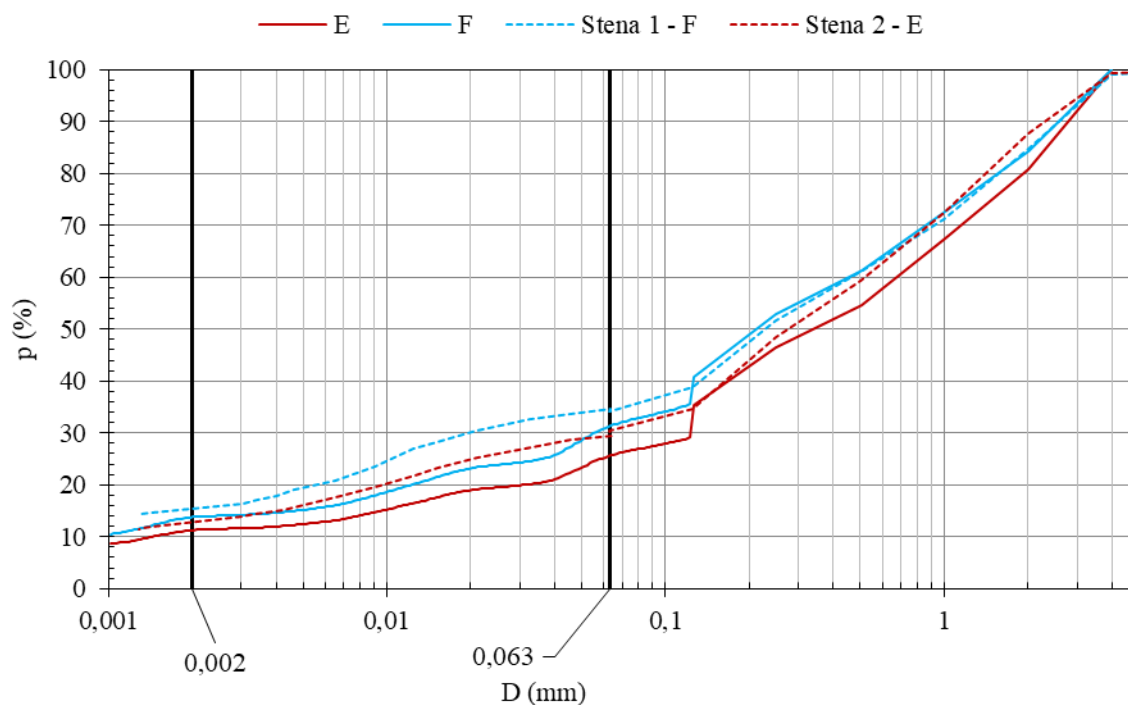
Izračunane krivulje zrnivosti na Grafih 2 in 3 se nekoliko razlikujejo med seboj zaradi različnih razmerij vhodnih komponent v mešanici in odstopanja v krivulji zrnivosti gline iz prve dostave (G1) in gline iz druge dostave (G2). Iz Grafa 2 vidimo, da se izračunana krivulja mešanice B najbolj prilega modificirani Fullerjevi krivulji. Tudi deleža finih zrn (0,002 mm in 0,063 mm) najmanj odstopata od modificirane Fullerjeve krivulje (Preglednica 10). Da bi ovrednotili vpliv deleža gline (<0,002 mm) v mešanici na lastnosti mešanice, smo pripravili tudi mešanico A z znatno nižjo vsebnostjo gline in mešanico C z znatno višjo vsebnostjo gline od priporočene po Fullerju.

Ker so preliminarni rezultati preiskav pokazali, da imajo zračno suhi preizkušanci iz mešanice A s 15% gline najnižje tlačne trdnosti, smo iz gline iz drugega odvzema pripravili mešanice z najmanj 30% gline (Graf 3). Zemljina iz drugega odvzema (G2) vsebuje tudi nižji delež glinene frakcije ($<0,002$ mm) kot G1. Priporočeno vsebnost zrn pod $0,002$ mm (min. 10%) tako dosežemo z mešanico F (55% G1, 45% agregata).

6.2.2. Sejalne analize mešanic

Da bi preverili ali je dejanska zrnavostna sestava mešanic skladna z računsko predpostavljeno (Graf 2, 3), smo izvedli kontrolno sejalno analizo mešanic, uporabljenih za izdelavo stene.

Primerjava izračunanih in izmerjenih krivulj zrnivosti mešanic je prikazana na Grafu 4. Izmerjene krivulje zrnivosti se na območju zrn $>0,063$ mm razmeroma dobro ujemajo z izračunanimi, večje odstopanje med izmerjenimi in izračunanimi krivuljami zrnivosti se kaže v finih zrnih ($<0,063$ mm). To je lahko posledica priprave mešanice (nehomogenost) ali pa neupoštevanje doprinosa finih zrn v agregatu pri računu mešanic.

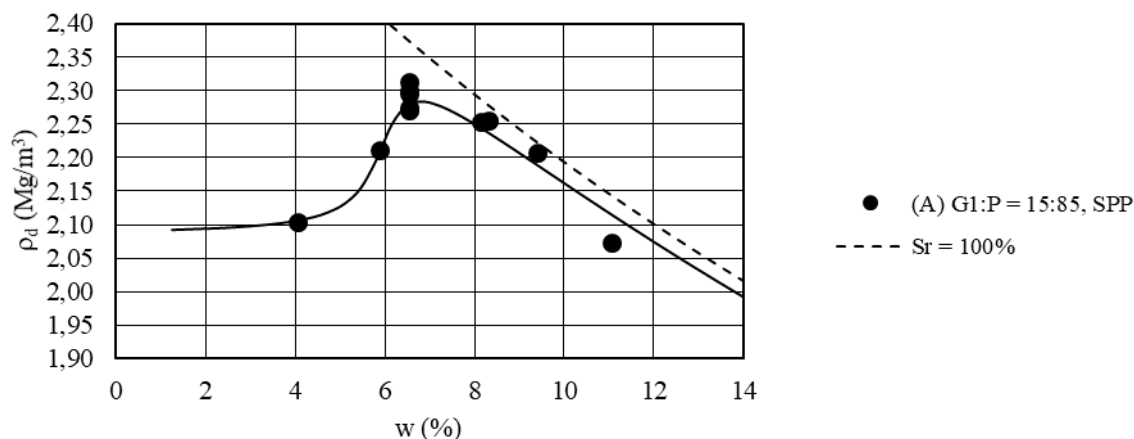


Graf 4: Primerjava izračunane in dejanske zrnavostne sestave

6.3. Vgradljivost mešanic

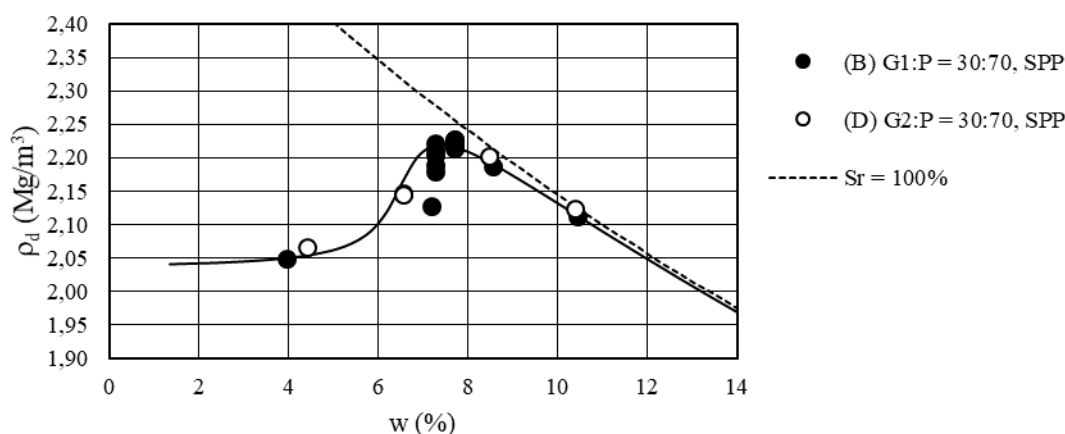
SPP smo izvedli na vseh mešanicah. Na mešanici F smo izvedli tudi MPP za ugotavljanje vpliva energije zbijanja na optimalno vlažnost. MPP smo izvedli tudi na mešanici B, vendar rezultatov zaradi prevelikega raztrosa rezultatov (MPP krivulje ni bilo mogoče določiti) nismo upoštevali za določitev optimalne vlage po MPP.

Graf 5 prikazuje rezultate SPP za mešanico z najmanj gline G1 (15%). Dosežena maksimalna suha gostota je višja napram ostalim mešanici, ki vsebujejo večji delež gline. Po preizkusu tlačne trdnosti smo preizkušance posušili v peči pri 105°C, jih zdrobili in ponovno navlažili (vse na $w = 6,5\%$, blizu optimalne vlage) ter izdelali valje po SPP postopku. Opazimo, da so vse suhe gostote ponovitvene serije višje od krivulje A SPP, kar lahko pomeni le, da smo mešanico pripravili pri optimalni vlagi, možen pa je tudi vpliv sušenja v peči na tlačno trdnost zračno suhih preizkušancev.



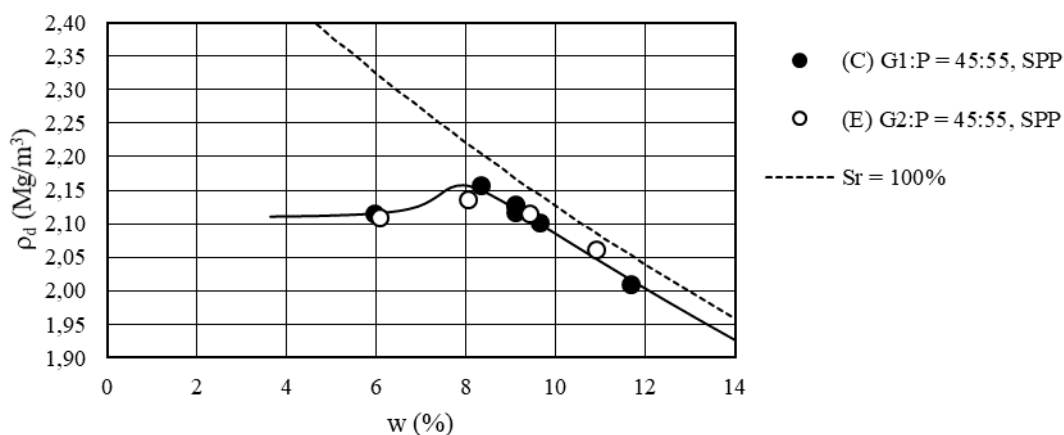
Graf 5: Rezultati SPP za mešanico A in ponovitveno serijo

Graf 6 prikazuje rezultate SPP za mešanici B in D. Ker se točke obeh SPP-jev skoraj prekrivajo je izrisana le ena krivulja SPP. To pomeni, da so razlike med G1 in G2 za določanje optimalne vlage mešanic z enakim razmerjem gline in peska zanemarljive. Preizkušanci nabiti pri enaki vlagi so dosegli podoben razpon suhe gostote kot pri mešanici A – suhe gostote preizkušancev nabitih po SPP variirajo v razponu 0,05 Mg/m³.



