

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Janku Logarju za podporo in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge, ter somentorici asist. dr. Jasni Smolar za pomoč in vodenje pri laboratorijskem delu, izdelavi naloge ter za strokovne napotke.

Zahvaljujem se tudi zaposlenim na KGT za pomoč tekom izvajanja laboratorijskih preiskav.

Prav tako se zahvaljujem svoji družini: staršem in bratu, ki so mi bili oslon tekom študija. Hvala Lani za podporo med šolanjem ter nastajanjem te diplomske naloge.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	XYZ.XZ
Avtor:	Marija Rakita
Mentor:	prof. dr. Janko Logar, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	asist. dr. Jasna Smolar, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Vpliv dodatka bentonita na geomehanske lastnosti zemljin
Tip dokumenta:	Diplomsko delo
Obseg in oprema:	44 str., 10 pregl., 7 sl., 25 graf., 1 en., 40 virov
Ključne besede:	bentonit, zemljina, vodoprepustnost, vodovpojnost, sukcija, drenirana strižna trdnost, stisljivost

Izvleček

Bentonit je glina z visoko vodovpojnostjo in nabrekalnim potencialom. Predhodne raziskave kažejo, da dodatek bentonita poveča vlažnost tal in zalogo vode v tleh, ter da se lahko uporablja za izboljšanje tal. V diplomski nalogi smo preiskali vpliv dodatka bentonita na geomehanske lastnosti organske gozdne zemljine odvzete na Ljubelju, v sklopu projekta ONEforest. Zasledovali smo vpliv dodatka dveh različnih vrst bentonita na sposobnost vpijanja in zadrževanja vode, vodoprepustnost, sukcijo, drenirano strižno trdnost in stisljivost. Primerjali smo rezultate laboratorijskih preiskav zemljine z različnimi deleži dodatka (0,4 m% - 8,0 m%) kalcijevega in aktiviranega natrijevega bentonita, ki ima večjo sposobnost vpijanja vode in večji nabrekalni potencial od kalcijevega.

Rezultati kažejo, da dodatek bentonita poveča vodovpojnost in zmanjša vodoprepustnost zemljine. Zaradi dodatka bentonita se zmanjša strižni kot, nekoliko poveča pa se kohezija zemljine. Na sukcijo in stisljivost pa preiskani vrsti bentonita in v deležih, ki smo jih primešali zemljini, nimajo pomembnega vpliva.

Dodatek bentonita je pokazal potencial za izboljšanje zadrževanja vode v tleh v majhnih odmerkih, kar spodbuja rast rastlin, ki kasneje s svojimi koreninami zagotavljajo odpornost proti eroziji tal. Priporočljive so nadaljnje raziskave bentonita, ker je stroškovno učinkovit in ni biorazgradljiv, po čemer se tudi razlikuje od biopolimerov, ki po določenem času izgubijo svojo učinkovitost.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: XYZ.XZ
Author: Marija Rakita
Supervisor: Prof. Janko Logar, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Jasna Smolar, Ph.D.
Title: Effect of bentonite addition on geomechanical properties of soils
Document type: Graduation Thesis
Notes: 44 p., 10 tab., 7 fig., 25 graph., 1 eq., 40 ref.
Keywords: bentonite, soil, water permeability, water absorption, suction, drained shear strength, compressibility

Abstract

Bentonite is a highly absorbent clay with swelling tendency. Previous research shows that adding bentonite to soil increases soil moisture and water retention in the soil. It can also be used to improve and stabilize soil. In this thesis, we examined the influence of bentonite addition on the geomechanical properties of the soil taken from Ljubelj as a part of the ONEforest project. We examined the influence of bentonite addition on the ability to absorb and retain water, water permeability, suction, drained shear strength and compressibility. We compared the differences between the addition of calcium and activated sodium bentonite, considering that sodium bentonite has greater absorption and swelling abilities.

The results show that the addition of bentonite increases the water absorption and decreases the water permeability of the soil with each addition of bentonite. Cohesion was increased, and shear angle was decreased with each addition, with the highest cohesion and the lowest shear angle being at the biggest addition of sodium bentonite. The addition of bentonite has no significant effect on suction and compressibility.

The addition of bentonite has shown potential to improve water retention in soil at low doses, promoting the growth of plants that later provide resistance to soil erosion through their roots. Further research on bentonite is recommended, due to its cost-effectiveness and non-degradability, which distinguishes it from biopolymers, which lose their effectiveness over time.

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	1
ZAHVALA.....	2
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	3
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	4
KAZALO SLIK.....	6
KAZALO PREGLEDNIC.....	7
KAZALO GRAFIKONOV.....	8
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	9
1 UVOD	10
1.1 NAMEN IN CILJ NALOGE.....	12
2 PREISKOVANI MATERIALI	14
2.1 ZEMLJINA.....	14
2.2 BENTONIT.....	15
3 LABORATORIJSKE PREISKAVE	17
3.1 PRIPRAVA VZORCEV	17
3.1.1 VODOVPOJNOST	18
3.1.2 DIREKTNI STRIG, STISLJIVOST IN VODOPREPUSTNOST	18
3.1.3 SUKCIJA.....	19
3.2 POSTOPKI IZVEDBE PREISKAV.....	19
3.2.1 VODOVPOJNOST	19
3.2.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST.....	20
3.2.3 VODOPREPUSTNOST	21
3.2.4 STISLJIVOST	21
3.2.5 SUKCIJA.....	22
4 REZULTATI	24
4.1 VODOVPOJNOST	24
4.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST	27
4.3 VODOPREPUSTNOST.....	29
4.4 STISLJIVOST	31
4.5 SUKCIJA	33
5 ANALIZA REZULTATA.....	36
5.1 VODOVPOJNOST	36
5.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST	37
5.3 VODOPREPUSTNOST.....	38
5.4 STISLJIVOST	38
5.5 SUKCIJA	40
6 ZAKLJUČEK	41
7 VIRI.....	42

KAZALO SLIK

Slika 1: Lokacija odvzema vzorcev zemljine (ONEforest, 2022)	14
Slika 2: Materiali za pripravo mešanic za direktni strig, stisljivost in vodoprepustnost	19
Slika 3: Vzorec med potekom preiskave vodovpojnosti	20
Slika 4: Preizkušanec po preiskavi v direktnem strižnem aparatu.....	20
Slika 5: Preiskava stisljivosti v edometru.....	21
Slika 6: Naprava HYPROP - prerez ugrajenega vzorca z vidnima tenziometroma (Labcell, 2023).....	23
Slika 7: Preizkušanca med izvedbo meritev sukcije z napravo HYPROP	23

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Lastnosti različnih bentonitov (Kumar in sod., 2018; Swain, 2015; Kiviranta in sod., 2011; Johannesson in sod., 2010; Texas Sodium Bentonite, 2012; ZAG, 2012; RGNF, 2015)	12
Tabela 2: Lastnosti zemljine, uporabljene v raziskavi (ONEforest, 2022)	14
Tabela 3: Identifikacijske lastnosti uporabljenih bentonitov (Rudarsko-geološko-naftni fakultet v Zagrebu, 2015)	16
Tabela 4: Vlaga, vsebnost montmorillonita, nabrekljivost in pH uporabljenih bentonitov (Bentoproduct, 2023)	16
Tabela 5: Standardi, po katerih so bile izvedene laboratorijske preiskave.....	17
Tabela 6: Preiskane mešanice	18
Tabela 7: Vodvpojnost preizkušancev v času trajanja preiskave 24 ur (korigirane vrednosti)	25
Tabela 8: Lastnosti preizkušancev in rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti zemljine in mešanic	27
Tabela 9: Rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru	30
Tabela 10: Lastnosti preizkušancev, preiskanih v edometru.....	31

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: Vodovpojnost mešanic s Ca bentonitom - masa preizkušanca 0,2 g.....	25
Graf 2: Vodovpojnost mešanic s Ca bentonitom - masa preizkušanca 1 g.....	26
Graf 3: Vodovpojnost mešanic z Na bentonitom – masa preizkušanca 0,2 g	26
Graf 4: Vodovpojnost mešanic z Na bentonitom – masa preizkušanca 1 g	26
Graf 5: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice s 4 m% bentonita Ca	27
Graf 7: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice s 4 m% bentonita Na	28
Graf 6: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice z 8 m% bentonita Ca	28
Graf 9: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti zemljine brez dodatka	29
Graf 8: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice z 8 m% bentonita Na.....	29
Graf 10: Koeficienti vodoprepustnosti pri bremenski stopnji 25 kPa	30
Graf 11: Koeficienti vodoprepustnosti pri bremenski stopnji 50 kPa	30
Graf 12: Krivulji stisljivosti mešanice s 4 m% bentonita Ca.....	32
Graf 13: Krivulje stisljivosti mešanice z 8 m% bentonita Ca.....	32
Graf 15: Krivulji stisljivosti mešanice z 8 m% Na bentonita	33
Graf 14: Krivulji stisljivosti mešanice s 4 m% Na bentonita	33
Graf 17: Retencijska krivulja mešanice z 8 m% bentonita Ca	34
Graf 16: Retencijska krivulja mešanice z 8 m% bentonita Na	34
Graf 18: Retencijska krivulja zemljine brez dodatka	35
Graf 19: Vodovpojnost mešanic – čas trajanja preiskave 24 ur	36
Graf 20: Rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti mešanic in zemljine brez dodatkov	37
Graf 21: Koeficienti vodoprepustnosti pri različnih bremenskih stopnjah.....	38
Graf 22: Krivulje stisljivosti mešanic in zemljine	39
Graf 23: Moduli stisljivosti mešanic s Ca bentonitom in zemljine brez dodatkov.....	39
Graf 24: Moduli stisljivosti mešanic z Na bentonitom in zemljine brez dodatkov	39
Graf 25: Retencijska krivulja mešanic in zemljine brez dodatka bentonita	40

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

σ_v'	Bremenska stopnja
F	Faktor varnosti proti zdrs
ρ	Gostota
ρ_s	Gostota zrn
v	Hitrost striga
I_c	Indeks konsistence
I_p	Indeks plastičnosti
Ca ⁺	Kalcijev kation
KGT	Katedra za geotehniko
k	Koeficient vodoprepustnosti
c'	Kohezija
e	Količnik por
τ_{max}	Maksimalna strižna napetost
CH	Mastna glina
w _p	Meja plastičnosti
w _L	Meja židkosti
E _{oed}	Modul stisljivosti
w	Naravna vlaga
Na ₂ CO ₃	Natrijev karbonat
Na ⁺	Natrijev kation
σ_n	Normalna napetost
OH	Organski visokoplastični melj
CL	Pusta glina
Sr	Stopnja zasičenosti
φ'	Strižni kot
ρ_d	Suha gostota
m _d	Suha masa
w _A	Vodovpojnost

1 UVOD

ONEforest je projekt Evropske Unije, ki se ukvarja s trajnostnim gospodarjenjem z gozdovi, predvsem z namenom varovanja gozdov pred učinki podnebnih sprememb. (Cordis, 2022) Projekt spodbuja uvedbo regionalnih strategij upravljanja z gozdovi tako, da krepijo odpornost gozdov in zagotavljajo trajnostno oskrbo z lesom ter lesnimi izdelki. (UL FGG, 2023)

Gozdni ekosistem je med drugimi odvisen od tal, kjer raste. Lastnosti tal so odvisne od lokacije in lokalnih klimatskih razmer. Za dolgoročno uspešno rast različnih drevesnih vrst treba zagotavljati:

- zadostno debelino rastne organske prsti,
- ustrezno vlago tal,
- ustrezno rodovitnost tal,
- stabilnost tal (globalna stabilnost in površinska erozija).

Ker se gozdni ekosistemi razlikujejo, so v projekt vključena štiri področja Evrope in pet študijskih območij, v katerih se bodo preučevale podnebno odporne prakse gojenja gozdov in nove metode sajenja z uporabo namensko razvitih dodatkov za izboljšavo ravnega sloja tal in krovnih slojev za zagotavljanje večje odpornosti tal na erozijo. (ONEforest, 2020)

Ta izbrana področja so:

1. Sredozemski gozdovi (področje Španije s študijskim območjem v Italiji in Kras v Sloveniji)
2. Alpski gozdovi (področje Švice s študijskim območjem v alpskem delu Slovenije)
3. Celinski gozdovi (področje Nemčije)
4. Borealni/polborealni gozdovi (področje Estonije s študijskim območjem v Estoniji in podpornimi podatki iz Švedske)

Katedra za geotehniko na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo sodeluje v projektu ONEforest. V teku so preiskave ugotavljanja vplivov proizvodov (dodatkov) za izboljšanje tal, na sposobnost zadrževanja vode, vodoprepustnost in druge geomehanske lastnosti (stisljivost, strižna trdnost) gozdnih tal, odvzetih na različnih lokacijah v Evropi. Organska gozdna zemljina, ki jo preiskujejo v laboratoriju, je bila odvzeta tudi na študijskem območju na Ljubelju v Sloveniji. Na tem območju opravlja gozd funkcijo zaščite pred skalnimi podori in erozijo, ter služi za proizvodnjo lesa. (ONEforest, 2022)

Dodatki na osnovi biopolimerov, uporabljeni v raziskavah na UL FGG KGT, so bili razviti na Univerzi v Trentu v sklopu projekta ONEforest. Izdelani so iz mešanice ksantanskega gumija (biorazgradljivi polimer, ki absorbira veliko količino vode) in lesnih vlaken bukovega lesa v različnih razmerjih. Ugotovljeno je, da namensko razviti dodatki niso škodljivi za rastline in da rastline, ki rastejo v tleh z dodatki, lahko preživijo dlje v sušnih razmerah, saj izboljšana tla bolje zadržujejo vodo. (ONEforest, 2022)

Medtem, Taytak in sod. (2012) ugotavljajo, da po izboljšanju tal z dodatkom biopolimerov, po določenem času pride do zmanjšanja učinka, zaradi razgradnje biopolimerov. Za dolgoročno uporabo biopolimerov je zato treba podrobno raziskati razgradnjo oz. obstojnost biopolimerov, saj predstavlja slabost pri tovrstnih namenih uporabe.

