

# Poboljšanje tla primjenom šljunčanih pilota

---

Hančić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:539224>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

LUKA HANČIĆ

**POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20. 09. 2021. u 9 a  
Obranu ovog ruda kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06. 09. 2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Sanja Korac

**Članovi povjerenstva**

- 1) Izv. prof. dr. sc. Krešimir Kauder
- 2) Prof. dr. sc. Stjepan Strelac
- 3) Izv. prof. dr. sc. Boris Kavur

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA**

Kandidat:

LUKA HANČIĆ univ. bacc. ing. amb.

*Luka Hančić*

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. KREŠO IVANDIĆ

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: LUKA HANČIĆ  
Matični broj: 258 - 2019./2020.  
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Općenito o tlu
3. Šljunčani piloti (vibro zamjena, vibro replacement)
4. Poboljšanje tla primjenom šljunčanih pilota za potrebe gradnje uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Virovitica
5. Zaključak
6. Literatura
7. Popis slika
8. Popis tablica
9. Prilozi

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 09.03.2021.


Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv. prof. dr.sc. Kreše Ivandića.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 27.8.2021.

LUKA HANČIĆ

(Ime i prezime)

Luka Hančić

(Vlastoručni potpis)

## IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 27.8.2021.

Izv. prof. dr. sc.  
KREŠO IVANDIĆ  
(Mentor)

  
(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

Tema diplomskog rada je poboljšanje tla korištenjem šljunčanih pilota. U radu su objašnjeni osnovni pojmovi vezani za ponašanje tla, šljunčani piloti te je prikazan projekt sanacije tla u mjestu Virovitica. Cilj metode je da se slabo nosivo tlo zamijeni kamenim materijalom i tako poveća nosivost, smanji ukupno i diferencijalno slijeganje te ubrza konsolidacija. U praktičnom dijelu rada prikazani su rezultati istražnih radova, rezultati proračuna vezanih za nosivosti šljunčanih pilota i procjenu slijeganja s ciljem smanjenja slijeganja i povećanja nosivosti problematičnog tla.

### KLJUČNE RIJEČI

slijeganje, čvrstoća, teorija jednodimenzionalne konsolidacije, šljunčani piloti, stupanj poboljšanja



## **ABSTRACT**

The topic of the graduate thesis is soil improvement using stone columns. The paper presents basic concepts related to soil behaviour, stone columns and the project of soil improvement in Virovitica. The aim of the method is to replace low bearing capacity soil with a stone material and thus increase its bearing capacity, to reduce the total and differential settlement and to accelerate consolidation. The practical part of the paper presents results of field research as well as results of calculations related to the bearing capacity of stone columns and settlement assessment with the aim of reducing settlement and increasing bearing capacity of problematic soil.

## **KEY WORDS**

settlement, strength, one-dimensional consolidation theory, stone columns, improvement factor

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O TLU.....	2
2.1. Slijeganje tla.....	2
2.2. Konsolidacija tla.....	3
2.2.1. Teorija jednodimenzionalne konsolidacije.....	4
2.3. Čvrstoća tla.....	7
3. ŠLJUNČANI PILOTI (Vibro zamjena, eng. Vibro Replacement).....	8
3.1. Izvedba šljunčanih pilota.....	8
3.2. Osnovne proračuna šljunčanih pilota.....	10
3.2.1. Koncept jediničnih ćelija.....	11
3.2.2. Koeficijent zamjene tla.....	12
3.3. Proračun šljunčanih pilota prema Priebeu.....	12
3.3.1. Stupanj poboljšanja tla.....	13
3.3.2. Parametri čvrstoće kompozita pilot-tlo.....	13
3.3.3. Osnovni stupanj poboljšanja tla.....	14
3.3.4. Korekcija vezana za stišljivost pilota.....	14
3.3.5. Korekcija vezana za dubinu pilota.....	15
4. POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA ZA POTREBE GRADNJE UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA VIROVITICA.....	17
4.1. Geotehnički istražni radovi.....	17
4.1.1. Podzemna voda.....	18
4.2. Geostatički proračuni.....	19
4.2.1. Analiza opterećenja.....	19
4.2.2. Proračun nosivosti šljunčanih pilota.....	20
4.2.3. Proračun stupnja poboljšanja tla Priebeovom metodom.....	24
4.2.4. Proračun slijeganja korištenjem računalnog programa Settle 3D, Rocscience.....	32
5. ZAKLJUČAK.....	45
6. LITERATURA.....	46
7. POPIS SLIKA.....	47
8. POPIS TABLICA.....	48
9. PRILOZI.....	49

# 1. UVOD

Šljunčani piloti predstavljaju dubinsku metodu poboljšanja tla. Slična je metodi vibro zbijanje. Ovisno o vrsti tla koristi se jedna od metoda, vibro zbijanje pretežito kod nekoherentnih tla s malim udjelom finih čestica dok je vibro zamjena pogodna kod koherentnih materijala. Princip metode je da se slabo nosivo tlo zamijeni kamenim materijalom te tako poveća nosivost, smanji ukupno i diferencijalno te ubrza konsolidacija. Izvedba šljunčanih pilota sastoji se vibratora koji se utiskuje u tlo. Ovisno o vrsti ugradnje koristi se i vibrator određenog tipa. Vrsta ugradnje dijeli se na mokru ugradnju s vrha i suhu ugradnju s dna. Mokra ugradnja s vrha koristi težinu i vibracije samog vibratora zajedno s mlazom vode za penetraciju u tlo. Dolaskom do projektirane dubine vibrator se postepeno diže kako bi kameni materijal popunio prazan prostor. Suha ugradnja s dna koristi se tako da se vibrator utiskuje to projektirane dubine. Dolaskom do projektirane dubine, pomoću posebnog kanala na vibratoru dovodi se kameni materijal koji se potom zbija.