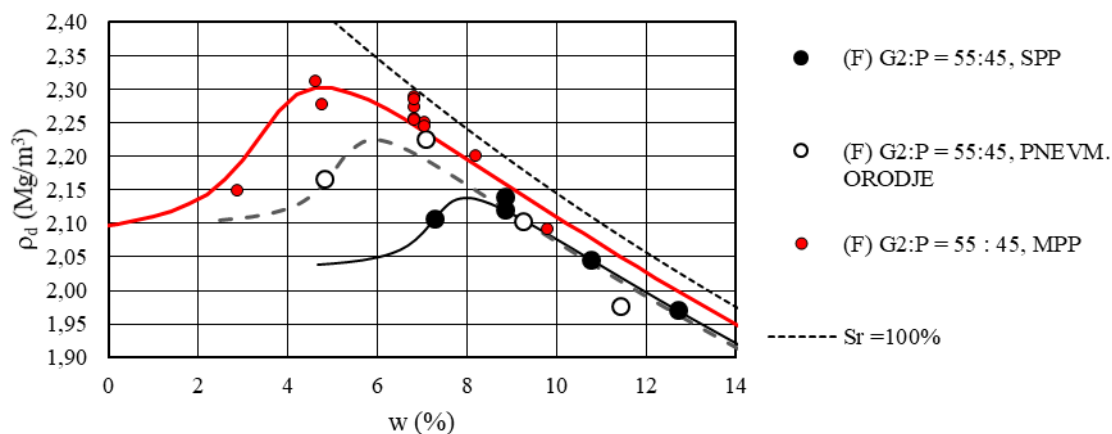
Graf 6: Rezultati SPP za B in D

Ker se tudi točke SPP za mešanici C in E skoraj prekrivajo, je enako kot na Grafu 6 izrisana 1 krivulja za obe mešanici na Grafu 7, kar dodatno potrdi sklep, da na optimalno vlago in maksimalno suho gostoto razlika v lastnostih med G1 in G2 ne vpliva.



Graf 7: Rezultati SPP za C in E

Na Grafu 8 so prikazane krivulje SPP, MPP in simuliranega Proctorjevega preizkusa s pnevmatskim orodjem. Krivulja preizkušancev izdelanih s pnevmatskim orodjem pade med SPP in MPP, kar pomeni, da je energija zbijanja večja od SPP in manjša od MPP. Ker je energija zbijanja pri isti mešanici glavni parameter, ki vpliva na optimalno vlago in maksimalno suho gostoto, lahko sklepamo, da bo povezava $w_{opt}, \rho_{dmax} SPP < w_{opt}, \rho_{dmax} \text{ pnevmatsko orodje} < w_{opt}, \rho_{dmax} MPP$ veljala ne glede na izbrano mešanico.



Graf 8: Rezultat SPP, MPP in simuliran preizkus za mešanico F

V Preglednici 11 so zbrani rezultati vseh SPP in MPP ter izmerjene/predpostavljene gostote zrn. Gostote zrn izmerjene po standardnem postopku so se glede na rezultate Proctorjevih preizkusov izkazale za neustrezne (krivulja 100% saturacije pade pod krivuljo SPP). To je najverjetneje posledica zajema nereprezentativnih vzorcev mešanic, saj gostoto zrn po standardu določamo le na 10g materiala. Zato smo gostoto zrn vsem mešanicam razen F določili računsko in sicer s povprečjem gostote zrn zemljine (G1, G2) in gostote zrn agregata glede na masno razmerje obeh sestavin v izbrani mešanici.

Pri rezultatih Proctorjevih preizkusov opazimo, da z večanjem deleža gline v mešanici maksimalna suha gostota pada, optimalna vlaga pa narašča. Oboje je smiselno, če upoštevamo, da je gostota zrn gline

nižja od gostote zrn primešanega agregata ter da je optimalna vlaga odvisna od količine vode, ki jo je mešanica sposobna sprejeti, torej od količine glin.

Preglednica 11: Rezultati Proctorjevih preizkusov in gostote zrn za vse mešanice

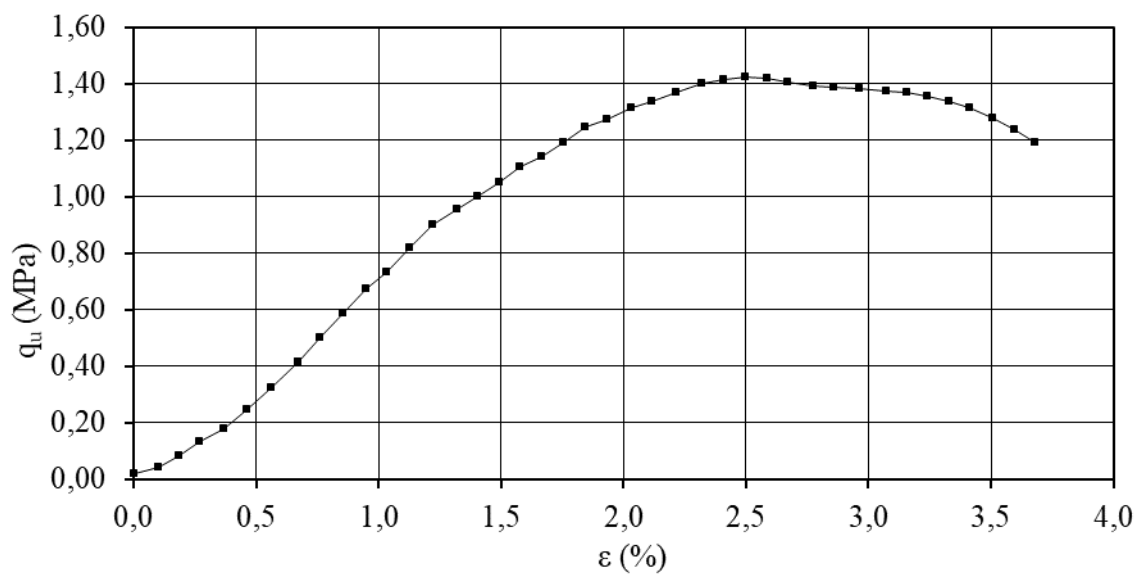
Mešanica	Delež zemljina-pesek	Vrsta preizkusa	Optimalna vlaga nabijanja	Najvišja suha gostota	Gostota zrn
		MPP/SPP/orodje	W _{OPT}	ρ _{dmax}	ρ _s
	%		%	Mg/m ³	Mg/m ³
A	15-85	SPP	6,57	2,30	2,81
B	30-70	SPP	7,40	2,22	2,73
C	45-55	SPP	7,90	2,16	2,67
D	30-70	SPP	7,40	2,22	2,73
E	45-55	SPP	7,90	2,16	2,67
F	55-45	SPP	7,97	2,14	2,66
F	55-45	Pnevmatsko orodje	5,91	2,22	2,66
F	55-45	MPP	4,77	2,30	2,66

6.4. Enosni tlačni preizkus

Enosni tlačni preizkus smo izvedli na zračno suhih preizkušancih iz Proctorjevega preizkusa. Za vsak SPP/MPP so bili 4 valji, torej 28 in še dodatni iz ponovitvenih serij. Poleg ugotavljanja tlačne trdnosti, smo lahko s pomočjo podatkov iz SPP ugotavljali še vpliv začetne in končne vlage mešanice in energije zbivanja na tlačno trdnost. Čas sušenja je različen za vzorce, preizkušali smo jih, ko se njihova masa ni več spreminjala v dveh zaporednih meritvah z razmakom 24 ur.

6.5. Primer rezultatov za vzorec B8 SPP

Graf 9 prikazuje rezultat preizkusa enosne tlačne trdnosti za vzorec B8 SPP (vzorec iz mešanice zemljina / pesek = 30% / 70%, nabit po SPP). Iz grafa odčitamo najvišjo točko grafa, ki predstavlja enosno tlačno trdnost in pri tej točki odčitamo deformacijo. V Preglednici 12 so zbrani vsi rezultati enosnih tlačnih preizkusov s podatki začetne vlage mešanice, končne vlage zračno suhega preizkušanca ter geometrije zračno suhega preizkušanca.



Graf 9: Napetost v odvisnosti od deformacije za vzorec B8 SPP

Preglednica 12: Enoosne tlačne trdnosti preizkušancev

Mešanica	Oznaka valja	SPP/MPP	Vlažnost pri izdelavi	Vlažnost pri testiranju	Povprečni premer vzorca	Povprečna višina vzorca	Enoosna tlačna trdnost	Elastični modul
			w _i	w _F	D _p	h _p	q _u	E ₅₀
			%	%	mm	mm	MPa	MPa
G2		SPP	15,7	2,2	96,4	114,9	1,88	89
A	4	SPP	4,1	0,2	100,0	115,9	0,92	80
A	6	SPP	5,9	0,4	99,6	120,8	0,57	96
A	8	SPP	8,3	0,3	100,1	118,1	1,61	126
A	10	SPP	8,1	0,2	100,6	117,2	1,16	160
A	P1	SPP	6,5	0,4	99,9	120,2	1,93	220
A	P2	SPP	6,5	0,3	100,0	120,4	1,63	212
A	P3	SPP	6,5	0,3	99,9	120,3	1,79	211
A	P4	SPP	6,5	0,4	100,0	119,4	2,05	302
A	P5	SPP	6,5	0,4	99,2	119,2	1,49	163

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 12

Mešanica	Oznaka valja	SPP/MPP	Vlažnost pri izdelavi	Vlažnost pri testiranju	Povprečni premer vzorca	Povprečna višina vzorca	Enosna tlačna trdnost	Elastični modul
			w _i	w _F	D _p	h _p	q _u	E ₅₀
			%	%	mm	mm	MPa	MPa
B	4	SPP	3,9	-	99,9	119,7	0,47	36
B	6	SPP	7,2	-	99,7	119,7	1,11	73
B	8	SPP	8,6	-	99,2	117,9	1,43	129
B	10	SPP	10,4	-	106,0	112,6	1,27	77
B	4	MPP	3,8	-	100,1	120,8	1,52	201
B	6	MPP	6,0	-	99,5	119,2	1,72	105
B	8	MPP	6,9	-	99,3	119,2	1,4	144
B	10	MPP	9,0	-	98,9	118,1	1,08	93
B	P1	SPP	7,7	0,7	99,2	118,4	1,35	53
B	P2	SPP	7,7	0,7	99,0	118,1	1,46	99
B	P3	SPP	7,7	0,4	99,1	118,1	1,74	125
B	P4	SPP	7,7	0,8	99,0	119,0	1,15	84
B	P5	SPP	7,7	0,8	99,1	118,4	1,45	87
B	S1	SPP	7,3	0,7	99,4	119,3	1,46	104
B	S2	SPP	7,3	1,0	99,0	120,1	1,3	90
B	S3	SPP	7,3	0,8	99,3	118,8	1,53	108
B	S4	SPP	7,3	0,6	99,3	119,0	1,46	112
B	S5	SPP	7,3	0,6	99,4	119,1	1,48	115
C	6	SPP	5,9	0,9	99,8	120,2	0,96	63

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 12

Mešanica	Oznaka valja	SPP/MPP	Vlačnost pri izdelavi	Vlačnost pri testiranju	Povprečni premer vzorca	Povprečna višina vzorca	Enosna tlačna trdnost	Elastični modul
			w _i	w _F	D _p	h _p	q _u	E ₅₀
			%	%	mm	mm	MPa	MPa
C	8	SPP	8,3	0,8	98,8	118,2	1,66	110
C	10	SPP	9,6	0,8	98,1	117,4	1,37	106
C	12	SPP	11,7	0,9	96,9	114,9	1,26	100
C	P1	SPP	9,1	1,2	98,2	117,7	1,38	56
C	P2	SPP	9,1	1,1	98,2	119,3	1,22	103
C	P3	SPP	9,1	1,2	98,4	117,5	1,33	58
D	4	SPP	4,4	0,5	100,0	120,3	0,58	71
D	6A	SPP	6,5	0,6	99,8	119,9	1,57	193
D	6B	SPP	6,5	0,5	99,9	120,9	1,59	214
D	8	SPP	8,5	0,7	99,5	119,1	1,89	224
D	10	SPP	10,4	0,7	99,4	116,6	1,9	129
E	5	SPP	6,1	0,8	99,9	121,1	1,27	73
E	7	SPP	8,0	1,0	99,8	119,6	2,15	158
E	9	SPP	9,4	1,0	98,6	117,1	2,21	182
E	10	SPP	10,9	0,9	98,2	116,4	1,68	142
F	6	SPP	7,3	1,1	98,7	120,2	2,02	161
F	8A	SPP	8,8	1,1	98,8	118,6	2,93	221
F	8B	SPP	8,8	1,1	98,9	118,8	2,53	155
F	10	SPP	10,7	1,2	98,2	116,2	2,06	150

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 12

Mešanica	Oznaka valja	SPP/MPP	Vlažnost pri izdelavi	Vlažnost pri testiranju	Povprečni premer vzorca	Povprečna višina vzorca	Enosna tlačna trdnost	Elastični modul
			w_i	w_F	D_p	h_p	q_u	E_{50}
			%	%	mm	mm	MPa	MPa
F	12	SPP	12,7	1,1	97,3	114,9	2,25	211
F	4	MPP	4,7	1,4	100,1	120,3	3,53	259
F	6	MPP	7,1	1,5	99,5	119,4	1,94	93
F	7D	MPP	6,8	1,5	99,4	119,6	3,74	163
F	9	MPP	9,8	1,5	98,3	117,7	2,34	136

6.6. Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev

Preiskavo ugotavljanja enosne tlačne trdnosti (ETT) smo izvedli na zračno suhih preizkušancih, nabitih po SPP oz. MPP pri različnih začetnih vlagah (Graf 10). Med zračnim sušenjem smo spremljali maso preizkušancev. Ko se dve zaporedni meritvi mase posameznega preizkušanca v intervalu 24 ur nista razlikovali, smo z zračnim sušenjem končali. Vlage in temperature v prostoru nismo beležili.