Pri iskanju stabilnih (biološko nerazgradljivih) materialov, ki imajo podobno sposobnost vpijanja in zadrževanja vode kot biopolimeri in bi se lahko uporabili za izboljšanje organskih gozdnih zemljin, se je porodila ideja, da bi lahko gozdna tla izboljšali z naravnim materialom – bentonitom. Bentonit se pogosto uporablja v geotehniki za tesnilne sloje, vrtnalke, injekcijske mase in remediacije. V nadaljevanju so opisane preiskave, kjer je uporabljen bentonit, sam ali s drugimi materiali, za remediacijo tal.

Pri terenskih preiskavah, izvedenih v Iranu je preiskan vpliv dodatka kalcijevega (Ca) bentonita v tla iz gline. Izbrano je sedem vzorcev, klasificiranih kot mastna glina (CH) in/ali pusta glina (CL), temeljnega materiala, ki se uporablja pri gradnji štiri različnih jezov. Rezultati kažejo, da dodatek Ca bentonita poveča erozijsko odpornost glinenih tal. Verjetnost začetka erozije zaradi koncentriranega toka vode, je ovrednotena s primerjavo kritične strižne napetosti tal in hidravlične strižne napetosti, ki jo povzroča vodni tok skozi možne plitve razpoke pod različnimi hidravličnimi gradienti. Pri začetni širini razpoke 25 mm in hidravličnem gradientu 0,2, prišlo bi do erozije tal in sicer pri faktorju varnosti proti zdrs F = 0,9. Po dodatku 4 % kalcijevega bentonita glede na suho maso glinenega vzorca, faktor varnosti proti zdrs znaša 2,0, torej ne pride do erozije tal. Pri isti začetni razpoki (25 mm) in hidravličnem gradientu 1,0, po dodatku 6 % kalcijevega bentonita, faktor varnosti proti zdrs znaša 1,6, kar pomeni, da tudi v tem primeru ne pride do erozije. (Shourijeh in sod., 2020)

V polsušni regiji na Kitajskem so tla (peščena ilovica) izboljšali s kalcijevim bentonitom. Uporaba bentonita je znatno povečala sposobnost zadrževanja vode, zaradi česar se je povečala količina vode, razpoložljive za rastline v plasti tal na globini 0–40 cm. Bentonit je tudi znatno povečal neto stopnjo fotosinteze, stopnjo transpiracije in učinkovitost uporabe vode iz listov. V petih letih izvajanja preiskave, se je za vse parametre fotosinteze in rasti rastlin, kot optimalna izkazala količina bentonita 24 Mg ha⁻¹. (Mi in sod., 2020)

Bentonit se pogosto uporablja tudi v kombinaciji s cementom ali peskom. V Alžiriji so naredili preiskavo obdelave neorganskih tal z mešanico bentonita in cementa. Ugotovili so, da se pri dodatku mešanice 4 % bentonita in 8 % cementa glede na suho maso zemljine poveča vsebnost vode, zaradi bentonita, in zmanjša stisljivost tal, zaradi cementa, ter se s tem zmanjša zrušitveni potencial. Dodana kombinacija bentonita in cementa je zmanjšala poroznost, kar ima za posledico togo in stabilno strukturo tal. (Bellil in sod., 2018)

Po pregledu podatkov v literaturi ugotavljamo, da bentonit ni biološko razgradljiv in da dodatek bentonita pa poveča vlažnost tal in zalogo vode v tleh. Kot takšen zato predstavlja potencialen stabilen (biološko nerazgradljiv) material, ki ima podobno sposobnost vpijanja in zadrževanja vode kot biopolimeri. Zato smo v sklopu te naloge v laboratoriju raziskali možnosti uporabe bentonita za izboljšanje organskih gozdnih tal na Ljubelju v Sloveniji.

Lastnosti bentonita pa se razlikujejo glede na poreklo surovine, zato pridobljeni rezultati preiskav niso splošno uporabni. V tabeli 1 so prikazani različni bentonitni proizvodi iz različnih področij in njihove lastnosti.

Komercialni imeni bentonitov, ki smo jih uporabili pri preiskavah v sklopu diplomske naloge, sta Bentoproseal-Ca-S (kalcijev (Ca) bentonit) in Bentoproseal-A (natrijev (Na) bentonit).

Uporabljeni kalcijev bentonit je najbolj primerljiv s proizvodom IBECO RWC-BF, natrijev bentonit pa ima bolj podobne lastnosti kot CETCO in Texas Sodium bentonite (Tabela 1).

Tabela 1: Lastnosti različnih bentonitov (Kumar in sod., 2018; Swain, 2015; Kiviranta in sod., 2011; Johannesson in sod., 2010; Texas Sodium Bentonite, 2012; ZAG, 2012; RGNF, 2015)

Ca bentonit	Država	Meja židkosti	Meja plastičnosti	Indeks plastičnosti	Vodovpojnost
		w _L [%]	w _p [%]	I _p	w _A [%]
Bentoproseal-Ca-S	Bosna in Hercegovina	132	35	97	125 - 200
Kutch Ca-bentonite	Indija	154	55	99	-
IBECO RWC-BF	Grčija (surovina), Nemčija (proizvodnja)	115	33	82	150±30
IBECO 1	Grčija (surovina), Nemčija (proizvodnja)	220	50	170	253±2
Na bentonit	Država	Meja židkosti	Meja plastičnosti	Indeks plastičnosti	Vodovpojnost
		w _L [%]	w _p [%]	I _p	w _A [%]
Bentoproseal-A	Bosna in Hercegovina	435	26	409	550
		400	38	362	-
CETCO	ZDA	490	50	440	630±9
Texas Sodium bentonite	ZDA	422	29	393	-
Kutch Na-bentonite	Indija	353	39	314	-

1.1 NAMEN IN CILJ NALOGE

Podatki iz literature so pokazali na ugoden vpliv dodatka bentonita na sposobnost vpijanja in zadrževanja vode v zemljinah. Po pregledu literature pa smo ugotovili tudi, da se lahko bentoniti med seboj bistveno razlikujejo, tudi če gre za bentonit istega tipa (npr. Ca ali Na bentonit). Za določen tip bentonita (proizvod) je zato treba v povezavi z zemljino, ki jo želimo izboljšati, opraviti namenske preiskave, s katerimi se določi ustrezna vrsta in količina dodatka bentonita in postopki mešanja.

Bentonit je glina s visoko vodovpojnostjo, sklona nabrekanju, in je v prejšnjim raziskavam pokazano, da dodajanje bentonita v tleh znatno poveča vlažnost tal in zalogo vode v tleh, zlasti v razmeroma sušnih letih. (Mi in sod., 2017) Zasledovali smo predvsem vpliv dodatka bentonita na sposobnost vpijanja in

zadrževanja vode, sukcijo ter vodoprepustnost, z vidika zagotavljanja stabilnosti pa smo preverili tudi vpliv na drenirano strižno trdnost in stisljivost.

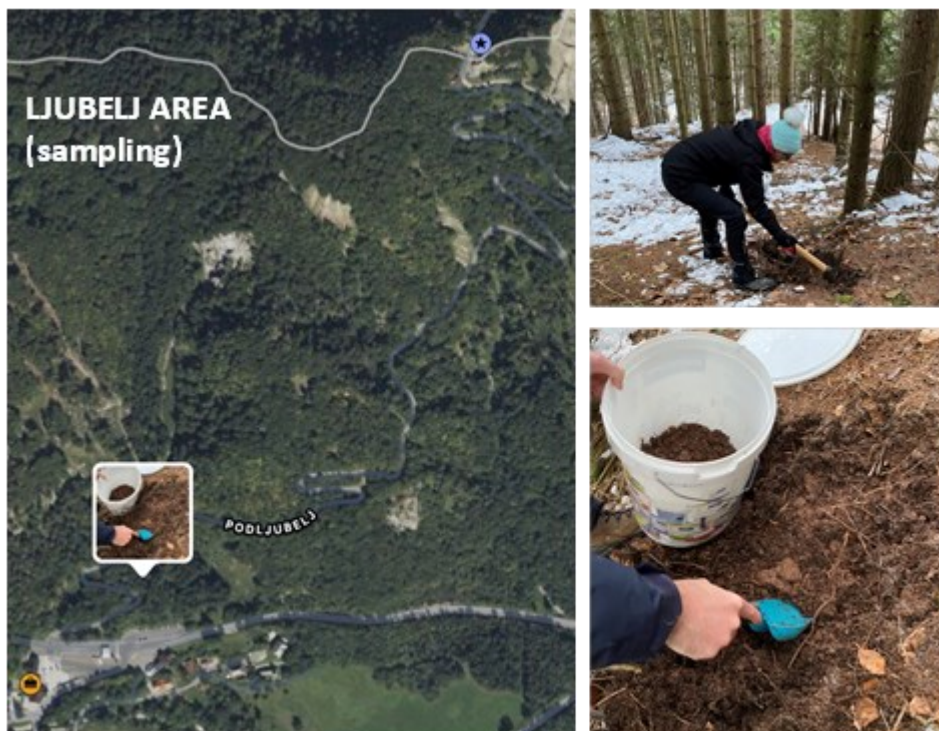
Da bi lahko določili ustrezno vrsto in količino dodatka, smo v laboratoriju pripravili recepture mešanja dveh tipov bentonita (Na in Ca) in organske zemljine, odvzete na območju gozda na Ljubelju. V laboratoriju smo na organski gozdni zemljini z različnimi deleži dodatka Ca ali Na bentonita izvedli geomehanske preiskave. Na podlagi rezultatov laboratorijskih preiskav smo analizirali vpliv dodatka bentonita na geomehanske lastnosti zemljin in primerjali vpliv kalcijevega (Ca) ter natrijevega (Na) bentonita na:

- vodovpojnost zemljine,
- vodoprepustnost zemljine,
- drenirano strižno trdnost zemljine,
- stisljivost zemljine in
- sukcijo zemljine.

2 PREISKOVANI MATERIALI

2.1 ZEMLJINA

V preiskavah smo uporabili organsko zemljino (v nadaljevanju zemljina), odvzeto 30. novembra 2022, v gozdovih na območju Ljubelja (Slika 1). Zemljina je bila odvzeta iz ročnih razkopov, v obliki večjih grud, ki so vsebovale tudi manjše korenine in ostanke vejic. Kose organskih delcev in večje kamne smo pred izvedbo laboratorijskih preiskav ročno odbrali.



Slika 1: Lokacija odvzema vzorcev zemljine (ONEforest, 2022)

Identifikacijske lastnosti zemljine, ki smo jo uporabili za preiskave možnosti izboljšanja z dodatkom bentonita, so podane v tabeli 2 in so bile predhodno preiskane v laboratoriju KGT. V nalogi smo predhodno pridobljene rezultate preiskav zemljine brez dodatka bentonita uporabili za oceno vpliva dodatka bentonita na parametre, ki smo jih zasledovali (vodovpojnost, sukcija, drenirana strižna trdnost, vodoprepustnost, stisljivost).

Uporabljena zemljina je klasificirana kot težko gneten organski visokoplastični melj (OH), rjave barve.

Tabela 2: Lastnosti zemljine, uporabljene v raziskavi (ONEforest, 2022)

Gostota zrn	Naravna vlaga	Vodovpojnost	Meja židkosti	Meja plastičnosti	Indeks plastičnosti	Indeks konsistence
ρ_s [Mg/m ³]	w [%]	w _A [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _P [%]	I _C
2,52	43	87-89	67	41	26	0,92

2.2 BENTONIT

Bentonit je vrsta gline, ki nastane zaradi vremenskih vplivov in erozije vulkanskega pepela. (Qin in sod., 2021) Bentoniti so v glavnem sestavljeni iz glinenih mineralov iz skupine smektita. Struktura, kemična sestava, izmenljiva vrsta ionov in majhni kristali so lastnosti smektita, ki so odgovorni za edinstvene lastnosti bentonita in vplivajo na njegovo obnašanje. (Inglethorpe in sod., 1994) Višji delež smektita pomeni višjo kakovost bentonita. (Domitrović in sod., 2012.)

Najpogostejši mineral gline iz skupine smektita, ki se pojavlja v bentonitih, je montmorillonit. (Domitrović in sod., 2012.) Kemijska formula montmorillonita je:



Dve vrsti glavnih ionskih izmenjevalcev v montmorillonitu sta iona Na^+ in Ca^{2+} . Razlikujemo torej natrijev in kalcijev montmorillonit. Ion Na^+ v natrijevem montmorillonitu povzroči težnjo, da absorbira čim več vode. Bentonit z natrijevim montmorillonitom imenujemo visoko nabrekajoči bentonit. Ion Ca^{2+} je manj dovzeten za absorpcijo vode od iona Na^+ . Bentonit s kalcijevim montmorillonitom imenujemo nizko nabrekajoči bentonit. (Muhammad in Siddiqua, 2022)

V naravi se pojavljajo tri glavne vrste bentonita:

- visoko nabrekajoči (natrijev),
- nizko nabrekajoči (kalcijev),
- bentonit z zmernim nabrekanjem (vmesno natrijev-kalcijev bentonit).

Večina bentonitov, ki jih lahko najdemo po svetu, je nizko nabrekajočih (kalcijevih) bentonitov. Za potrebe industrije se pogosto kalcijev bentonit aktivira z natrijevim karbonatom (Na_2CO_3). Z izmenjavo kationa se tako dobi aktivirani natrijev bentonit. S aktivacijo se spremenijo nekatere lastnosti bentonita in se zaradi tega takšen bentonit lahko uporablja v druge namene.

V tej nalogi smo uporabljali obe vrsti bentonita v prahu: nizko nabrekajoči kalcijev bentonit in visoko nabrekajoči (aktivirani) natrijev bentonit. Bentonita pridobivajo v rudniku kalcijevega bentonita "Sokolac", Šipovo, Republika Srpska, BiH. V podjetju Bentoproduct se izvaja postopek aktivacije natrijevega bentonita.

Meja židkosti, meja plastičnosti in indeks plastičnosti uporabljenih bentonitov, so bili preiskani na Rudarsko-geološko-naftni fakulteti v Zagrebu in so podani v tabeli 3. V tabeli 4 so podatki o lastnostih bentonitov s katerim smo delali v laboratoriju, pridobljeni s strani proizvajalca. Kalcijev bentonit je material zmlet v naravnem stanju. Natrijev bentonit je aktiviran s 5,3 % natrijevim karbonatom (Na_2CO_3) glede na suho maso bentonita.

Vlaga je določena po standardu SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004.

Vsebnost montmorillonita je določena po metodi z metilen modro. Domitrović (2012) navaja, da večja vsebnost smektita pomeni večjo kakovost bentonita, kar pomeni, da je pri tem bentonitu kakovost odvisna od vsebnosti minerala montmorillonita.

Nabrekljivost je določena po standardu ASTM D5890. Vzorec mase 2 g je postopoma dodajan v 100 ml destilirane vode. Nabrekljivost pri natrijevem bentonitu je precej višja, saj je visokonabrekajoči bentonit.

Vrednost pH je bila višja pri natrijevem kot kalcijevem bentonitu. Izmerjena je tako, da je u 200 ml destilirane vode dodano 5 m% bentonita glede na maso vode. Mešanica je izmešana in vstavljena v pH meter.

Tabela 3: Identifikacijske lastnosti uporabljenih bentonitov (Rudarsko-geološko-naftni fakultet v Zagrebu, 2015)

Vzorec	Meja plastičnosti	Meja židkosti	Indeks plastičnosti
	w _P [%]	w _L [%]	I _p [%]
Ca bentonit	35,3	132,0	96,7
Na bentonit	37,7	325,0	287,3

Tabela 4: Vlaga, vsebnost montmorillonita, nabrekljivost in pH uporabljenih bentonitov (Bentoproduct, 2023)

Bentonit	Ca	Na
Vlaga [%]	11,3	12,9
Vsebnost montmorillonita [%]	88	87
Nabrekljivost [ml]	6	40
pH	9,12	10,4

3 LABORATORIJSKE PREISKAVE

Laboratorijske preiskave so potekale na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo na katedri za geotehniko v obdobju februar-junij 2023. Pri laboratorijskih preiskav smo generalno sledili standardnim postopkom navedenim v tabeli 5, razen pri merjenju sukcije z metodo izhlapevanja (naprava HYPROP), saj postopek ni standardiziran. Pri meritvah sukcije z metodo izhlapevanja in s psihrometrom WP4-T smo sledili navodilom proizvajalca naprav.

Tabela 5: Standardi, po katerih so bile izvedene laboratorijske preiskave

Preiskava	Standard
Ugotavljanje vlažnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004
Ugotavljanje gostote zrn	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-3:2016
Ugotavljanje meje židkosti in meje plastičnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12:2018
Ugotavljanje vodovpojnosti po Enslin-Neff	DIN 18132:2012-04
Ugotavljanje strižne trdnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004
Ugotavljanje vodoprepustnosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-11:2019
Ugotavljanje stisljivosti	SIST-TS CEN ISO/TS 17892-5:2004
Meritve sukcije s psihrometrom WP4-T	ASTM D6836, navodila proizvajalca naprave

3.1 PRIPRAVA VZORCEV

Pred začetkom preiskav smo pripravili naravno vlažno organsko zemljino, iz katere smo predhodno ročno odbrali večje organske delce in večja zrna grušča in kamenja. Med nadaljnjimi raziskavami je bila uporabljena »prečiščena« zemljina (v nadaljevanju zemljina).

Zemljino, pripravljeno za izvedbo laboratorijskih preiskav, smo prekrili tako, da ni bila v stiku s zrakom v okolici. S tem smo preprečili izhlapevanje vode (sušenje) in ohranjali naravno vlago zemljine.

Z izjemo preiskave vodovpojnosti, kjer smo uporabili zemljino sušeno do konstantne mase pri temperaturi $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, smo pri pripravi preizkušancev za ostale laboratorijske preiskave, izhajali iz naravno vlažne zemljine.

Pri vseh preiskavah smo uporabljali obe vrsti bentonita; natrijev (Na) bentonit in kalcijev (Ca) bentonit. Suh bentonit smo dodajali v odmerkih glede na suho maso zemljine (m%). Za izračun količine dodanega bentonita, smo delu pripravljene zemljine izmerili vlago, na podlagi katere smo lahko izračunali suho maso vzorca zemljine in nadalje tudi potreben dodatek bentonita. Skupno smo preiskali osem (8) mešanic zemljine in bentonitov. Kazalo preiskanih mešanic je v tabeli 6.

Tabela 6: Preiskane mešanice

Mešanica / material	Mešanica / material
Ca bentonit	Na bentonit
0,4 m% Ca	0,4 m% Na
0,8 m% Ca	0,8 m% Na
4 m% Ca	4 m% Na
8 m% Ca	8 m% Na

3.1.1 VODOVPOJNOST

Za preiskavo vodovpojnosti smo pripravili mešanico suhe zemljine in bentonita. Metoda Enslin-Neff, ki smo jo uporabili za določanje vodovpojnosti, se tudi sicer uporablja za nadzor kakovosti proizvodov iz bentonita. (Petkovšek in sod., 2009.)

Zemljino smo posušili na temperaturi 45 °C. Suho zemljino smo zdrobili v frakcijo 0 mm - 0,355 mm in jo do priprave mešanic z bentonitom in preiskav vodovpojnosti hranili v eksikatorju, da je bilo preprečeno navlaževanje zaradi zračne vlage v laboratoriju.

Za meritve vodovpojnosti, smo pripravili homogene mešanice iz 5 g suhe zemljine ustrezne zrnivosti (0 mm-0,355 mm), ki smo ji dodali bentonit v odmerkih 0,4 m%, 0,8 m%, 4 m% ali 8 m% glede na suho maso zemljine. Iz tako pripravljenega vzorca smo odtehtali preizkušanece mase 1,0 g oz. 0,2 g, ki smo ga uporabili za izvedbo preiskave. Večjo količino mešanice od potrebne mase preizkušanca smo pripravili v izogib morebitnim napakam in nehomogenostim.

3.1.2 DIREKTNI STRIG, STISLJIVOST IN VODOPREPUSTNOST

Mešanice za preizkušance, na katerih smo izvedli preiskave drenirane strižne trdnosti, stisljivosti in vodoprepustnosti so pripravljene na podoben način. Zmešali smo predhodno prečiščeno zemljino pri naravni vlagi in suh bentonit v prahu (Slika 2). Pri tem smo bili pozorni na homogeno mešanje, saj bentonit zelo hitro reagira z vodo v zemljini, zaradi česar se tvorijo grudice. Vzorce smo ugradili v kalupe (kvadratni kalup pri direktnem strigu in krožni pri stisljivosti in vodoprepustnosti) tako, da je preizkušanelec rahlo zabito pri dodajanju v kalup.

Pri vseh treh preiskavah je bil dodan delež bentonita 4 m% in 8 m% glede na suho maso zemljine.



Slika 2: Materiali za pripravo mešanic za direktni strig, stisljivost in vodoprepustnost

3.1.3 SUKCIJA

Podobno kot pri pripravi preizkušancev za preiskave drenirane strižne trdnosti, stisljivosti in vodoprepustnosti, smo tudi v tem primeru suh bentonit (8 m%) primešali naravno vlažni zemljini.

Za meritve totalne sukcije v napravi WP4-T smo pripravljen vzorec enakomerno dovlačili toliko, da je bila začetna sukcija približno 100 kPa in smo lahko pričeli izvajati meritve.

Preizkušanca za preiskave matrične sukcije z napravo HYPROP smo vgradili v namenski kalup in ju pred pričetkom preiskave zasitili z vodo.

3.2 POSTOPKI IZVEDBE PREISKAV

3.2.1 VODOVPOJNOST

Za potrebe diplomske naloge smo za vsako mešanico naredili preizkus pri masi 0,2 g in 1 g preizkušancev. Vodovpojnost smo iz vrednotili glede na količino vode, ki jo je bil preizkušanec sposoben absorbirati v 24 urah od pričetka izvedbe preiskave.

Pri meritvah z napravo Enslin-Neff (Slika 3) se zaradi same zasnove naprave pojavi problem izhlapevanja vode med preiskavo. Korekcijo smo naredili z upoštevanjem rezultata meritev brez vzorca tj. merjenje izhlapevanja destilirane vode v določenem časovnem obdobju. Kontrolne meritve, ki smo jih upoštevali pri korekciji izhlapevanja, smo izvajali najmanj 1 krat na 10 dni oz. pogosteje, če so se v laboratoriju spremenili pogoji (npr. kurilna sezona...).



Slika 3: Vzorec med potekom preiskave vodovpojnosti

3.2.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST

Pri izvedbi preiskave smo sledili napotkom standarda. Med konsolidacijo in v fazi striga so bili preizkušanci preplavljeni. Po končani konsolidaciji, smo preizkušance strižno obremenjevali s konstantno hitrostjo do porušitve. Hitrosti striženja nismo določili iz linije konsolidacije, saj smo ocenili, da bi lahko bila previsoka in bi se med striženjem v preizkušancu formirali presežni porni tlaki. Zato smo izbrali nižjo hitrost, ki je tudi sicer primerna za strižno obremenjevanje glin ($0,0025 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$). Po porušitvi smo preizkušance razgradili iz strižne celice (Slika 4) ter posušili z namenom ugotavljanja vlage pred preiskavo in po preiskavi. Preizkušance smo do konstantne mase sušili pri temperaturi 45°C .



Slika 4: Preizkušanec po preiskavi v direktnem strižnem aparatu

3.2.3 VODOPREPUSTNOST

Meritve koeficienta vodoprepustnosti smo izvedli v permeamtru s spremenljivim hidravličnim padcem (edometru), na zasičenih (saturiranih) preizkušancih, po koncu konsolidacije pri bremenskih stopnjah 25 kPa in 50 kPa.

3.2.4 STISLJIVOST

Stisljivost mešanic smo določili z edometrskim preizkusom (Slika 5). Za ugotavljanje ponovljivosti preiskav, smo iz vsake mešanice pripravili dva paralelna preizkušanca. Preizkušance, vgrajene v edometrsko celico smo preplavili pri bremenski stopnji 4,5 kPa ali 12,5 kPa. Po preplavitvi smo zasledovali nabrekalne deformacije. Ko so se nabrekalne deformacije izvršile, smo nadaljevali z obremenjevanjem preizkušancev v bremenskih stopnjah 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa in 200 kPa. Ko smo dosegli zadnjo bremensko stopnjo je sledilo razbremenjevanje, v bremenskih stopnjah 100 kPa, 50 kPa, 25 kPa in 4,5 kPa.

Po popolni razbremenitvi smo preizkušance razgradili iz edometrske celice, jim izmerili višino, ter jih posušili z namenom ugotavljanja vlage pred preiskavo in po preiskavi. Preizkušance smo do konstantne mase sušili pri temperaturi 45 °C.



Slika 5: Preiskava stisljivosti v edometru

3.2.5 SUKCIJA

Maček (2006) sukucijo opredeli kod merilo za energijo, ki privlači vodo v strukturo zemljine ali jo pa tam zadržuje. To je negativni tlak v tleh. (Maček, 2006) Sukcija je enaka 0 pri popolno zasičenih zemljinah. Ko se stopnja zasičenosti znižuje, sukcija v zemljini narašča. (Starbek, 2008)

Meritve sukucije smo izvajali z napravama WP4-T (meritve totalne sukucije) in HYPROP (meritve matrične sukucije).

Meritve totalne sukucije smo izvajali s psihrometrom WP4-T. Princip delovanja naprave in postopek izračuna sukucije, ki jo kot rezultat poda naprava, je v navodilih proizvajalca naprave. (Decagon Devices, 2003)

Rezultati meritev z WP4-T so zanesljivi pri totalnih sukucijah višjih od 300 kPa, ocena totalne sukucije je pa možna do vrednosti 100 kPa. Pri sukucijah, nižjih od 100 kPa, je merilna negotovost prevelika, zato v tem območju ne podajamo rezultatov meritev.

Začetna sukcija vzorcev je bila približno 100 kPa. Vzorce smo nadalje enakomerno sušili na zraku in postopoma odvezemali različno vlažne preizkušance za meritve sukucije. Pri doseženi želeni vlagi, smo odvzete preizkušance v namenskih tesno zaprtih PVC posodicah pustili najmanj 24 ur, da se je vlaga enakomerno porazdelila in uravnotežila.

Na vseh vzorcih smo izmerili sukucije v fazi sušenja (krivulja sušenja).

Pred izvedbo meritev smo psihrometer WP4-T umerili s standardno raztopino KCl. Meritev smo na posameznem preizkušancu izvajali toliko časa, da se je odčitek sukucije ustalil (ali ± 1 % ali ± 100 kPa). Preizkušancem smo po končani meritvi sukucije izmerili vlago s sušenjem do konstantne mase v sušilniku pri temperaturi 45 °C.

Meritve matrične sukucije smo izvajali z napravo HYPROP, ki se sestoji iz dveh tenziometrov različnih dolžin in tehtnice. Metoda merjenja temelji na principu izhlapevanja. Meritve smo izvajali v območju sukucij med 0 kPa in ca. 85 kPa.