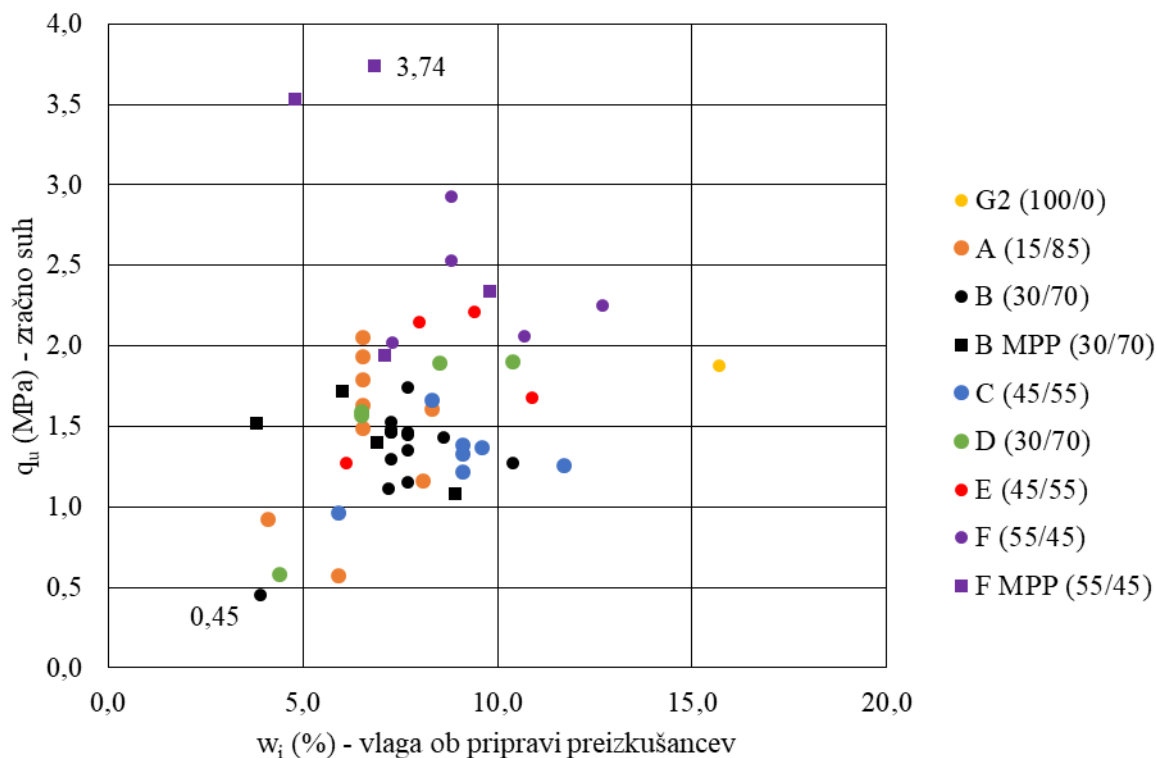
Na Grafu 11 je ETT v odvisnosti od vlage zračno suhih preizkušancev. Vidimo, da ima delež gline v mešanici vpliv na doseženo zračno vlago. Preizkušane iz zemljine G2 brez dodanega agregata je izkazoval najvišjo vlago po zračnem sušenju, najnižjo vlago so izkazovali preizkušanci iz mešanic z najnižjim deležem gline (A 15/85). Zračno suhi preizkušanci iz mešanic B in D (30/70) in C in E (45/55) generalno izkazujejo ETT primerljivega velikostnega reda, ki je nižji od ETT zračno suhih preizkušancev iz zemljine G2. Raztros vrednosti je večji v primeru mešanic C in E.

Najvišje vrednosti ETT smo izmerili na zračno suhih preizkušancih iz mešanice F (55/45) in so višje od ETT zračno suhega preizkušanca iz zemljine G2.

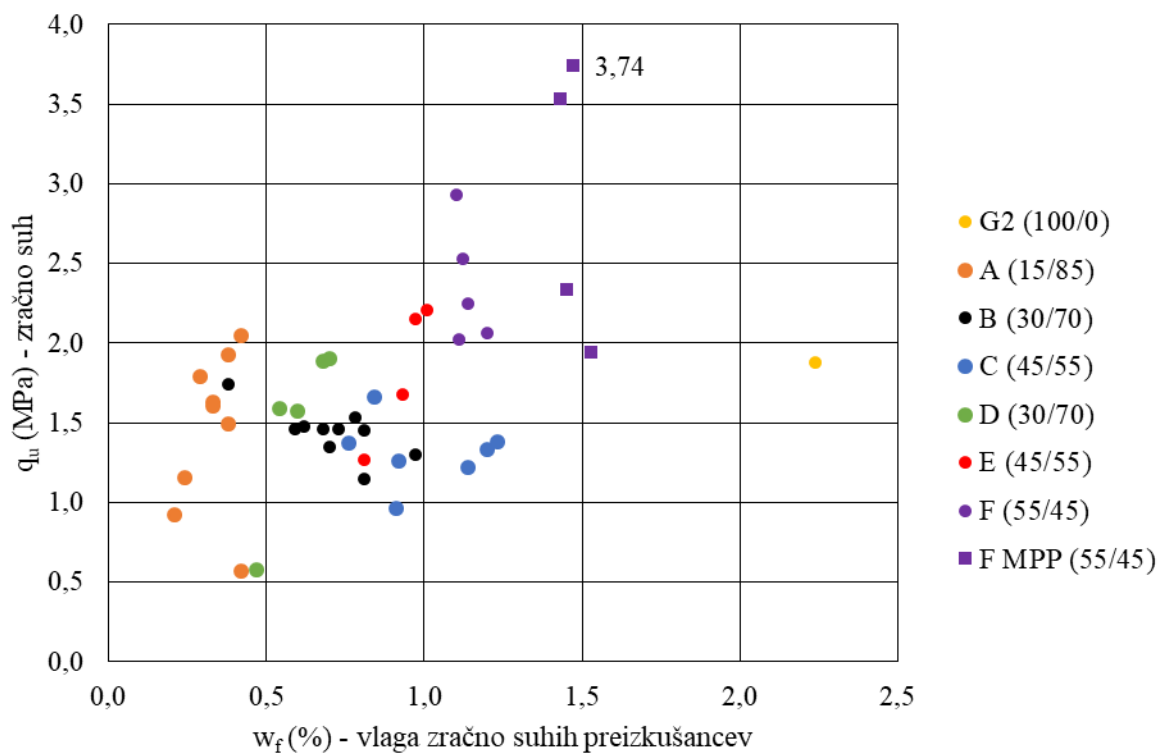
Da bi lahko ovrednotili vpliv priprave mešanice in preizkušancev (nehomogenost, »človeški faktor«), smo iz iste mešanice pri približno optimalni vlagi z isto energijo zgoščanja nabili serije preizkušancev. Po zračnem sušenju smo preizkušancem izmerili ETT in vlago (Graf 12).

Iz Grafa 12 vidimo, da je kljub temu, da so bili preizkušanci pripravljeni pod enakimi pogoji, raztros merjenih vrednosti ETT precejšen (AP in BP tudi več kot 0,5 MPa). Raztrosa merjenih vrednosti ETT ne moremo povezati z doseženo končno vlago po zračnem sušenju preizkušancev. Najverjetneje gre za

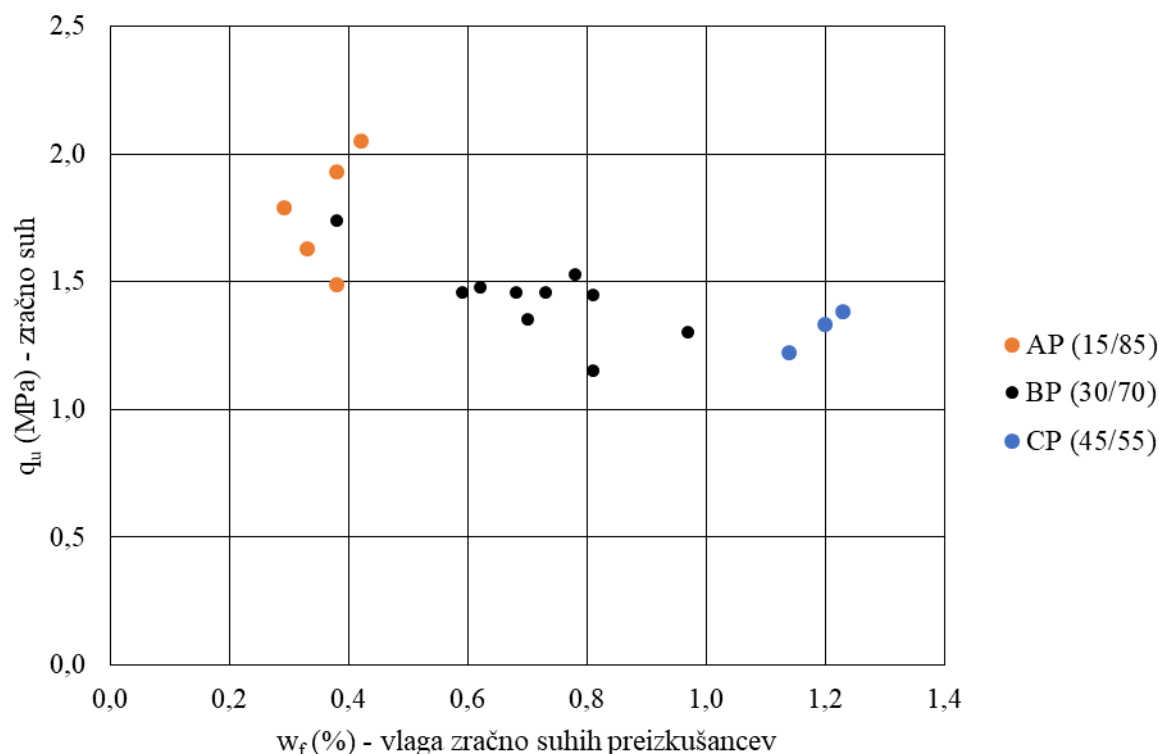
vpliv več dejavnikov (homogenost, debelina plasti pri nabijanju, ...), ki so odvisni od človeka. Tem napakam se ne moremo izogniti, zato bi bilo potrebno za zanesljivo določanje ETT pripraviti večje število preizkušancev pri enakih pogojih, kot narekujejo tudi standardi.



Graf 10: Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od začetne vlage



Graf 11: Enosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od zračne vlage



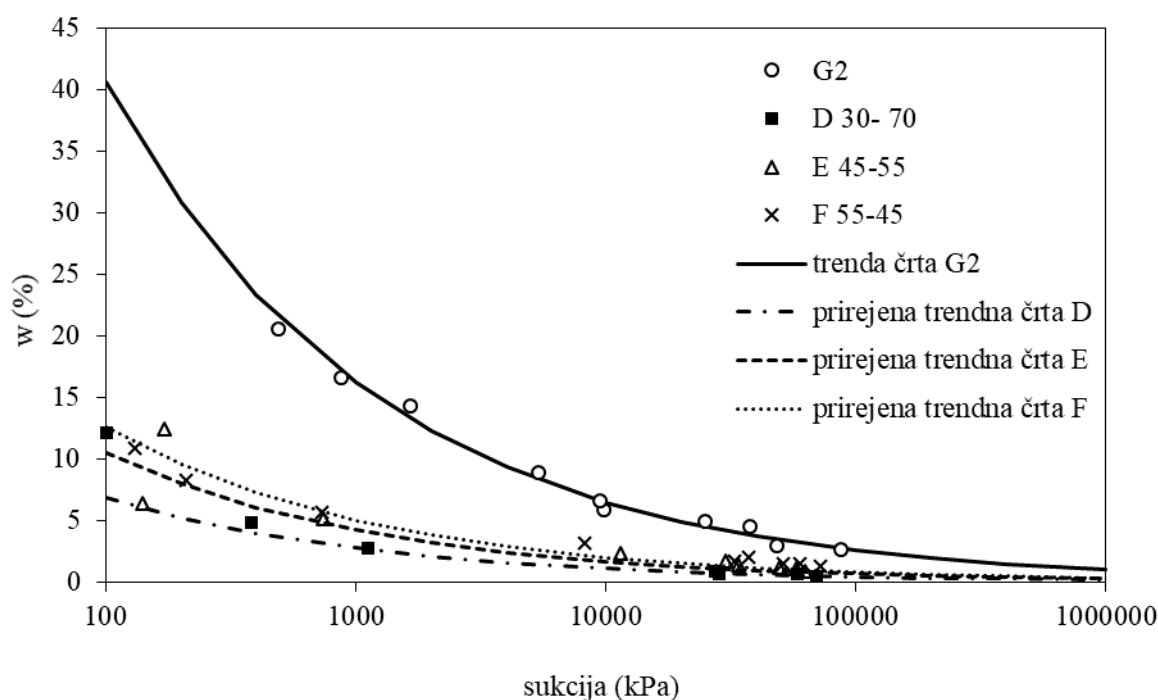
Graf 12: Enoosna tlačna trdnost zračno suhih preizkušancev v odvisnosti od zračne vlage-serije preizkušancev

6.7. Sukcija

Na Grafu 13 so prikazane izmerjene vrednosti sukcije za zemljino G2 in mešanice iz G2 z agregatom. Krivulja, ki povezuje G2 točke je pripadajoča trendna črta izračunana z eksponentno enačbo in predstavlja t.i. retencijsko krivuljo. Zaradi velikega raztrosa rezultatov za mešanice D, E in F, smo za vsako mešanico računsko določili trendno črto in sicer z množenjem trendne črte G2 z dejanskim deležem finih delcev ($< 0,063$ mm) v mešanici. Vzrok za tak raztros rezultatov je verjetno enak kot pri določanju gostote zrn. Zaradi velikosti največjih zrn (4 mm) v mešanici je težko zajeti 2 g vzorca in pri tem ohraniti razmerje med zemljino in agregatom enako razmerju celotne mešanice.

Opazimo, da se retencijska krivulja z višanjem deleža agregata v mešanici pomika v levo. Sukcija zemljine G2 pri isti vlagi dosega višje vrednosti od mešanic D, E in F. Iz prirejenih trendnih črt lahko sklepamo, da podobno velja za mešanice in sicer, tiste ki vsebujejo večji delež finih delcev dosegajo višje sukcije.

Iz pregleda literature vemo, da z višanjem vlage znižamo sukcijo in posledično enoosno tlačno trdnost preizkušancev. V našem primeru sukcija nima bistvenega vpliva na enoosno tlačno trdnost, saj so bili vsi preizkušanci pri testiranju zračno suhi z vlago cca. 1-2%. Če pa bi prišlo do ekstremnih pojavov npr. dolgoročno obdobje 100% relativne zračne vlage ali kontakt z vodo, bi bila sprememba sukcije zadostna, da bi bistveno spremenila mehanske karakteristike preizkušancev oz. stene.

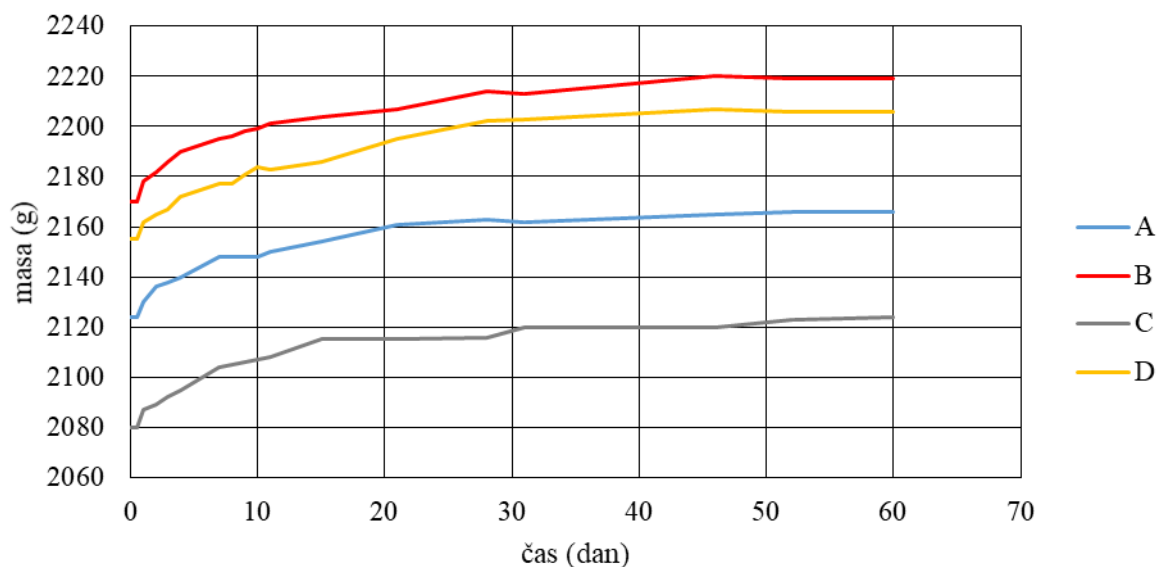


Graf 13: Sukcija mešanic in zemljine G2

6.8. Navlaževanje in sušenje preizkušancev

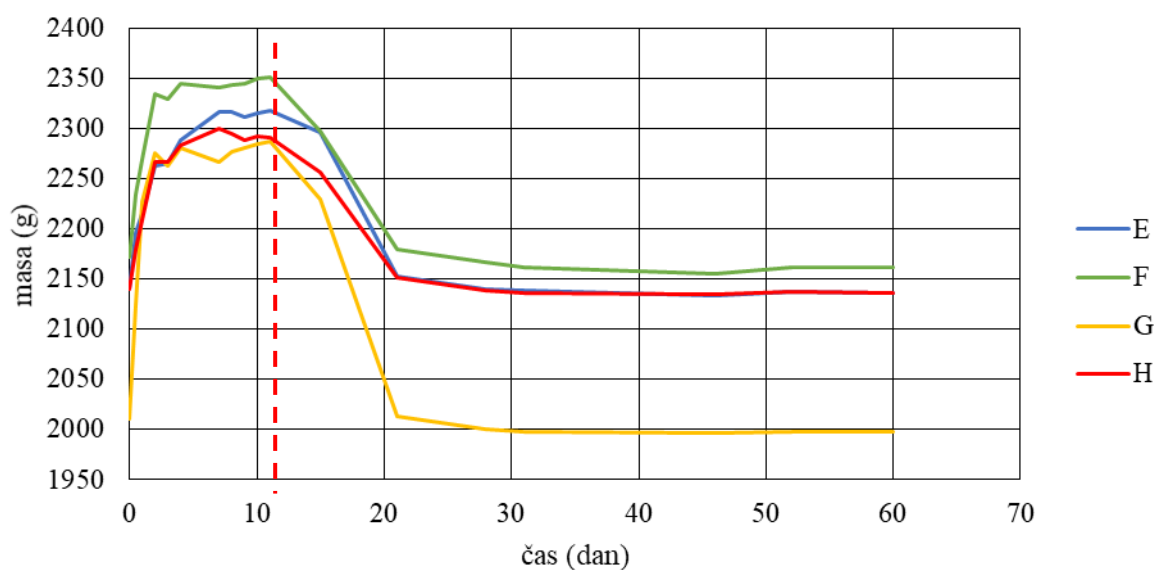
Da bi ugotovili obnašanje nabitih zračno suhih preizkušancev v vlažnem okolju (simuliranje navlaževanja stene), smo jih negovali v vlažnih komorah (visoka zračna vlaga, preizkušanci A-D) oz. jih postavili na vlažno polst tako, da so bili v direktnem stiku z vodo (kapilarni dvig, preizkušanci E-H).

Na Grafu 14 je prikazan časovni prirast mase preizkušancev zaradi navzemanja vlage v vlažni komori. Prirast mase je najvišji v prvih 14 dneh, po 60 dneh pa se masa preizkušancev ustali. Ob predpostavki, da je bila začetna vlaga zračno suhih preizkušancev 1,5% (predpostavljeno iz Preglednice 12), so se preizkušanci navlažili na cca. 3,5%. Dosežena vlaga je nižja od optimalne, sukcija pri vlagi 3,5 % bi bila v območju med 10 MPa in 100 MPa.

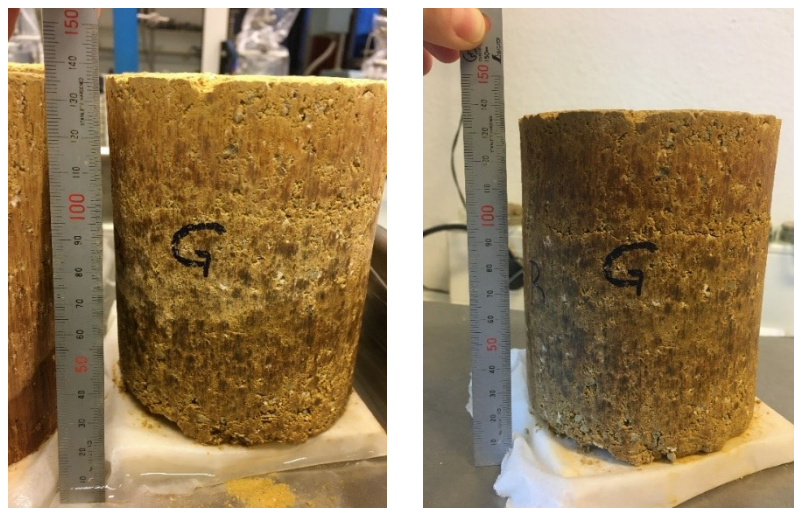


Graf 14: Navlaževanje preizkušancev v vlažni komori

Na grafu 15 je prikazano navlaževanje in sušenje vzorcev na vlažni polsti z odvisnostjo mase preizkušancev od časa. Območje levo od rdeče črtkane črte predstavlja fazo navlaževanja, desno pa sušenja. Preizkušanci so večino vode absorbirali v prvih nekaj urah in so se navlažili do najvišje vlage v 10 dnevih. Ob predpostavki, da je bila začetna vlaga zračno suhih preizkušancev 1,5%, je bila največja dosežena vlaga preizkušancev med 9% in 15% (vlaga višja od w_{opt}). Potek navlaževanja je očiten tudi iz Slike 33, kjer se je vlažna meja pomikala od dna proti vrhu preizkušanca. Nazobčan vrh je najverjetneje posledica ciklov izhlapevanja vlage iz pladnja in ponovnega dolivanja, saj izhlapevanje vode iz pladnja ni bilo preprečeno. Masa preizkušancev po končanem preizkusu je bila približno enaka masi zračno suhih preizkušancev pred izvedbo preizkusa. Pri tehtanju preizkušancev v direktnem kontaktu z vodo lahko pride do odstopanj, saj so zaradi navlaževanja in nabrekanja odpadala posamezna zrna.