Istočasno smo na dveh napravah izvedli meritve zemljine z dodatkom 8 m% bentonita Ca in 8 m% bentonita Na (Slika 6). Preizkušanca smo vgradili v kalup, premera 80 mm in višine 50 mm in ju izpostavili stiku z vodo tako, da sta se lahko navzemala vode preko porozne ploščice, pritrjene na spodnjo ploskev preizkušanca. Po saturaciji smo v preizkušanca izvrtali luknji, v kateri smo vtisnili tenziometra, pritrjena na kapo s senzorji (Slika 7).

Napravo z vgrajenima preizkušancema smo postavili na tehtnico in preizkušanca izpostavili prostemu izhlapevanju, ki je potekalo počasi. Med izhlapevanjem se zvezno meri sukcija in masa preizkušancev.

Po koncu preiskave smo določili končno mokro maso preizkušanca in po sušenju v sušilniku do konstante mase (pri temperaturi 45 °C) še končno suho maso. Iz meritev sprememb mase smo, za

pripadajoče povprečne sukcije, izračunali povprečne vlage v vseh merskih točkah (100 do 1000 parov meritev).



Slika 7: Preizkušanca med izvedbo meritev sukcije z napravo HYPROP
(levo: Na bentonit, desno: Ca bentonit)



Slika 6: Naprava HYPROP - prerez ugrajenega vzorca z vidnima
tenziometroma (Labcell, 2023)

4 REZULTATI

V sklopu te naloge so bile izvedene preiskave mešanic zemljine in bentonita. Preiskave zemljine brez dodatka bentonita so bile opravljene v sklopu projekta ONEforest v laboratoriju KGT po enakih postopkih, kot smo jih uporabili pri preiskavah v sklopu te naloge (Tabela 5). Rezultate predhodno izvedenih preiskav zemljine smo uporabili za oceno učinka bentonita na izbrane geomehanske lastnosti preiskane organske zemljine.

4.1 VODOVPOJNOST

Poteki preiskav vodovpojnosti so za preizkušance suhe mase 1 g in 0,2 g prikazani na grafih 1, 2, 3 in 4, izmerjene pripadajoče vodovpojnosti v času 24 ur so v tabeli 7. Posamezno preiskavo smo, skladno s priporočilom standarda, zaključili po 24 urah, četudi vpijanje vode še ni bilo povsem končano (razvidno iz grafov 1, 2, 3 in 4). Pridobljeni rezultati tako ne določajo maksimalne vodovpojnosti mešanic, ampak služijo za primerjavo učinka različnih vrst in deležev dodanega bentonita.

Vodovpojnost preizkušancev smo korigirali tako, da smo upoštevali izhlapevanje vode v času trajanja preiskave (postopek določitve korekcijskega faktorja je opisan v tč. 3.2.1).

Standard podaja suho maso (v nadaljevanju masa) preizkušanca glede na pričakovano vodovpojnost ($w_A < 100 \% \rightarrow m_d = 1,0 \text{ g}$, $w_A \geq 100 \% \rightarrow m_d = 0,2 \text{ g}$). V sklopu te naloge smo, ne glede na pričakovano vodovpojnost bentonitov in mešanic, preiskave izvedli tako na preizkušancih suhe mase 1,0 g, kot tudi na preizkušancih suhe mase 0,2 g (Tabela 7).

Preiskava vodovpojnosti 1 g suhe zemljine brez dodatka bentonita, je bila končana po 900 sekundah, saj zemljina ni vpijala več vode. Ker je vodovpojnost zemljine nižja od 100 %, preiskave na preizkušancu suhe mase 0,2 g nismo izvajali.

Vodovpojnost mešanic z dodatkom Ca bentonita je pričakovano odvisna od deleža dodanega bentonita. Le v primeru dodatka 0,4 m% Ca bentonita, je rezultat preiskave, ne glede na začetno suho maso preizkušanca, primerljiv (Tabela 7).

Pri vzorcu natrijevega (Na) bentonita mase 1 g je med preiskavo zmanjkalo vode v merilni kapilari, zato smo ta test izločili. Preizkušanci iz mešanice zemljine z dodatkom Na bentonita mase 1,0 g, so ne glede na količino dodatka (0,4 % - 8 %), v 24 urah vpili primerljivo količino vode (106 % - 116 %). Vodovpojnost preizkušancev mase 0,2 g, pripravljenih iz enakih mešanic pa je bila odvisna od deleža dodatka bentonita (Tabela 7).

Rezultati preiskav za sam bentonit (Tabela 7) je primerljivega reda velikosti kot predhodno pridobljeni (Tabela 1).

Skladno s podatki iz literature ugotavljamo, da imajo zemljine, izboljšane z bentonitom večjo sposobnost vpijanja vode in da je slednja odvisna tudi od vrste dodanega bentonita. Z raziskavami smo pokazali, da je uporabljeni Na bentonit bolj učinkovit za izboljšanje vodovpojnosti, kot Ca bentonit, saj lahko primerljive rezultate dosežemo že z nižjimi dodatki (Tabela 7).

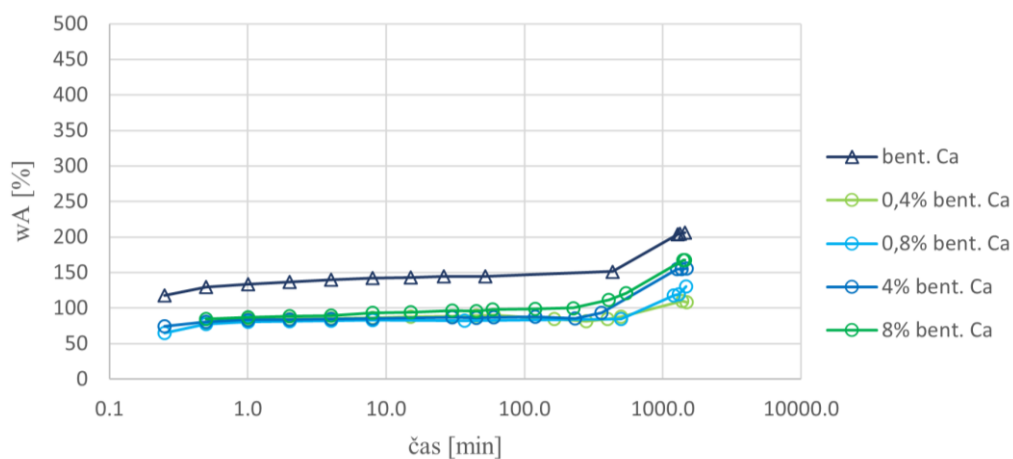
Na podlagi rezultatov preiskav vodovpojnosti, smo se zaradi časa trajanja izvedbe ostalih preiskav in zaradi težavnosti priprave mešanic z nizkimi dodatki bentonita (homogenizacija) odločili, da preiskave drenirane strižne trdnosti, koeficienta vodoprepustnosti, stisljivosti in sukcije izvedemo le na mešanicah z višjo vsebnostjo bentonita.

Tabela 7: Vodovpojnost preizkušancev v času trajanja preiskave 24 ur (korigirane vrednosti)

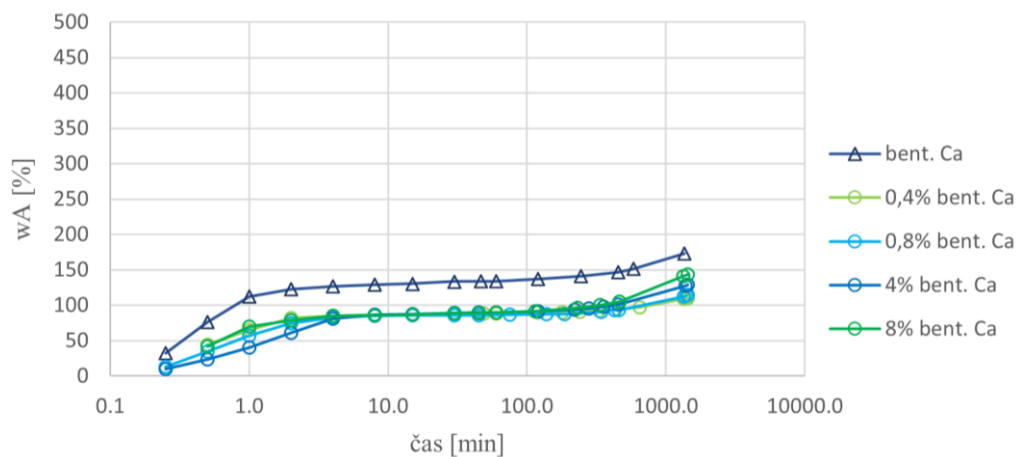
Mešanica / material	w _A [%] - 1 g preizkušanca	w _A [%] - 0,2 g preizkušanca
Ca bentonit	188,9	206,5
0,4 m% Ca	110,2	109,6
0,8 m% Ca	114,3	130,4
4 m% Ca	129,2	155,9
8 m% Ca	143,7	167,5
Na bentonit	-**	486,0
0,4 m% Na	111,6	128,7
0,8 m% Na	106,0	157,5
4 m% Na	116,7	199,0
8 m% Na	116,0	173,9
Zemljina	87-89*	-

*preiskava končana po 15 min (zemljina ni več vpijala vode)

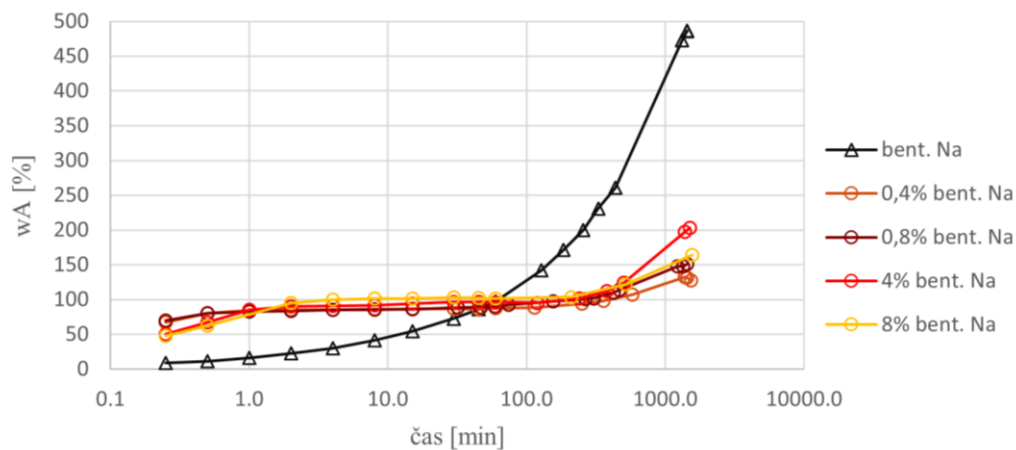
**preiskave ni bilo možno izvesti, saj je prej kot v 24 urah zmanjkalo vode v merilni kapilari



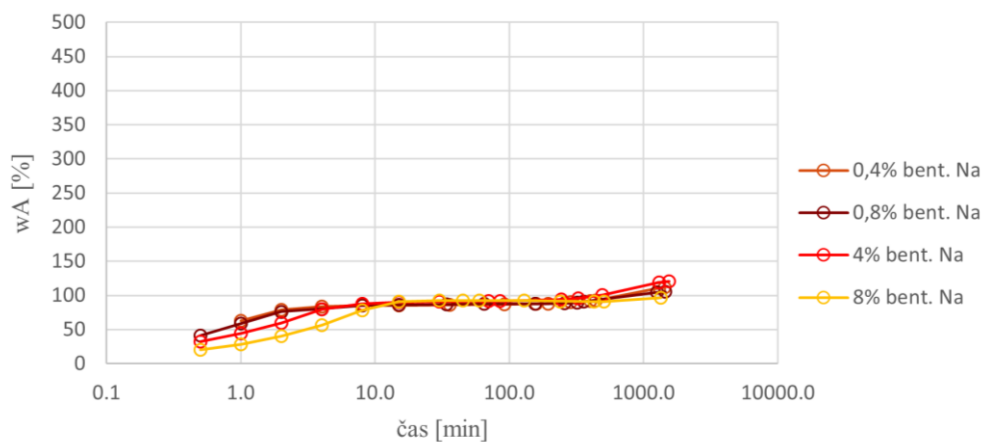
Graf 1: Vodovpojnost mešanic s Ca bentonitom - masa preizkušanca 0,2 g



Graf 2: Vodovpojnost mešanic s Ca bentonitom - masa preizkušanca 1 g



Graf 3: Vodovpojnost mešanic z Na bentonitom – masa preizkušanca 0,2 g



Graf 4: Vodovpojnost mešanic z Na bentonitom – masa preizkušanca 1 g

4.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST

Rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti so prikazani na grafih 5, 6, 7, 8 in 9, za vse preiskane mešanice (4 m% Ca, 8 m% Ca, 4 m% Na in 8 m% Na) in za zemljino brez dodatkov.

V tabeli 8 so zbrane lastnosti preizkušancev in rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti:

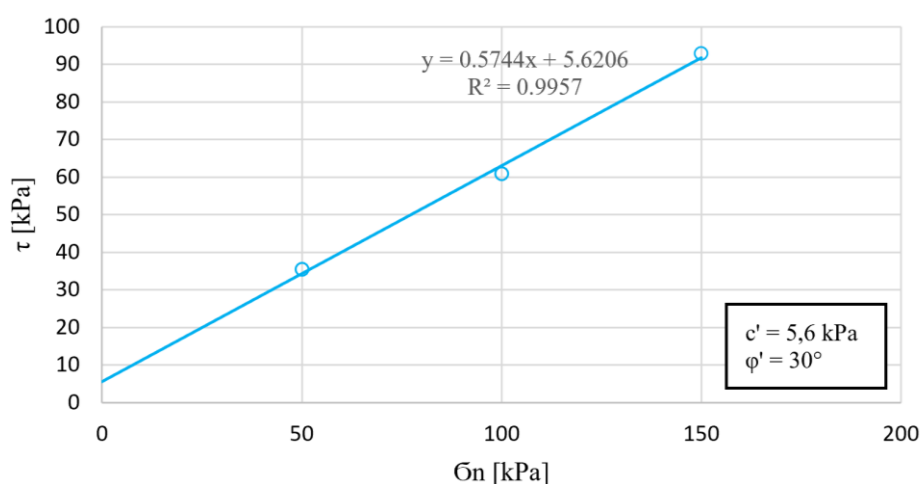
- povprečna začetna vlaga (povp. w_i),
- povprečna začetna gostota (povp. ρ_i),
- povprečna začetna suha gostota (povp. ρ_{di}),
- povprečni začetni količnik por (povp. e_i),
- povprečna začetna stopnja zasičenosti (S_{ri}),
- izmerjena kohezija (c'),
- izmerjeni strižni kot (ϕ') in
- določena hitrost striga (v).

Rezultati kažejo, da imajo mešanice zemljine in bentonita nižjo drenirano strižno trdnost, kot zemljina brez dodatka.

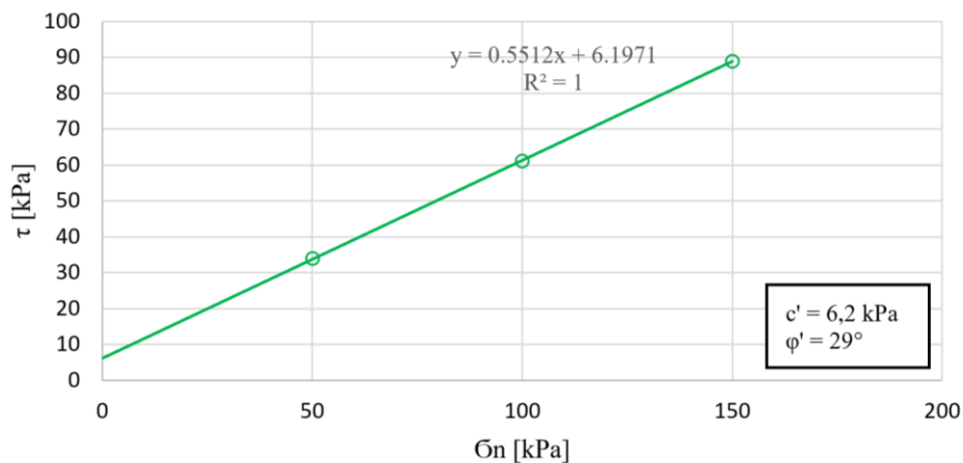
Povprečna začetna stopnja zasičenosti (S_{ri}) je določena na podlagi gostote zrn zemljine $\rho_s = 2,52 \text{ Mg/m}^3$.

Tabela 8: Lastnosti preizkušancev in rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti zemljine in mešanic

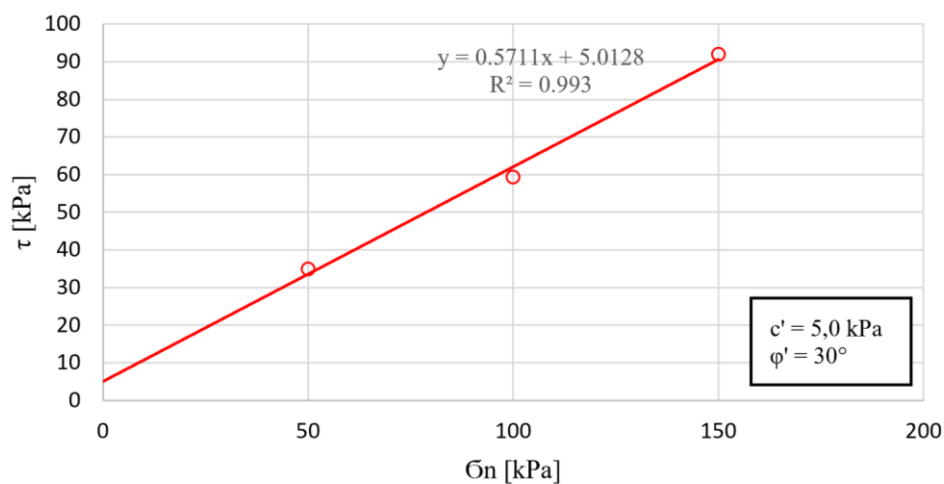
Mešanica	Povp. w_i [%]	Povp. ρ_i [Mg/m ³]	Povp. ρ_{di} [Mg/m ³]	Povp. e_i	Povp. S_{ri} [%]	v [mm/min]	c' [kPa]	ϕ' [°]
4 m% Ca	46	1,43	0,98	1,58	73	0,0025	5,6	30
8 m% Ca	45	1,43	0,98	1,56	73	0,0025	6,2	29
4 m% Na	44	1,43	0,99	1,54	73	0,0025	5,0	30
8 m% Na	43	1,43	1,00	1,53	71	0,0025	9,8	25
Zemljina	44	1,49	1,03	1,44	78	0,002	4,1	33,5



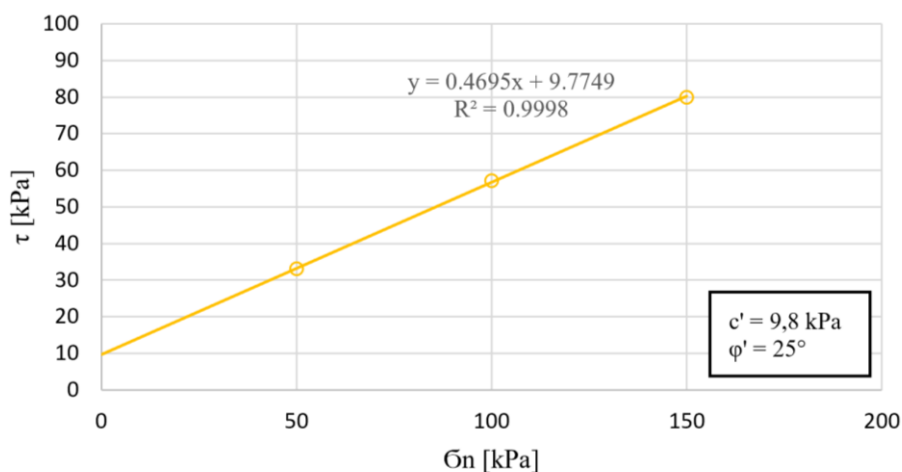
Graf 5: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice s 4 m% bentonita Ca



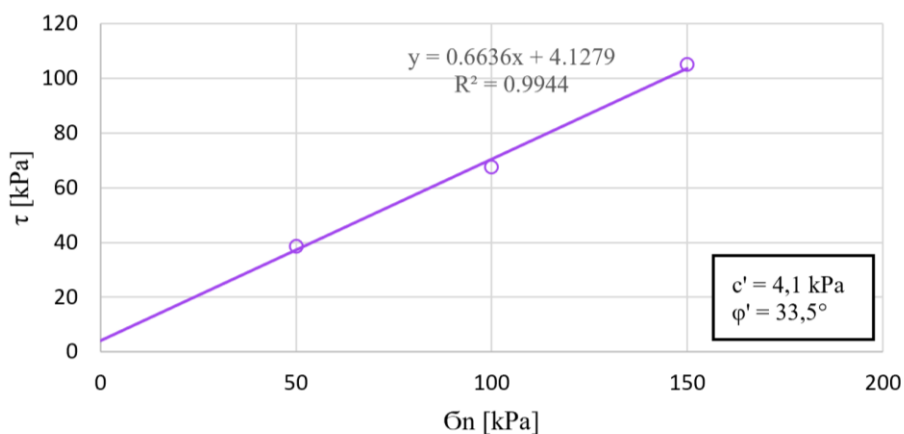
Graf 7: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice z 8 m% bentonita Ca



Graf 6: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice s 4 m% bentonita Na



Graf 9: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti mešanice z 8 m% bentonita Na



Graf 8: Rezultat preiskave drenirane strižne trdnosti zemljine brez dodatka

4.3 VODOPREPUSTNOST

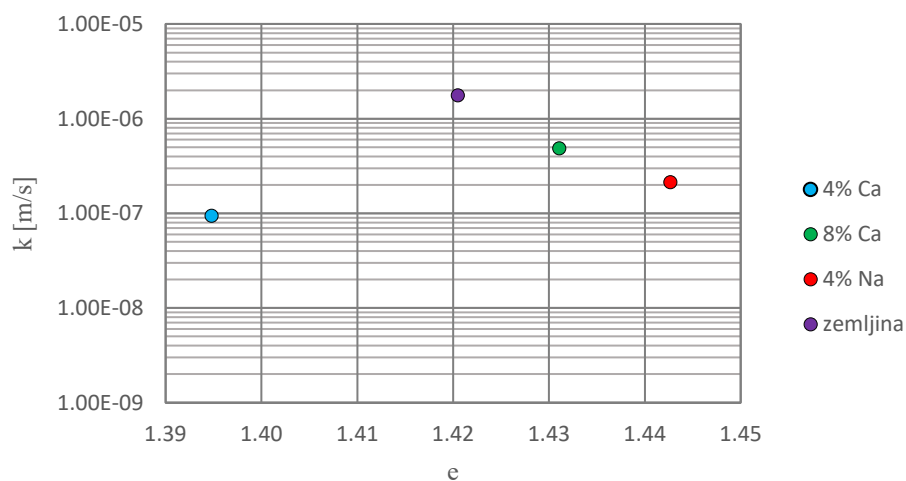
Vodoprepustnost je bila izmerjena med edometrsko preiskavo pri bremenskih stopnjah 25 kPa in 50 kPa. Na grafih 10 in 11, ter v tabeli 9 so prikazane soodvisnosti koeficienta vodoprepustnosti in količnika por pri posamezni bremenski stopnji.

Vodoprepustnost mešanice z 8 m% Na bentonita, pri bremenski stopnji 25 kPa ni bila merjena.

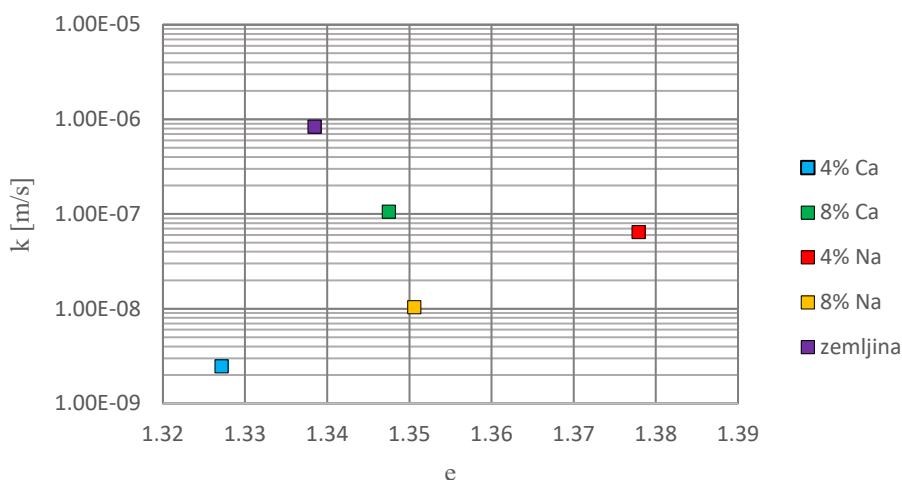
Rezultati so pričakovani in kažejo, da dodatek bentonita zniža vodoprepustnost zemljine.

Tabela 9: Rezultati preiskav vodoprepustnosti v edometru

Bremenska stopnja, σ_v' [kPa]	Mešanica	Povprečni k [m/s]	e
25	4 m% Ca	$9,46 \cdot 10^{-8}$	1,39
	8 m% Ca	$4,87 \cdot 10^{-7}$	1,43
	4 m% Na	$2,13 \cdot 10^{-7}$	1,44
	8 m% Na	-	1,43
	Zemljina	$1,76 \cdot 10^{-6}$	1,42
50	4 m% Ca	$2,45 \cdot 10^{-9}$	1,33
	8 m% Ca	$1,06 \cdot 10^{-7}$	1,35
	4 m% Na	$6,42 \cdot 10^{-8}$	1,38
	8 m% Na	$1,03 \cdot 10^{-8}$	1,35
	Zemljina	$8,37 \cdot 10^{-7}$	1,34



Graf 10: Koeficienti vodoprepustnosti pri bremenski stopnji 25 kPa



Graf 11: Koeficienti vodoprepustnosti pri bremenski stopnji 50 kPa

4.4 STISLJIVOST

Na grafih 12, 13, 14 in 15 so prikazane krivulje stisljivosti mešanic. Da bi ugotovili ponovljivost meritev, na podlagi katere lahko sklepamo tudi o homogenosti pripravljenih mešanic, smo preiskali najmanj dva preizkušanca iz vsake mešanice.

Preizkušance iz mešanic s 4 m% Ca, 8 m% Ca (test 1 in 2) in 8 m% Na smo preplavili pri bremenski stopnji 4,5 kPa, zato je na grafih 12, 13 in 15 pri tej bremenski stopnji vidno nabrekanje zaradi preplavitve.

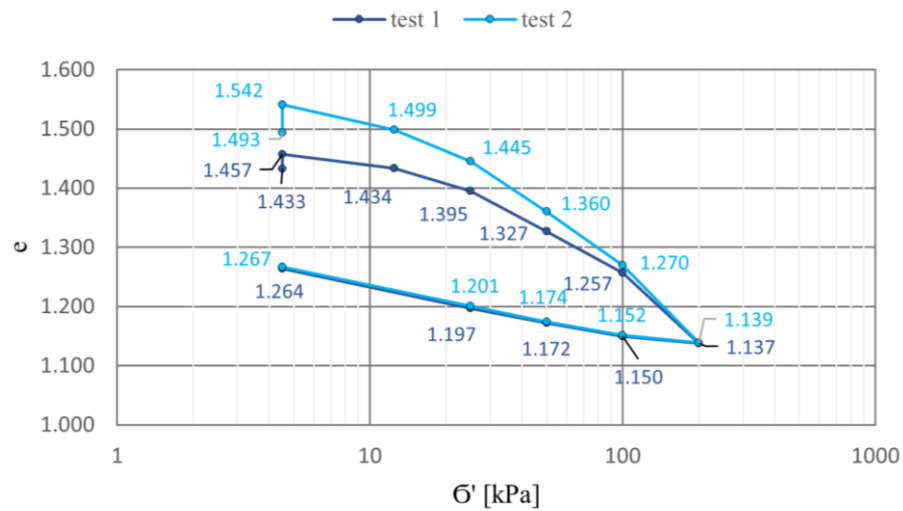
Preizkušanca iz mešanice s 4 m% Na bentonita in 3. ponovitev preiskave mešanice z 8 m% Ca bentonita smo preplavili pri bremenski stopnji 12,5 kPa, pri čemer pa znatnega nabrekanja nismo zabeležili.