Graf 15: Navlaževanje in sušenje preizkušancev na vlažni polsti



Slika 33: Vzorec G po 8h navlaževanja, meja navlaževanja na tretjini do sredini preizkušanca (levo), vzorec G po 24 urah direktnega kontakta z vodo (desno)

Pri vzorcu E je dobro vidna deformacija zaradi navzemanja vlage (Slika 34 levo). Taka oblika se je ohranila tudi po obdobju sušenja (Slika 34 sredina). Pri direktnem kontaktu je pri vzorcu F »odstopil« vrhnji sloj, kar bi lahko bila posledica širjenja že navlaženega spodnjega dela preizkušanca proti suhemu ožjemu sloju (Slika 34 desno).

Vidimo, da ima vlaga ključno vlogo pri preizkušancih iz zemljine brez veziv. Opazovani preizkušanci, ki so bili v direktnem kontaktu so se trajno deformirali in ob tem izgubili nekaj materiala. V navlaženem stanju lahko pričakujemo, da so se poleg geometrije tudi njihove mehanske lastnosti bistveno spremenile. Na preizkušancih, ki so bili le izpostavljeni višji relativni zračni vlagi, brez kontakta z vodo, ni prišlo do očitnih vizualnih sprememb. Za ugotavljanje sprememb tlačne trdnosti bi bilo potrebno izvesti dodatne preizkuse.



Slika 34: Vzorec E po 8 urah navlaževanja (levo), vzorec E po 28 dneh (17 dni sušenja) (sredina), vzorec F po 28 dneh (17 dni sušenja) (desno)

6.9. Krčenje sten zaradi sušenja

Sušenje in krčenje stene 1 in 2 smo spremljali v času od izdelave do prenehanja krčenja. Stena 1 je bila po izdelavi takoj razopažena in izpostavljena okoliškemu zraku. Čas med odstranitvijo opaža in pričetkom merjenja krčenja ni bil beležen, zato moramo pri interpretaciji upoštevati, da je krčenje potekalo pred dejanskim merjenjem. V tem času se je pojavila horizontalna razpoka, ki se je tekom sušenja širila in je bila vidna tudi na drugi strani stene. Stena 1 se je sušila 38 dni. Stena 2 se je sušila 69 dni. Oznake D1, D2, L1 in L2 predstavljajo LVDT-je, ki so merili v horizontalni smeri, VL in VD pa LVDT-ja, ki sta merila pomike v vertikalni smeri.

Zaradi razpoke nastale pri sušenju stene 1 smo steno 2 po izdelavi pustili v opažu, na vrhu pokrito s folijo, da je bila popolnoma zaščitena pred sušenjem. Opaž je bil odstranjen tik pred namestitvijo senzorjev. Takoj po namestitvi senzorjev se je steno prekrilo z vlažno prevleko, da bi preprečili prehitro sušenje.

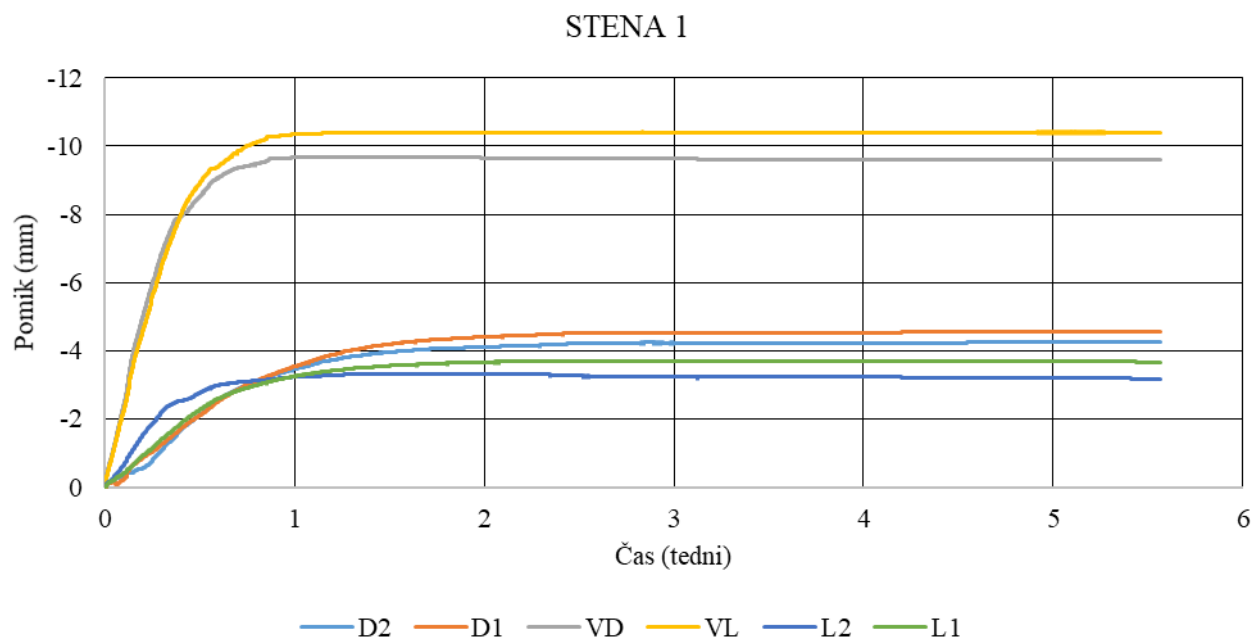
Grafa 16 in 17 prikazujeta potek krčenja sten v odvisnosti od časa. Pri steni 1 se je krčenje odvilo hitro in se v vertikalni smeri umirilo po 1 tednu, v horizontalni pa po cca. 3 tednih. Pri steni 2 se je krčenje odvijalo enakomerno in se je ustalilo po 7 tednih.

V Preglednici 13 so prikazani končne vrednosti merilnikov pomika H1 in H2. Vrednosti predstavljata seštevek horizontalnih, V pa povprečje vertikalnih. Glede na dolžino in višino stene je izračunana še deformacija. Stena se je največ skrčila v vertikalni smeri in sicer pri obeh stenah za 1%. V horizontalni smeri pa se je stena 2 skrčila manj kot stena 1. Glede na ukrepe za zmanjšanje krčenja je zmanjšano krčenje v vseh smereh pričakovano. Pri tem je potrebno upoštevati, da pri steni 1 ni zabeleženo krčenje v času od odstranitve opaža do montaže merilnikov pomika.

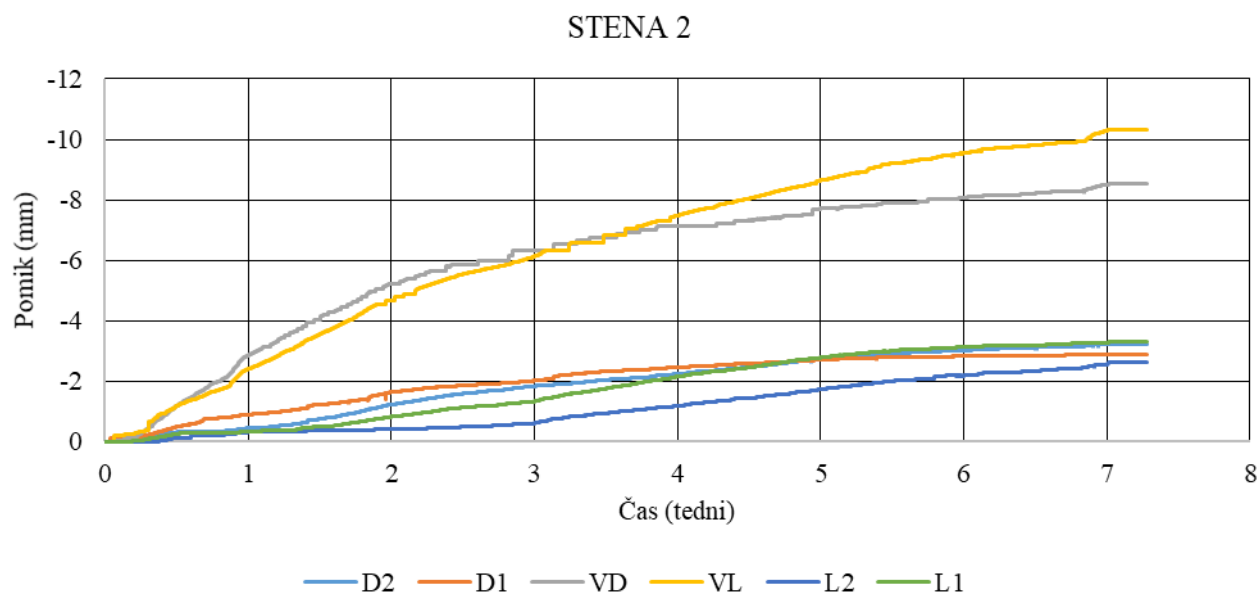
Graf 18 prikazuje povprečne deformacije v vertikalni in horizontalni smeri glede na čas sušenja. Horizontalno deformacijo smo določili kot seštevek horizontalnih pomikov ($L1 + D1$ ali $L2 + D2$) deljeno z dolžino stene. Vertikalna deformacija je vertikalni pomik deljen z višino stene. Na tem grafu je med grafoma 16 in 17 očitna razlika v končni deformaciji. Za ugotavljanje vpliva načina sušenja in uporabe mešanice bi bilo potrebno primerjati sušenje več sten v odvisnosti od enega parametra. Linearno krčenje je glede na pregled literature znotraj dovoljenega območja, razen po NZS 4298.

Preglednica 13: Končne vrednosti krčenja sten

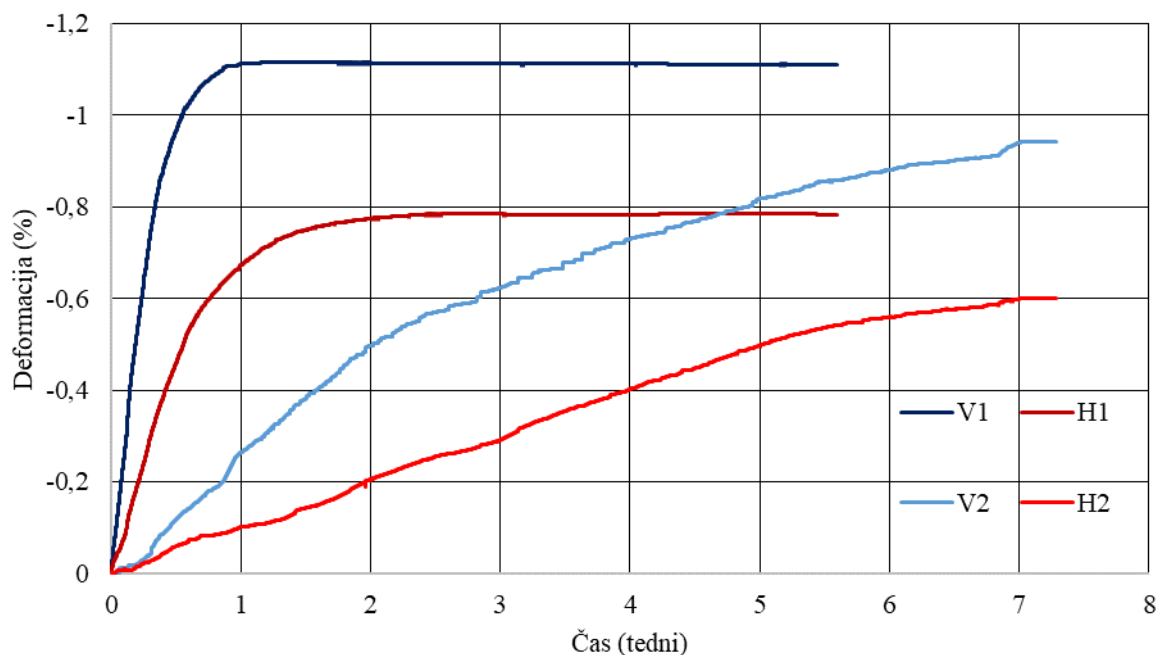
		H1	H2	V
STENA 1	d (mm)	-8,2	-7,4	-10,0
	ϵ (%)	-0,8	-0,7	-1,1
STENA 2	d (mm)	-6,2	-5,8	-9,4
	ϵ (%)	-0,6	-0,6	-0,9