V tabeli 10 smo prikazali rezultate, ki smo jih poračunali:

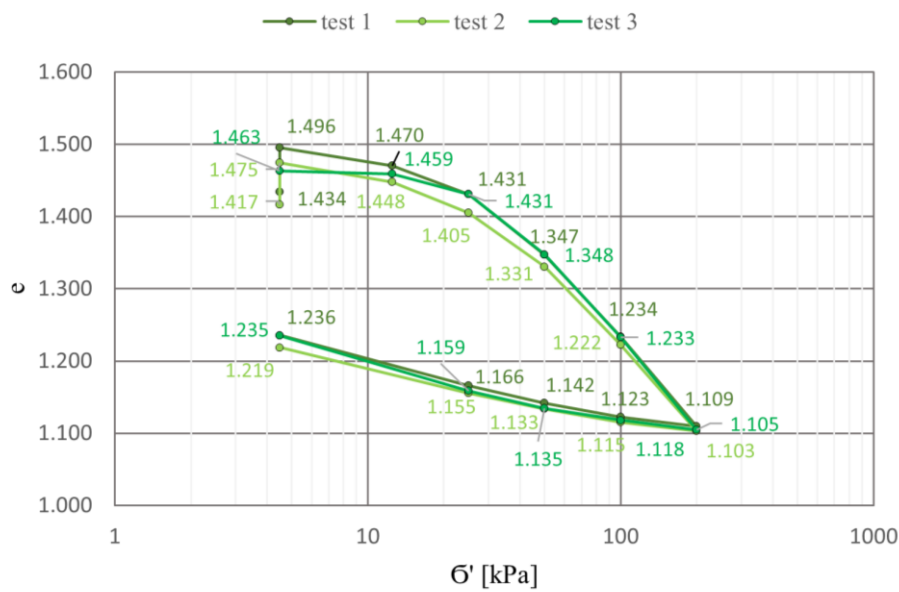
- začetna vlaga (w_i),
- začetna gostota (ρ_i),
- začetna suha gostota (ρ_{di}),
- začetni količnik por (e_i),
- začetna stopnja zasičenosti (S_{ri}),
- končna vlaga (w_k),
- končna gostota (ρ_k),
- končna suha gostota (ρ_{dk}),
- končni količnik por (e_k).

Tabela 10: Lastnosti preizkušancev, preiskanih v edometru

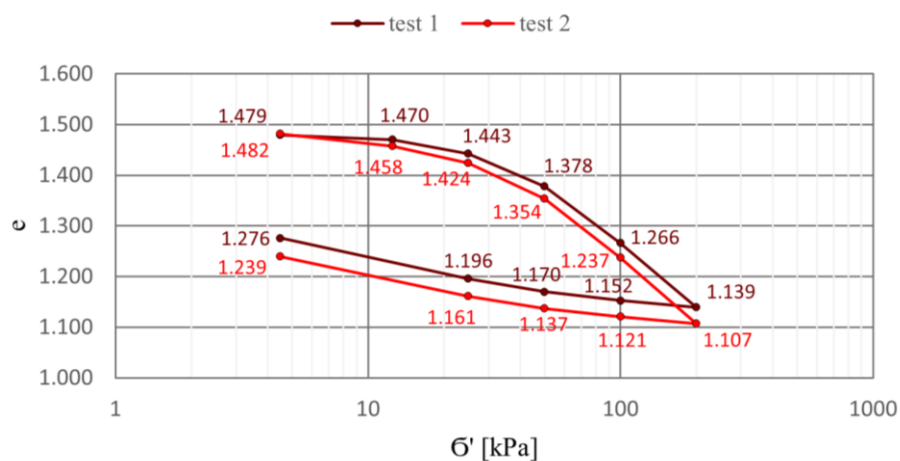
Mešanica	w_i	ρ_i	ρ_{di}	e_i	S_{ri}	w_k	ρ_k	ρ_{dk}	e_k
	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]		[%]	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	
4 m% Ca, test 1	46	1,52	1,04	1,43	82	46	1,61	1,10	1,30
4 m% Ca, test 2	45	1,46	1,01	1,49	76	48	1,65	1,11	1,27
8 m% Ca, test 1	42	1,47	1,04	1,43	73	45	1,63	1,13	1,24
8 m% Ca, test 2	41	1,47	1,04	1,42	74	44	1,66	1,15	1,19
8 m% Ca, test 3	42	1,45	1,02	1,46	72	45	1,62	1,12	1,25
4 m% Na, test 1	44	1,46	1,02	1,48	75	46	1,61	1,10	1,28
4 m% Na, test 2	43	1,45	1,01	1,48	73	45	1,56	1,08	1,34
8 m% Na, test 1	43	1,48	1,04	1,43	75	45	1,63	1,12	1,25
8 m% Na, test 2	42	1,48	1,04	1,43	75	46	1,62	1,11	1,27
Zemljina	43	1,45	1,01	1,50	73	45	1,62	1,12	1,25



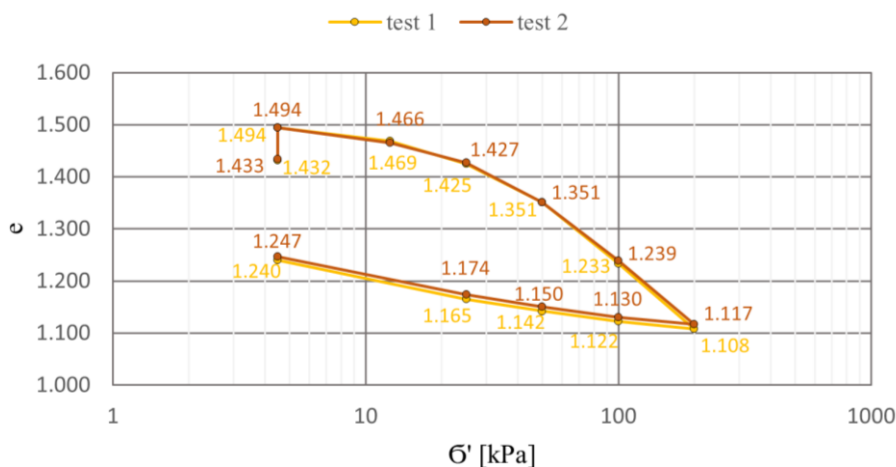
Graf 12: Krivulji stisljivosti mešanice s 4 m% bentonita Ca



Graf 13: Krivulje stisljivosti mešanice z 8 m% bentonita Ca



Graf 15: Krivulji stisljivosti mešanice s 4 m% Na bentonita

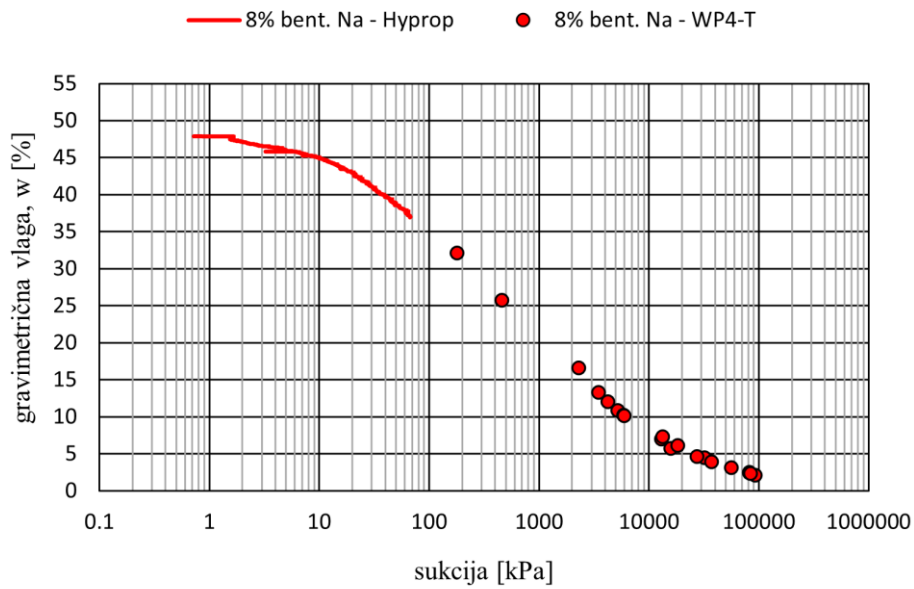


Graf 14: Krivulji stisljivosti mešanice z 8 m% Na bentonita

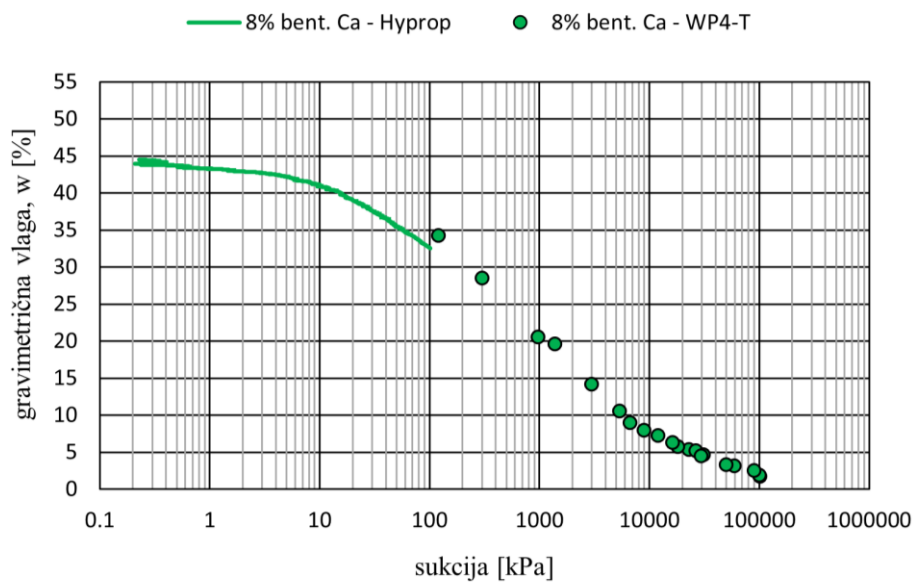
4.5 SUKCIJA

Na grafih 16, 17 in 18 so prikazane retencijske krivulje zemljine brez dodatka in preiskanih mešanic. Na abscisi je prikazana sukcija, na ordinati pa gravimetrična vlaga, ki smo jo določili s tehtanjem mase vzorcev med preizkusom in suhe mase na koncu preiskave.

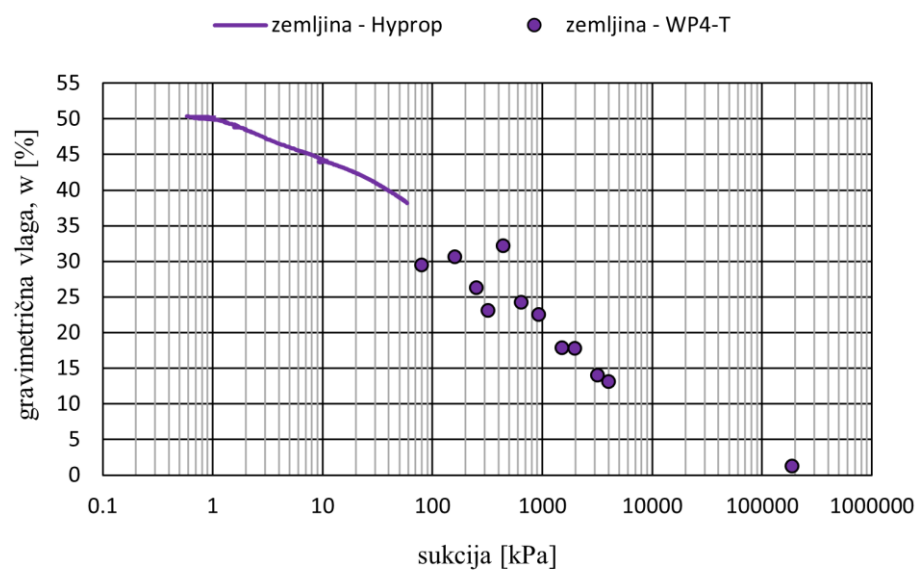
Rezultati kažejo, da točkovne meritve totalne sukcije z napravo WP4-T lepo dopolnjujejo zvezne meritve matrične sukcije z napravo Hyprop. Na podlagi rezultatov meritev tudi ugotavljamo, da v preiskanih mešanicah in zemljini brez dodatka bentonita ni prisotna osmotska sukcija.



Graf 17: Retencijska krivulja mešanice z 8 m% bentonita Na



Graf 16: Retencijska krivulja mešanice z 8 m% bentonita Ca



Graf 18: Retencijska krivulja zemljine brez dodatka

5 ANALIZA REZULTATA

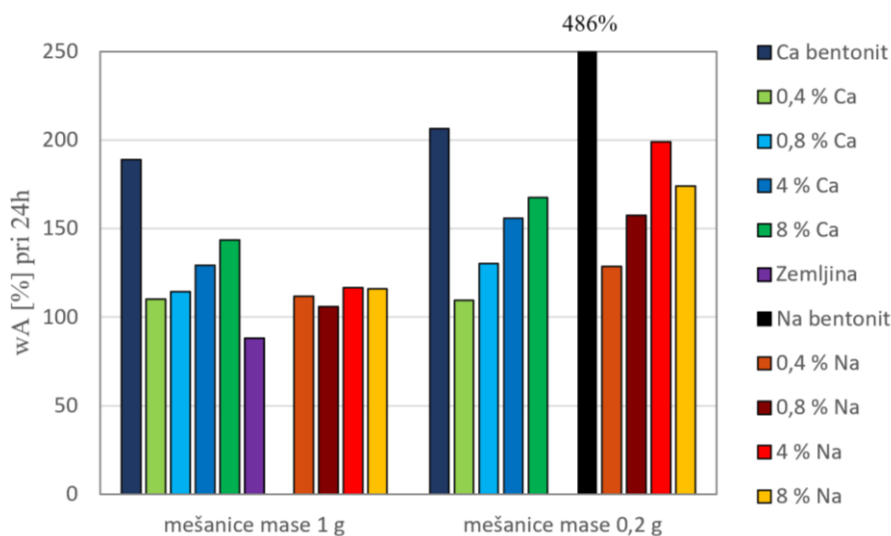
5.1 VODOVPOJNOST

Na grafu 19 je prikazana primerjava vodovpojnosti bentonita, vseh mešanic in zemljine brez dodatka, po 24 urah izpostavljenosti stiku z vodo. Razvidno je, da se je vodovpojnost zaradi dodatka bentonita povečala in da je odvisna tako od deleža kot tudi vrste dodanega bentonita. Natrijev bentonit ima pri enaki suhi masi preizkušanca (0,2 g) namreč bistveno višjo vodovpojnost (486 %) kot kalcijev bentonit (206,5 %).

Za preizkušance mase 1 g iz mešanic z natrijevim bentonitom bi, glede na visoko vodovpojnost bentonita, pričakovali višje vodovpojnosti. Te bi verjetno tudi dosegli, če bi podaljšali čas trajanja preiskave do te mere, da bi izmerili maksimalno vodovpojnost preizkušancev. Kot smo že zapisali, smo preiskave skladno s priporočili standarda prekinili po 24 urah, zato rezultati služijo za kvalitativno oceno vpliva dodatka bentonita na vodovpojnost zemljine, ne predstavljajo pa največje možne sposobnosti vpijanja vode bentonitov in mešanic.

Natrijevi bentoniti so zelo slabo prepustni za vodo, zato lahko omočena plast bentonita v stiku s porozno ploščico (in vodo) med preiskavo ustvari bariero, ki otežuje nadaljnje vpijanje vode preizkušanca. Morebitno ustvarjanje omočene cone, ki bi zavirala nadaljnje vpijanje vode bi lahko preiskali tako, da bi visok stekleni valj napolnili z bentonitom in na površino nalili vodo. Voda bi zaradi nabrekanja bentonitnega prahu prodrla le nekaj milimetrov v bentonit. Omočena površinska plast nabreklih bentonita tako preprečuje, da bi več vode vstopilo ali prešlo skozi bentonit. (Minnesota Clay Company, 2023)

Na podlagi pridobljenih rezultatov preiskav, napotkov v standardu in zapisov v literaturi ocenjujemo, da so za oceno vplivov bentonita na vodovpojnost zemljin ustrezne preiskave, ki so trajale 24 ur in je bila uporabljena začetna masa suhega preizkušanca 0,2 g.



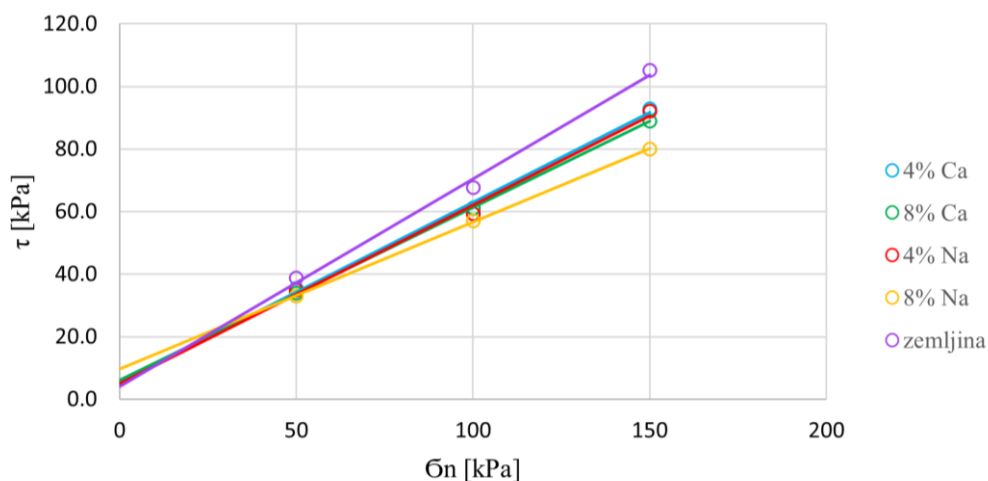
Graf 19: Vodovpojnost mešanic – čas trajanja preiskave 24 ur

5.2 DRENIRANA STRIŽNA TRDNOST

Na grafu 20 so zbrani rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti vseh mešanic zemljine in bentonita, ter zemljine brez dodatkov. Zemljina brez dodatka ima višjo strižno trdnost od preiskanih mešanic.

Zemljina z 8 m% dodanega natrijevega bentonita ima najnižji strižni kot in najvišjo kohezijo. Natrijev bentonit zaradi absorpcije vode poveča prostornino in se veže na več delcev zemljine. Ocenjujemo, da je zaradi opisanih lastnosti natrijevega bentonita, izmerjena drenirana strižna trdnost pričakovana in smiselna tudi v primerjavi z ostalimi pridobljenimi rezultati.

Znižanje drenirane strižne trdnosti zaradi dodatka bentonita ni ugodno z vidika zagotavljanja globalne stabilnosti pobočij, v primeru, da bi bile iz mešanic pripravljene debelejšje zvezne plasti izboljšane zemljine za sajenje dreves. V primeru lokalne uporabe (npr. sadilne jame...) pa znižanje drenirane strižne trdnosti nima vpliva na zagotavljanje globalne stabilnosti gozdnih tal.



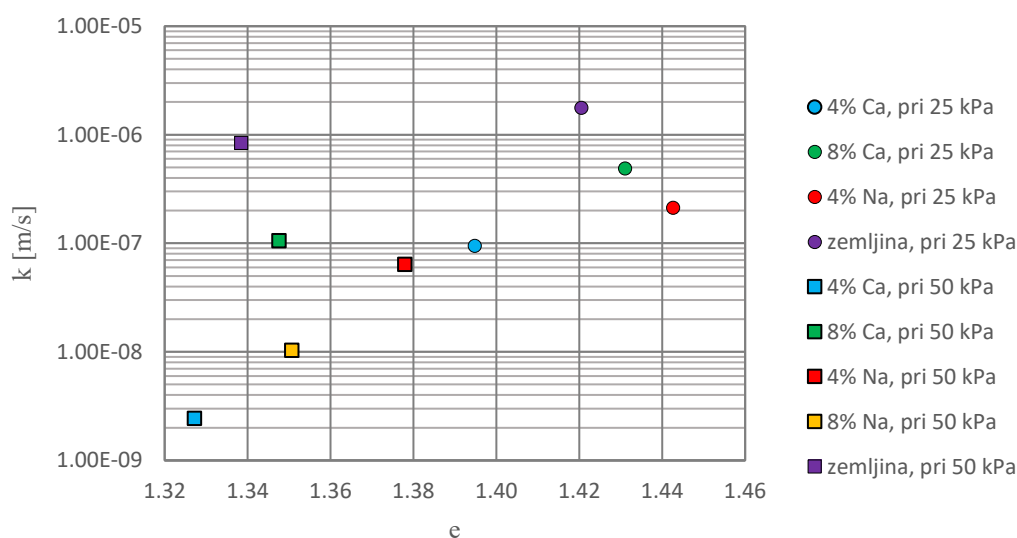
Graf 20: Rezultati preiskav drenirane strižne trdnosti mešanic in zemljine brez dodatkov

5.3 VODOPREPUSTNOST

Kot je razvidno iz grafa 21, se je vodoprepustnost zaradi dodatka bentonita zmanjšala, kar je pričakovano. Izmerjene vrednosti pa glede na količino dodatka niso vselej povsem skladne s pričakovanji. Pričakovali bi, da bo vodoprepustnost pri višjem deležu dodatka bentonita in/ali bolj aktivnem bentonitu (Na) nižja, kot pri nižjem deležu dodatka bentonita in/ali pri manj aktivnem bentonitu (Ca).

Nepričakovan raztros merjenih vrednosti (npr. pri bremenski stopnji 25 kPa ima mešanica s 4 m% bentonita Ca nižjo vodoprepustnost kot mešanica z dodatkom 8 m% Ca) lahko pripišemo morebitni neenakomerni razporeditvi por v preizkušancu (zvezne pore in praznine, ki predstavljajo prioriteto pot vode ali zaglajevanje površine preizkušanca, ki predstavlja manj prepusten sloj v preizkušancu).

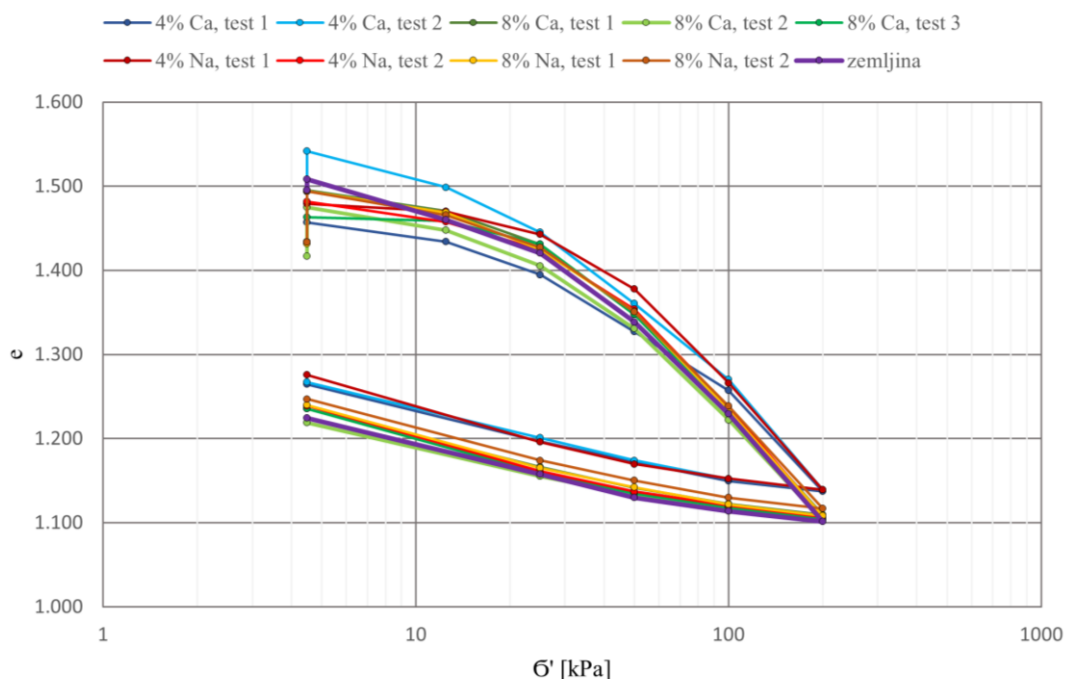
Ne glede na raztros merjenih vrednosti pa se kaže generalni upad koeficienta vodoprepustnosti mešanic z zmanjševanjem količnika por.



Graf 21: Koeficienti vodoprepustnosti pri različnih bremenskih stopnjah

5.4 STISLJIVOST

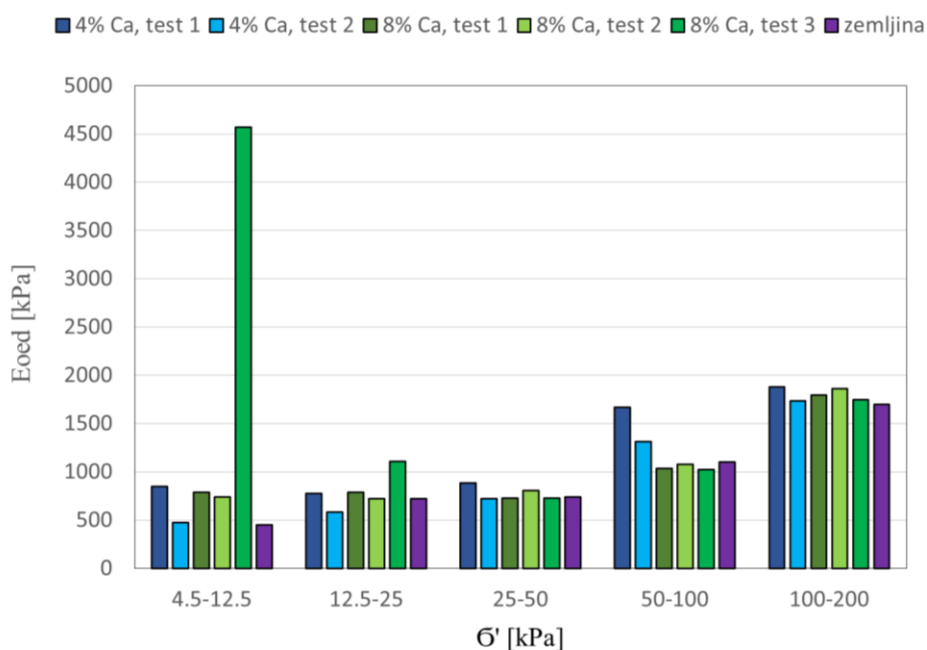
Iz primerjave krivulj stisljivosti (graf 22) je razvidno, da dodatek bentonita nima velikega vpliva na stisljivost zemljine. Po preplavitvi pri bremenski stopnji 4,5 kPa so mešanice z dodatkom bentonita nabrekale, kar je pričakovano, glede na lastnosti bentonita.