Graf 16: Sušenje stene 1



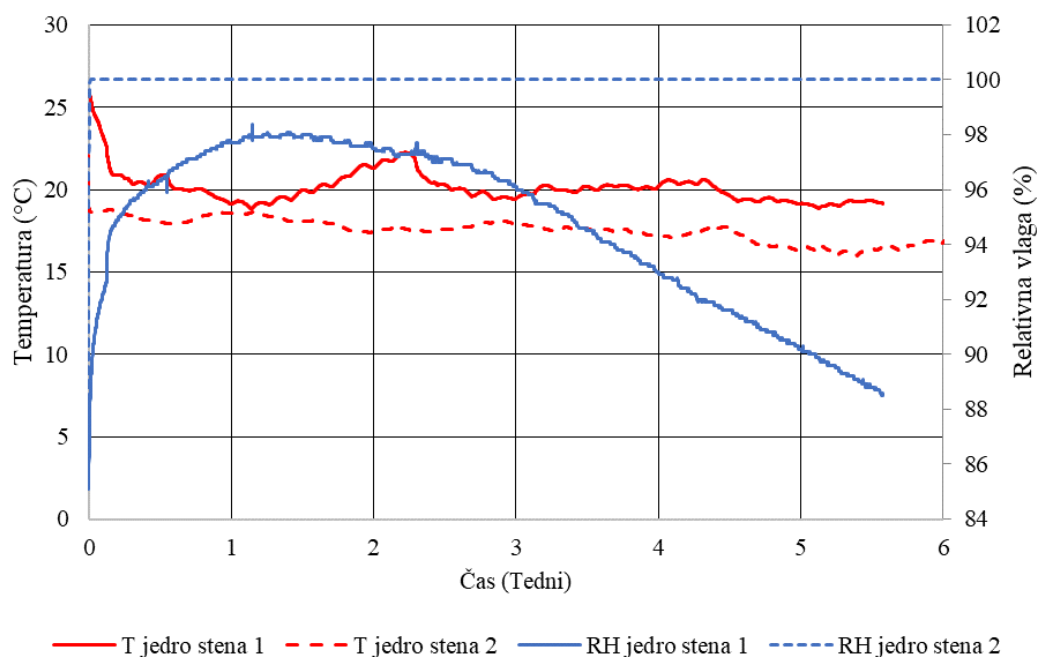
Graf 17: Sušenje stene 2



Graf 18: Primerjava povprečnih vertikalnih in horizontalnih deformacij med stenama

6.10. Temperatura in RH jedra stene tekom sušenja

Temperaturo in relativno vlago jedra obeh sten smo spremljali z RH senzorjem. Z izmerjeno relativno vlago jedra smo želeli posredno določiti gravimetrično vlago stene na točki senzorja. Rezultati merjenja temperature in relativne vlage so prikazani na Grafu 19. Ker je del relativne vlage jedra stene izven merilnega območja ($-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $5...98\text{ \% RH}$) teh podatkov nismo uporabili za ugotavljanje povezave z gravimetrično vlago stene.



Graf 19: T in RH jedra stene 1 in 2 v času sušenja

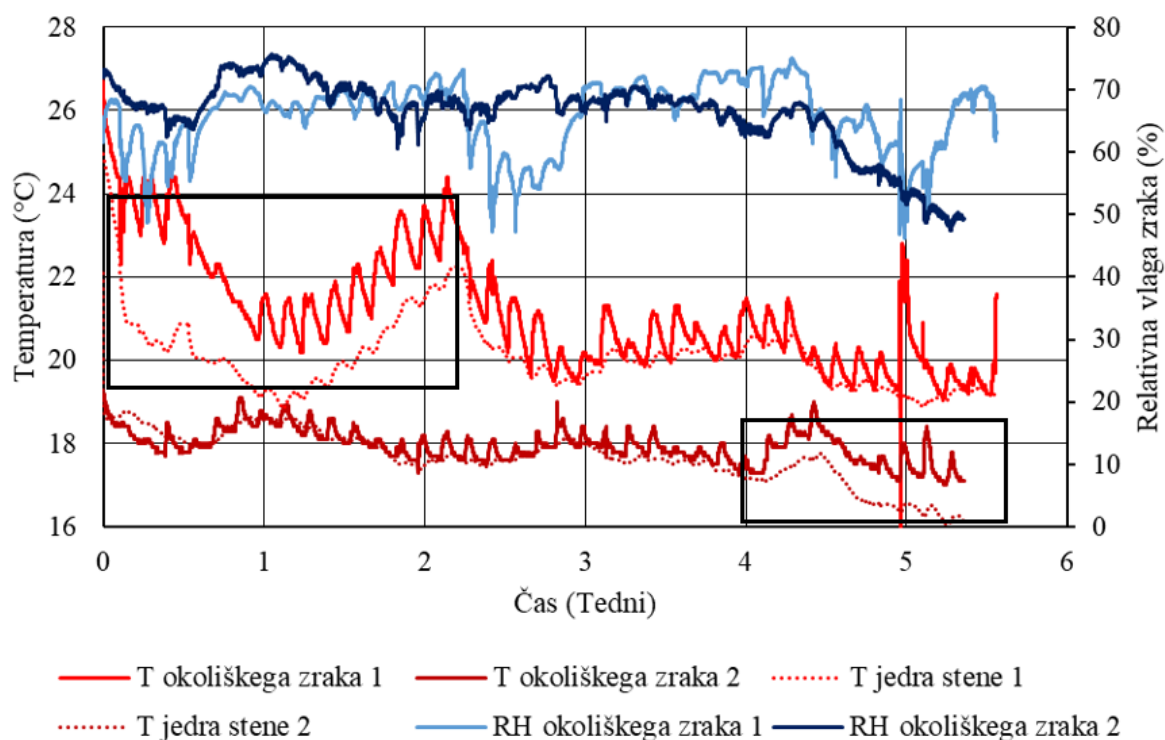
6.11. Temperatura jedra in okoliškega zraka

S primerjavo temperature jedra stene in okoliškega zraka lahko opazujemo, kako se stena v času odziva na spremembe temperature okoliškega zraka. V pregledu literature se večkrat omenja toplotna akumulacija sten, katera v stavbah vpliva na odziv temperature zraka v notranjih prostorih stavbe glede na nihanje zunanje temperature zraka. Toplotna kapacitivnost stene vpliva na notranjo temperaturo na dva načina:

- Zamakne fazni pojav temperaturnih maksimumov
- Zmanjša temperaturne maksimume (notranja temperatura niha manj kot zunanja)

Graf 20 prikazuje temperature okoliškega zraka in jedra sten v celotnem obdobju sušenja. Pri steni 1 opazimo očitno nižjo temperaturo jedra stene od okolice v obdobju prvih dveh tednov. Iz grafa 16 vemo, da se je v tem času odvila večina krčenja zaradi sušenja stene. Torej moramo upoštevati tudi izhlapevanje vode iz stene, katerega »stranski učinek« je nižja temperatura materiala iz katerega voda izhlapeva.

Pri steni 2 je temperatura jedra nižja v zadnjih dveh tednih sušenja. Temperatura se glede na preteklo obdobje ni bistveno spremenila, razlika pa je v relativni vlažnosti, ki v tem obdobju glede na preteklo pade. Pri tem ne smemo pozabiti, da se je stena 2 celoten čas sušila prekrita. Ob predpostavki, da krčenje stene poteka sorazmerno z izhlapevanjem vlage, lahko iz grafov 16 in 17 sklepamo, da stena 2 v času meritev ni dosegla ekvilibracijske vlage in je bila zato bolj občutljiva na nihanje RH okoliškega zraka tudi v 5. tednu za razliko od stene 2, kateri se temperatura jedra kljub očitnim nihanjem RH po 2. tednu ni bistveno spreminjala in je sledila le poteku temperature okoliškega zraka.



Graf 20: Primerjava temperatur okoliškega zraka z jedrom sten skozi celotno obdobje sušenja

6.12. Meritev tlačne trdnosti stene

Steno 2 smo testirali 29.1.2020. Med preizkušanjem se je stena 2 popolnoma zrušila, zato je bilo potek razpok mogoče opisati le iz posnetka preizkusa. Najprej sta nastali vertikalni razpoki po daljši stranici stene, ki sta se širili iz sredine navzgor in navzdol. Proti koncu se je pojavila vertikalna razpoka na sredini ožje stranice, ki se je širila od vrha navzdol. Hkrati je nastala vertikalna razpoka pri robu daljše stranice.



Slika 35: Stena 2 spredaj-sredinska vertikalna razpoka (levo), stena 2 zadnja stran-sredinska vertikalna razpoka (desno)



Slika 36: Stena 2 desna stran-vertikalna razpoka (levo), stena 2 leva stran-robna vertikalna razpoka (desno)

Steno 1 smo preizkušali 30.1.2020. V časovnem zaporedju so se razpoke pojavljale podobno kot pri steni 2 in sicer najprej vertikalni po sredini daljše stranice stene. Proti koncu preizkusa sta se pojavili vertikalni razpoki na sredini ožje stranice stene, ki sta se širili od vrha navzdol. Blizu porušitve so se

enako kot pri steni 2 pojavile še robne razpoke na daljših stranicah stene. Tekom preizkusa je razpokala in odpadla masa, s katero smo zapolnili razpoko nastalo pri sušenju.



Slika 37: Končne razpoke stene 1 desno (levo), končne razpoke stene 1 zadaj (desno)



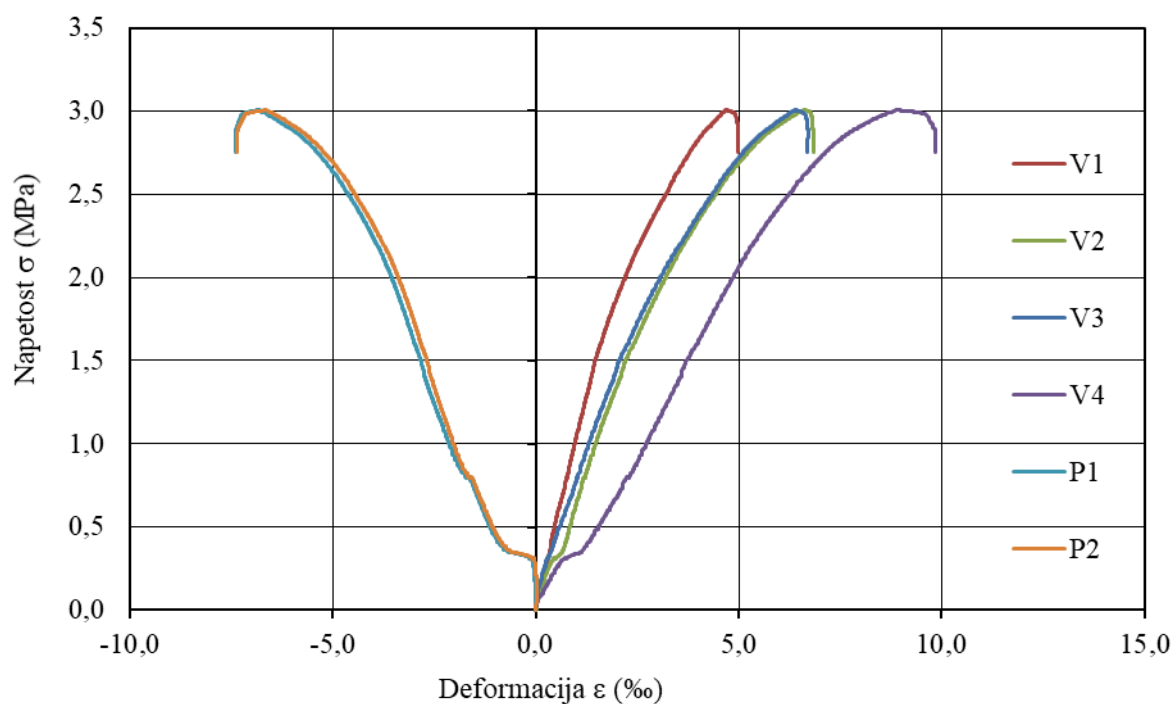
Slika 38: Končne razpoke stene 1 spredaj in levo (levo), končne razpoke stene 1 zadaj in levo (desno)

V času meritev smo spremljali silo, lokalne pomike z LVDT merilniki ter globalen pomik bata. Globalnega pomika bata pri vrednotenju rezultatov nismo upoštevali, saj je bila med sklopom uteži položena guma. Deformacije pri porušitvi so pripadajoče k največji sili in tlačni trdnosti. V1-V4 predstavljajo vertikalne LVDT merilnike, P1 in P2 sta prečna merilnika na dolgi stranici stene, P3 in P4 pa prečna merilnika na ožji stranici stene.