Graf 22: Krivulje stisljivosti mešanic in zemljine

Na grafih 23 in 24 je primerjava modulov stisljivosti preiskanih mešanic in zemljine brez dodatka bentonita. Rezultati kažejo, da se zaradi dodatka bentonita moduli stisljivosti niso bistveno spremenili.

Vrednosti, ki izstopajo (npr. 8 % Ca, test 3 in 4 % Na, test 1) so izmerjene na nepreplavljenem preizkušancu, saj smo preplavitev izvedli pri bremenski stopnji 12,5 kPa.



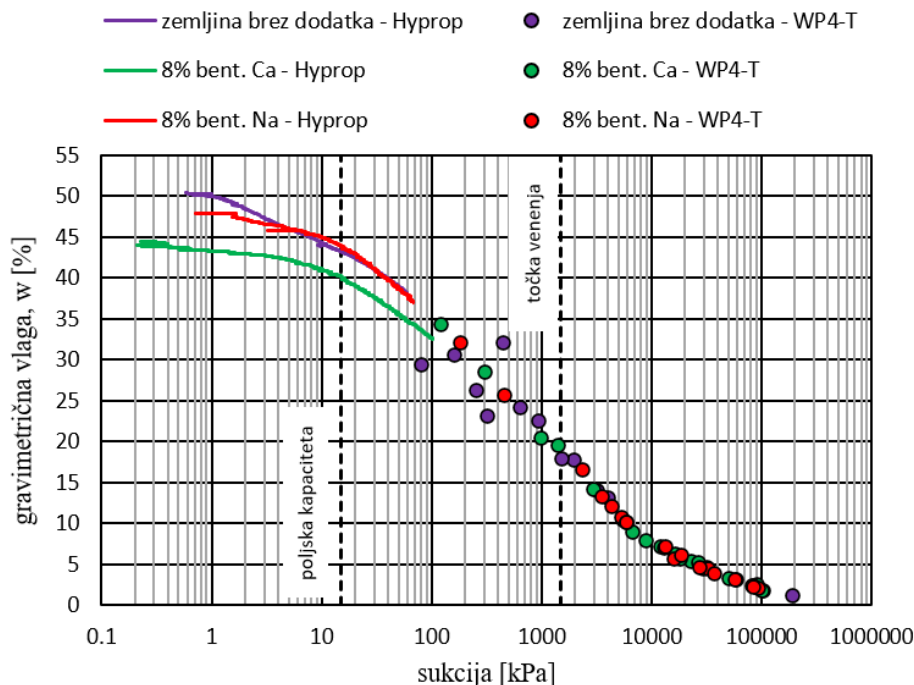
Graf 23: Moduli stisljivosti mešanic s Ca bentonitom in zemljine brez dodatkov

5.5 SUKCIJA

Na grafu 25 so prikazane retencijske krivulje preiskanih mešanic in zemljine brez dodatka bentonita. V območju sukcije med poljsko kapaciteto in točko venenja, kjer je rastlinam dostopna voda, ni prišlo do spremembe retencijske krivulje zaradi dodatka bentonita.

Ugotavljamo, da dodatek bentonita nima pomembnega vpliva na retencijsko krivuljo preiskane zemljine. Opažanja lahko pripišemo razmeroma majhnemu deležu dodanega bentonita in naravi zemljine (OH).

Bentonit bi lahko imel večji vpliv na bolj peščene zemljine ali pri večjem deležu dodatka bentonita, za kar pa bi potrebovali bolj obsežen nabor preiskav.



Graf 25: Retencijska krivulja mešanic in zemljine brez dodatka bentonita

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo preiskali vpliv dodatka bentonita na sposobnost vpijanja in zadrževanja vode, ter druge geomehanske lastnosti organske gozdne zemljine, odvzete na Ljubelju, v sklopu evropskega projekta ONEforest. Zagotavljanje ustrezne vlage tal je ključno za rast dreves in ostale vegetacije v gozdovih.

Preiskana zemljina je po USCS klasifikaciji visokoplastičen organski melj, s posameznimi zrni grušča, ostanki korenin, listja in drugega organskega drobirja. Bentonit je naravni material, ki ima visoko sposobnost vpijanja in zadrževanja vode, kar je pomembno za rast vegetacije, posebej v sušnih obdobjih. Podatki iz literature kažejo, da se bentonit lahko uporablja za izboljšanje pogojev za rast rastlin. V primerjavi z namensko razvitimi biopolimeri za izboljšanje tal, je stabilen, saj ni biološko razgradljiv.

Rezultati preiskav, izvedenih v sklopu te naloge kažejo, da dodatek bentonita poveča vodovpojnost zemljine in zmanjša njeno vodoprepustnost. Vpliv na velikost spremembe parametrov pa je odvisen tako od deleža, kot tudi od vrste dodanega bentonita. Zaradi dodatka bentonita se pričakovano nekoliko zniža drenirana strižna trdnost zemljine, stisljivost in sukcija pa se bistveno ne spremenita.

Ocenjujemo, da dodatek bentonita ugodno vpliva na lastnosti tal, potrebnih za rast dreves in druge vegetacije. V primeru, da bi se izboljšana zemljina uporabila le lokalno v sadilnih jamah dreves tudi ne bi bilo negativnega vpliva na globalno stabilnost pobočij, kot posledica nekoliko nižje drenirane strižne trdnosti mešanic.

Glede na postopek proizvodnje je uporabljen kalcijev bentonit bolj primeren dodatek k zemljinam, saj je kemijsko bolj stabilen kot natrijev bentonit. Natrijev bentonit, ki smo ga uporabljali pri pripravi mešanic, je aktiviran z natrijevim karbonatom (Na_2CO_3) in je podvržen vplivom apnenca (posebej sadre), topnega Ca, organskih snovi ali kislih snovi, ki ga lahko deaktivirajo.

Dodatek bentonita k organski gozdni zemljini kaže obetajoče učinke na zadrževanje vode v tleh, že v relativno majhnih odmerkih. Zadrževanje vode omogoča rastlinam rast in razvoj ter s tem rastline lahko zagotavljajo tudi odpornost proti površinski eroziji tal.

Kot smo pokazali pri pregledu literature, so lastnosti bentonitov različne, prav tako so različne lastnosti zemljin. Rezultati laboratorijskih preiskav, pridobljeni pri tej diplomski nalogi so zato veljavni samo za materiale, ki smo jih uporabljali.

Menimo, da je z raziskavami možnosti uporabe bentonita za izboljšanje zemljin vredno nadaljevati, saj je bentonit ekonomičen in dostopen material. V primerjavi z biopolimeri, ki po določenem času izgubijo svoje prvotne lastnosti, je bentonit obstojen in ni biološko razgradljiv. Z nadaljnjimi in bolj obsežnimi raziskavami bi veljalo natančno raziskati vplive različnih tipov in količin dodanega bentonita na sukcijo, zmanjšanje dovzetnosti za površinsko erozijo in pristopiti tudi k primerjavi lastnosti gozdnih tal, izboljšanih z biopolimeri in z bentonitom.

7 VIRI

- Bellil, S., Abbeche, K., Bahloul, O. 2018. Treatment of a collapsible soil using a bentonite-cement mixture. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2018; 40(4): 233–243 *Journal xyz* 2017; 1 (2): 122–135. <https://doi.org/10.2478/sgem-2018-0042>
- Bentoproduct. 2023. Sektor za proizvodnjo i tehnologiju. Potvrda analize. Šipovo, Bentoproduct: 1 str.
- Bentoproduct. 2022. Bentoproseal-A. Technical data sheet: 1 str.
- Bentoproduct. 2022. Bentoproseal-Ca-S. Technical data sheet: 1 str.
- Cordis. 2022. A Multi-Criteria Decision Support System For A Common Forest Management to Strengthen Forest Resilience, Harmonise Stakeholder Interests and Ensure Sustainable Wood Flows. Objavljeno 27. 4. 2022. <https://cordis.europa.eu/project/id/101000406>
- Decagon Devices, Inc. 2003. Operator's Manual: WP4 Dewpoint PotentiaMeter: 83 f.
- Domitrović, D. 2012. Utjecaj bubrenja bentonitne gline na njezina mehanička svojstva. Doktorska disertacija. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. (samozaložba D. Domitrović).
- Inglethorpe, S. D. J., Morgan, D. J., Highley, D. E. et al. 1993. Industrial Minerals Laboratory Manual: Bentonite. BGS Techincal Report WG/93/20: 125 f.
- Izveštaj o ispitivanju: granice tečenja i granice plastičnosti. 2015. Delovni nalog št. 15-007. Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: 1 str.
- Izveštaj o ispitivanju: kapaciteta upijanja vode. 2015. Delovni nalog št. 15-007. Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet: 3 str.
- Johannesson, L. E., Sandén, T., Dueck, A., Ohlsson, L. 2010. Characterization of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF. Baclo Projekt - Phase 3. Laboratory tests.
- Kiviranta, L. and Kumpulainen, S. 2011. Quality control and characterization of bentonite materials. No. POSIVA-WR--11-84.
- Kumar, K. S., Reddy, L. S., Reddy, Y. S., Babu, K. S., Kumari, S. P. 2018. Stabilization of Sand With Bentonite Clay. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, ISSN:2349-5162, Vol.5, Issue 5, page no. pp271-274, May-2018.
- Labcell Ltd. 2023. HYPROP. <https://www.labcell.com/environmental/soils/hyprop-moisture-release-system/hyprop> (pridobljeno 29. 05. 2023)
- Maček, M. 2006. Sukcija zemljin. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Maček).
- Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., Liu, J. 2020. Effect of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, and millet photosynthesis and grain quality. *Sci Rep* 10, 18282 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75350-9>

Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., Ma, B., Liu, J. 2017. Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.009>

Minesota Clay Company. 2023. Bentonite, Product Information.
<https://www.mnclay.com/AddToCart2.aspx?ProductGroup=BENT> (pridobljeno 12. 06. 2023)

Muhammad, N., Siddiqua, S. 2022. Calcium bentonite vs sodium bentonite: The potential of calcium bentonite for soil foundation. Materials Today: Proceedings, Volume 48, Part 4, Pages 822-827.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.386>.

ONEforest. 2022. Biodegradable Materials As Soil Conditioner to Favour Plant Growth. Objavljeno 26. 1. 2022.
<https://www.oneforest.eu/content/biodegradable-materials-soil-conditioner-favour-plant-growth>

ONEforest. 2020. Pilot Sites.
<https://www.oneforest.eu/content/pilot-sites> (pridobljeno 29. 05. 2023)

Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B. 2009. A laboratory characterization of soils and clay-bearing rocks using the Enslin-Neff water-adsorption test. Acta geotechnica Slovenica. Vol. 6, no. 2, p. 4–13.

Poročilo št. 489/20-710-5 o rezultatih laboratorijskih preiskav bentonita BENTOPROSEAL-A. 2021. Ljubljana, Zavod za gradbeništvo: 3 str.

Qin, Y., Xu, D., Lalit, B. 2021. Effect of Bentonite Content and Hydration Time on Mechanical Properties of Sand–Bentonite Mixture. Appl. Sci. 2021, 11, 12001.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/24/12001>

Shourijeh, P. T., Soroush, A., Daneshi-Sadr, A. H. 2020. The effects of lime, bentonite and nano-clay on erosion characteristics of clay soils. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 26:9, 3762-3787.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1818629>

Starbek, F. 2008. Vpliv apna na volumsko stabilnost zemljin v spodnjem ustroju cest. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba F. Starbek).

Swain, K., 2015. Stabilization of soil using geopolymers and biopolymers. Magistrsko delo. Rourkela, National Institute of Technology, Department of Civil Engineering (samozaložba K. Swain).

Taytak, B., Pulat, H. F., & Yukselen-Aksoy, Y. 2012. Improvement of engineering properties of soils by biopolymer additives. 3rd international conference on new developments in soil mechanics and geotechnical engineering (pp. 28-30).

Texas Sodium Bentonite, Inc. 2012. Soil analysis.
<http://www.texassodiumbentonite.com/storm.cfm?funnelaction=253> (pridobljeno 22. 05. 2023)

Tiwari, B. 2008. Constant Head and Falling Head Permeability Test. Fullerton, Civil and Environmental Engineering Department, California State University: 8 f.

UL FGG. 2023. ONEforest – Večkriterijski sistem podpore odločanju za skupno gospodarjenje z gozdovi za krepitev odpornosti gozdov, uskladitev interesov zainteresiranih strani in zagotavljanje trajnostnih tokov lesa.

<https://www.fgg.uni-lj.si/raziskovalna-dejavnost/projekti/101000406-oneforest-multi-criteria-decision-support-system-for-a-common-forest-management-to-strengthen-forest-resilience-harmonise-stakeholder-interests-and-ensure-sustainable-wood-flows/> (pridobljeno 20. 05. 2023).

Standardi:

ASTM D6836. Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge.

DIN 18132:2012-04. Soil, testing procedures and testing equipment - Determination of water absorption.

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-1:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 1. del: Ugotavljanje vlažnosti (ISO/TS 17892-1:2004).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-3:2016. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 3. del: Ugotavljanje gostote zrn (ISO 17892-3:2015).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-5:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 5. del: Edometriški preskus s postopnim obremenjevanjem (ISO/TS 17892-5:2004).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-10:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 10. del: Neposredni strižni preskus (ISO/TS 17892-10:2004).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-11:2019. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 11. del: Ugotavljanje prepustnosti (ISO 17892-11:2019).

SIST-TS CEN ISO/TS 17892-12:2018. Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 12. del: Ugotavljanje meje tekočine in plastičnosti (ISO 17892-12:2018).