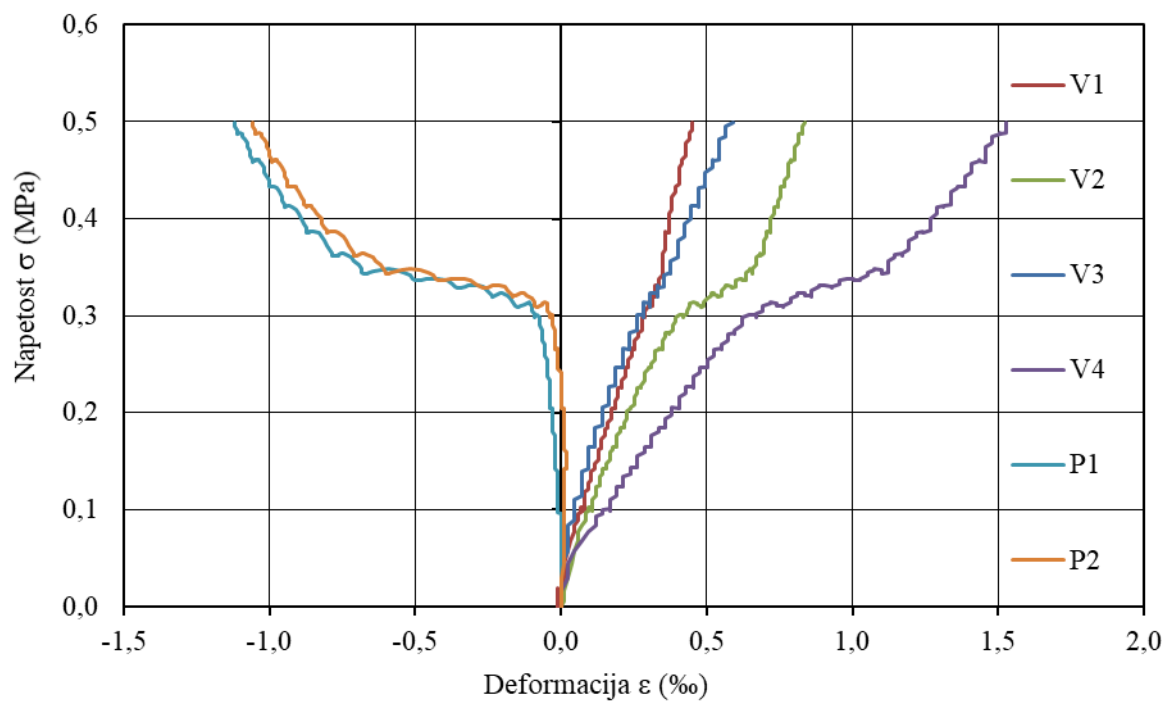
Na grafih 21 do 24 je prikazana odvisnost napetost-lokalna deformacija. Iz Grafov 21 in 23 je razvidno, da graf ni linearen. Da bi lahko določili modul elastičnosti in Poissonov količnik smo elastično območje določili grafično (Graf 22 in 24) na relativno majhnem območju (do 0,50 MPa napetosti). Na Grafu 21 vidimo, da pride do »stopnice« na območju do 0,50 MPa. To območje je podrobneje prikazano na Grafu

22, kjer je dobro razvidno, da se stopnica pojavi na vseh krivuljah pri približno 0,30 MPa. Predpostavimo, da je to nastanek prve razpoke in hkrati elastično območje na katerem določimo modul elastičnosti ter Poissonov količnik. Da bi izključili vpliv naleganja preše na steno, smo modul elastičnosti za steno 1 določili na območju od 0,25 MPa do 0,30 MPa.

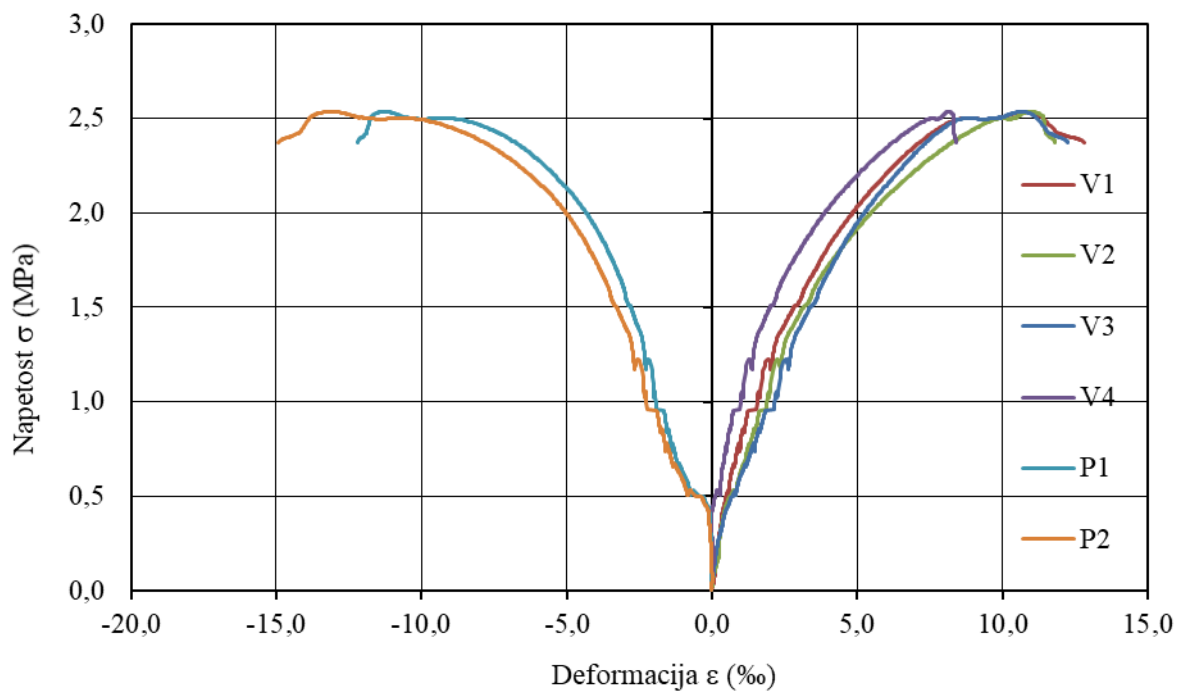
Pri steni 2 je stopnic na grafu več in so manjše (Graf 23). Na Grafu 24 vidimo, da se prva stopnica zgodi med 0,40 MPa in 0,50 MPa. Da bi upoštevali čimbolj linearen del, smo za steno 2 modul elastičnosti določili na območju od 0,35 MPa do 0,40 MPa.



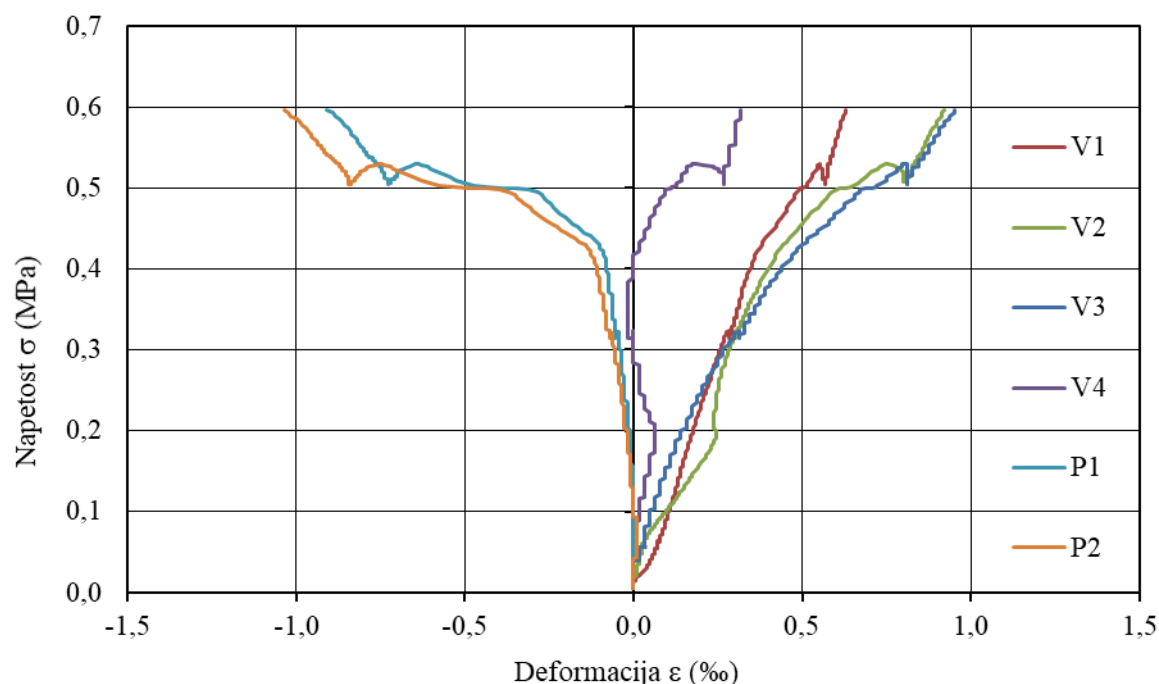
Graf 21: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 1



Graf 22: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 1 - območje do prve razpoke



Graf 23: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 2



Graf 24: Napetost v odvisnosti od prečnih in vertikalnih deformacij STENA 2 - območje do prve razpoke

V Preglednici 14 so zbrani rezultati tlačnega preizkusa in končna vlaga stene. Stena 1 je dosegla višjo tlačno trdnost od SPP preizkušancev in nižjo od najvišje tlačne trdnosti MPP preizkušancev. Tudi stena 2 je dosegla višjo tlačno trdnost od SPP preizkušancev (mešanica E). To je pričakovan rezultat, saj se je steni zbijalo z višjo energijo kot SPP vzorce (in nižjo kot MPP), posledica razlike v energiji zbijanja je tudi sprememba tlačne trdnosti. Glede na standard NZS 4298 obe steni dosegata minimalno zahtevo po tlačni trdnosti za butane stene (1,3 MPa), glede na britansko smernico pa dosegata tudi zadostno tlačno trdnost za nosilne stene (minimalno 2,0 MPa). Tlačna trdnost stene 1 je za skoraj 0,5 MPa višja od tlačne trdnosti stene 2. To je pričakovano, če upoštevamo ugotovitve o vplivu mešanice na tlačno trdnost. Vpliv horizontalne razpoke na tlačno trdnost stene 1 je očitno dovolj majhen, da je stena 1 kljub temu dosegla višjo tlačno trdnost od stene 2. Za steno 2 smo izbrali drugačno mešanico, da bi zmanjšali krčenje in pojav razpok zaradi sušenja. Zaradi različnega načina sušenja težko zaključimo, ali je vzrok za nastanek razpoke na steni 1 le v mešanici, načinu sušenja ali v kombinaciji mešanice z načinom sušenja. Končna vlaga pri steni 1 je podobna izmerjenim na preizkušancih, pri steni 2 je nekoliko višja, kar lahko nakazuje na to, da se gravimetrična vlaga stene ob določevanju tlačne trdnosti ni ustalila.

Preglednica 14: Rezultati preizkusa tlačne trdnosti

	Tlačna trdnost	Končna vlaga	Modul elastičnosti	Poissonov količnik
	f	w_F	E	ν
	MPa	%	MPa	/
Stena 1	3,0	1,24	586,0	0,17
Stena 2	2,5	1,10	1091,0	0,24

7. ZAKLJUČEK

Gradnja butanih sten je v Sloveniji pozabljena tehnika. V manj razvitih državah in v klimatskih pogojih, kjer tovrstna gradnja nudi posebno bivalno ugodje, se je tradicija gradnje butanih sten ohranjala in razvijala. S preходом v t.i. »zeleno« družbo in krožno gospodarstvo tako v Sloveniji, kot tudi v drugih Evropskih državah gradnjo butanih sten obujamo in razvijamo s pomočjo znanj in izkušenj iz držav, kjer so tradicijo ohranjali. Dobrih praks neposredno ni moč prenesti na našo lokacijo. Prilagoditi jih je treba na lokalne podnebne razmere in nacionalne tehnične in zakonske okvirje. V Novi Zelandiji so bili leta 2020 izdani novi standardi za gradnjo butanih sten, ki obravnavajo tudi ukrepe za gradnjo na potresnih območjih. Ravno s tega stališča so ti standardi potencialno aplikativni tudi v Sloveniji, kjer trenutno ni veljavnih standardov za gradnjo butanih sten.

V strokovni in znanstveni literaturi zasledimo 2 veji obravnave butanih sten: načrtovanje in preizkušanje zemljin za izdelavo butanih sten ter ohranitev in obnova zgodovinskih stavb iz butanih sten. Zaradi različnih pristopov in analiz so primerjave rezultatov med avtorji težavne. Preizkusi so izvedeni po standardih veljavnih v državi nastanka strokovnega dela ali pa so uporabljene nestandardne prilagojene metode. Standardi zelo skopo predpisujejo predhodno obdelavo surove zemljine. V našem primeru se je izkazalo, da homogene mešanice iz vlažnih grud glin ter agregata ni možno pripraviti. Gline je potrebno za pripravo homogene mešanice s peskom predhodno posušiti in zmleti. Sušenje in mletje lahko predstavlja vpliv na okolje (odvisno od razpoložljivih tehnologij). V zemljinah so pogosto prisotne tudi organske snovi, ki so v vlažnem okolju aktivne. Te bi bilo potrebno za zagotavljanje dolgoročne stabilnosti mešanic iz zemljine izločiti.

V sklopu naloge smo izvedli laboratorijske preiskave glin in mešanic glin in peska, ki jih kot ustrezne za opredelitev lastnosti navaja literatura (USCS, zrnavost, Proctorjev preizkus, enoosni tlačni preizkus). Rezultate raziskav smo zaradi primerljivih metod preizkušanja lahko primerjali s podatki iz literature in okvirnimi mejnimi vrednostmi v standardih. Pri enoosnem tlačnem preizkusu zračno suhih preizkušancev smo ugotovili, da sme biti začetna vlaga mešanice nekoliko višja od optimalne, saj s tem še vedno dosežemo najvišjo možno tlačno trdnost. Simulacija Proctorjevega preizkusa z uporabo pnevmatskega orodja je bila indikativna za izdelavo stene. Na ta način smo določili optimalno vlago in maksimalno suho gostoto mešanice nabite s pnevmatskim orodjem. Glede na položaj »Proctorjeve« krivulje v skupnem diagramu SPP, MPP in pnevmatsko orodje smo primerjalno ovrednotili energijo zgoščanja s pnevmatskim orodjem. Glede na rezultate preizkusov na steni 1 in 2 lahko zaključimo, da laboratorijske preiskave zadostujejo za izbiro optimalne mešanice za izdelavo butane stene. V našem primeru se je izkazalo, da stene ustrezajo standardnim zahtevam za tlačno trdnost tudi v primeru, da razmerje mešanic med glino in agregatom ni vedno optimalno (npr. od 45/55 do 55/45). Prioriteta pri izbiri optimalne mešanice je bilo doseganje najvišje možne tlačne trdnosti – to pa dosežemo z mešanico, ki vsebuje več glin. Da bi zadostili vsem zahtevam v standardih bi bilo v prihodnje potrebno preveriti tudi vpliv deleža glin v mešanici na krčenje sten.

Rezultati ostalih preizkusov (metilen modro, Enslin-Neff, meja krčenja ter sukcija) se v literaturi o gradnji z zemljino uporabljajo bolj redko oz. postajajo aktualni šele v zadnjih letih. Standardi za gradnjo butanih sten jih ne omenjajo in jih s tega naslova težko komentiramo v sklopu ustreznosti zemljine za pripravo mešanice. Vseeno pa njihova vloga ni zanemarljiva, saj lahko npr. z ustrezno izvedenimi preiskavami sukcije opišemo obnašanje zemljine v različnih pogojih relativne vlage okoliškega zraka oz. med sušenjem in navzemanjem vode.

Z navlaževanjem in sušenjem preizkušancev smo prikazali obnašanje butane zemljine v izrednih razmerah (izredno visoka zračna vlaga oz. kontakt z vodo). S spremljanjem obnašanja zračno suhih preizkušancev v različnih pogojih RH oz. pri stiku z vodo smo potrdili priporočila standardov, ki predpisujejo, da je stena potrebno zaščititi pred direktnim stikom z vodo. Če vemo, da bo stena izpostavljena vodi pa je potrebno mešanici dodati veziva.

Najpomembnejša preizkusa izvedena na steni sta določitev tlačne trdnosti ter spremljanje krčenja zaradi sušenja. Na steni 1 se je tekom sušenja pojavila razpoka. Rezultate smo lahko primerjali z mejnimi standardnimi vrednostmi in ugotovili, da imata steni zadostno tlačno trdnost in je njuno krčenje (glede na večino standardov) manjše od dovoljenega. Stena 1 je kljub razpoki dosegla višjo tlačno trdnost od stene 2, kar je pričakovano glede na rezultate enosne tlačne trdnosti preizkušancev. Vpliva mešanic in načina sušenja na obnašanje sten ne moremo oceniti zaradi premajhnega števila izdelanih sten. Spremljanje temperature in RH jedra sten je bilo zaradi načina delovanja senzorja le deloma uspešno, kljub temu pa smo lahko iz rezultatov sklepali o hitrosti sušenja jedra sten glede na temperaturo ter RH okoliškega zraka.

S kombinacijo teoretičnega dela s praktičnim smo pokazali, da obstaja potencial gradnje butanih sten tudi v Sloveniji. Da bi ta potencial dejansko izkoristili, pa bi morali:

1. Uvesti standarde gradnje z butanimi stenami, veljavne za Slovenijo.
2. Nadaljevati z raziskavami iz področja geotehnike, konstrukcij ter gradbene fizike.
3. Pričeti s praktičnim delom, s katerim bi se pokazala tudi ekonomska upravičenost tovrstne gradnje.

8. VIRI

- Bui, Q. B., Morel, J. C., Hans, S. & Walker, P. 2014. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54 (11): 163-169.
- Bui, Q., Morel, J., Venkatarama Reddy, B. & Ghayad, W. 2009. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44: 912-919.
- Cabeza, L. F. et al., 2013. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23: 536-542.
- Das, B. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford, Cengage Learning.
- El Hajjar, A., Chauhan, P., Prime, N. & Plé, O. 2018. Effect of suction on the mechanical characteristics of uniformly compacted rammed earth. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 143(1):012045.
- François, B., Palazon, L. & Gerard, P. 2017. Structural behaviour of unstabilized rammed earth constructions submitted to hygroscopic conditions. *Construction and Building Materials*, 155: 164-175.
- Hall, M. & Djerbib, Y. 2004. Rammed earth sample production: Context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18 (4): 281-286.
- Hobbs, P. et al. 2018. Shrinkage limit test results and interpretation for clay soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 52 (2):qjagh2018- .
- Maček, M. 2006. Sukcija zemljin. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Maček): 68 f.
- Maček, M. 2012. Vpliv matrične sukcije na pomike plazu Slano blato. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Maček): 210 f.
- Miccoli, L., Drougkas, A. & Müller, U. 2016. In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. *Engineering Structures*, 125 (15): 144-152.
- Minke, G. 2006. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Basel, De Gruyter: 207 str.
- Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B. 2010. Prispevek k boljšemu prepoznavanju nabrekalnega potenciala v zemljinah in mehkih kamninah. *Geologija*, 53 (2): 181-196.

Rokavec, D. 2014. Vrednotenje slovenskih glinišč glede na njihovo perspektivnost. RMZ-materials and geoenvironment, 61 (2/3): 99-105.

Schroeder, H. 2016. Sustainable Building with Earth. Switzerland, Springer International Publishing: 560 str.

Schroeder, H., 2018. The new DIN standards in earth building-The current situation in Germany. Journal of civil engineering and architecture, 12 (2): 113-120.

Walker, P. 2005. Rammed earth : design and construction guidelines. Watford, BRE Bookshop: 146 str.

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

Zbašnik-Senegačnik, M., 2000. Glina - pozabljeno gradivo. Gradbeni vestnik 1: 11-19.

8.1. Standardi in smernice

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

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 E2392 / E2392M-10. Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems.

DIN 18132:2012-04: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens - Soil, testing procedures and testing equipment - Determination of water absorption.

Gradbeni zakon. Uradni list RS št. 61/17, 72/17-popr. in 65/20.

NZS 4297:1998. Engineering design of earth buildings.

NZS 4298:1998. Materials and workmanship for earth buildings.

NZS 4299:1998. Earth buildings not requiring specific design.

SIST EN 16907-4: 2019. Zemeljska dela-4. del: Tretiranje zemljin z apnom in/ali hidravličnimi vezivi.

SIST EN ISO 17892-1:2015. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 1. del: Ugotavljanje vlažnosti.

SIST EN ISO 17892-3:2016. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 3. del: Ugotavljanje gostote zrn.

SIST EN ISO 17892-4:2017. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 4. del: Ugotavljanje zrnave sestave.

SIST EN ISO 17892-7:2018. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 7. del: Enosni tlačni preskus.

SIST EN ISO 17892-12:2018. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 12. del: Ugotavljanje meje tekočine in plastičnosti.

SIST EN 933-9:2009+A1:2013. Preskus geometričnih lastnosti agregatov-Del 9, Ugotavljanje finih delcev : preskus z metilen modrim.

8.2. Elektronski viri

AMAZON. 2020. Pneumatic Tamping Machine. <https://www.amazon.com/Pneumatic-Tamping-Machine-Rammer-0-63Mpa/dp/B07H7CYT4M?th=1> (Pridobljeno 24.11.2020)

CAT. 2020. The WISE Building. <https://www.cat.org.uk/info-resources/free-information-service/building/wise-building/> (Pridobljeno 1.6.2020)

CRATERRE. 2019. Architecture de terre dans le monde. http://craterre.org/accueil:galerie-des-images/default/gallery/38/gallery_view/Gallery (Pridobljeno 30.11.2019)

DECAGON. 2020. WP4-T manual. <http://manuals.decagon.com/Marketing/WP4T.pdf> (Pridobljeno 24.11.2020)

DGNB. 2020. Alnatura Arbeitswelt. <https://www.dgnb-system.de/de/projekte/alnatura-arbeitswelt> (Pridobljeno 1.6.2020)

EUROPA. 2019. Trajnostna Evropa do leta 2030. https://ec.europa.eu/commission/publications/reflection-paper-towards-sustainable-europe-2030_sl (Pridobljeno 25.11.2019)

FRAN. 2019. <https://www.fran.si> (Pridobljeno 27.11.2019)

FIRST IN ARCHITECTURE. 2019. Rammed earth construction. <https://www.firstinarchitecture.co.uk/rammed-earth-construction/> (Pridobljeno 25.11.2019)

GNEZDO. 2020. Prva fasadna dekorativna stena iz zbite zemlje v Sloveniji. <https://gnezdo.si/portfolio-item/prva-fasadna-dekorativna-stena-iz-zbite-zemlje-v-sloveniji/> (Pridobljeno 1.6.2020)

IZS. 2013. Smernica za trajnostno gradnjo. http://arhiv.izs.si/fileadmin/dokumenti/publikacije-IZS/Smernice_IZS/Smernica-TG-final-smal.pdf (Pridobljeno 24.11.2020)

LOCKWOOD CONSTRUCTION. 2020. PERA Building-Public Employees Retirement Association Office-LEED Gold Certified. <http://lockwood-construction.com/rammed-earth-pera-building/> (Pridobljeno 1.6.2020)