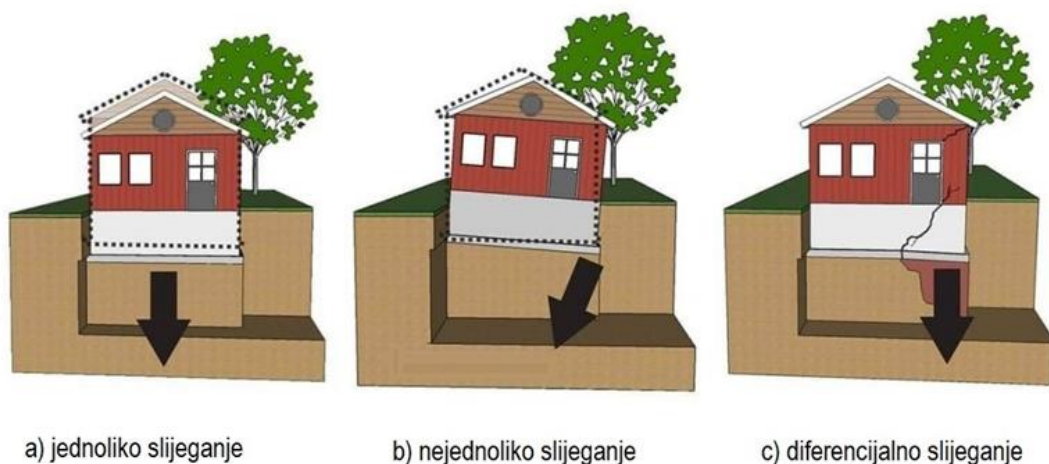
Lokacija izvedbe pilota predstavljena u radu je Virovitica gdje je planirana izrada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Tlo na lokaciji budućeg uređaja za pročišćavanje otpadnih voda je problematično radi nedovoljnih vrijednosti deformacijskih modula s obzirom na zahtjeve maksimalnih dopuštenih vrijednosti slijeganja, odnosno nosivosti temeljnog tla ispod predmetnih objekata. Kako bi se osigurala veća nosivost slabo nosivih slojeva tla, smanjilo ukupno slijeganje i svelo na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti izvedeno je poboljšanje tla ugradnjom šljunčanih pilota ojačanih cementom.

Prvi dio rada odnosi se na općenit opis slijeganja, konsolidacije i čvrstoće tla. Drugi dio je posvećen opisu, primjeni i izvedbi šljunčanih pilota, primjene šljunčanih pilota kod sanacije temeljnog tla u Virovitici te zaključku koji zaokružuje cijeli rad.

## 2. OPĆENITO O TLU

### 2.1. Slijeganje tla

Svako tlo u prirodi se nalazi u određenom stanju koje je posljedica vlastite težine, te ostalih relevantnih okolnosti (vlažnosti, zbijenosti i dr.). Uz vlastitu težinu, neka su tla bila pod dodatnim opterećenjima (veća opterećenja nego danas) i takva tla se nazivaju prekonsolidirana tla. Ona tla koja nisu nikada bila pod opterećenjem većim nego danas nazivamo normalno konsolidirana tla. Dodatnim opterećenjem dolazi do stvaranja deformacija tla koja se nazivaju slijeganje. Slijeganje predstavlja vertikalni pomak tla uzrokovan promjenom opterećenja. Konačnu vrijednost slijeganja na nekoj inženjerskoj zadaći nije lako utvrditi, jer ona ovisi o nizu kompleksnih parametara pa se zbog toga pod pojmom slijeganje uglavnom podrazumijeva procjena njezine vrijednosti. Prema vrsti slijeganja s obzirom na utjecaj na gornju konstrukciju razlikuje se jednoliko, nejednoliko i diferencijalno slijeganje (Slika 1). Najvažniji tip slijeganja koji se promatra pri analizi je diferencijalno slijeganje (razlika slijeganja dviju točaka temeljne konstrukcije), jer uslijed neprihvatljivo velikih vrijednosti može doći do narušavanja postojanosti temelja i građevine (lom).



Slika 1. Vrste slijeganja ([https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible\\_settlement\\_of\\_the\\_foundation](https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible_settlement_of_the_foundation), 2021.)

Ovisno o brzini slijevanja, razlikujemo trenutno slijevanje, konsolidacijsko slijevanje i sekundarno konsolidacijsko slijevanje. Trenutno slijevanje predstavlja ono koje prati promjene opterećenja (dešava se po trenutku nanošenja opterećenja), konsolidacijsko predstavlja ono koje nastaje deformacijom tla zbog istjecanja vode i zraka iz pora tla te sekundarno konsolidacijsko koje nastaje puzanjem tla, a bez promjene efektivnih napreznja. U krupnozrnatim materijalima neovisno o stupnju saturacije slijevanje je trenutno, jer odmah po nanošenju opterećenja, dolazi do slijevanja u punom iznosu dok se u sitnozrnatim materijalima govori o konsolidaciji (više u poglavlju 2.2.).

Analiza slijevanja provodi se kako bi se osigurala stabilnost, izgled i upotrebljivost građevine. Ovisno o namjeni građevine definirano je dopušteno slijevanje koje ovisi o tipu, dimenzijama i položaju građevine, vrsti podtemeljnog tla te uzroku, procjeni, porijeklu i izvoru slijevanja. Prema teoriji elastičnosti izraz za procjenu slijevanja pojedinog sloja koji se u većini metoda koristi glasi:

$$\Delta s = \frac{\Delta \sigma_V}{E} * \Delta z \quad (1.)$$

dok je ukupno slijevanje:

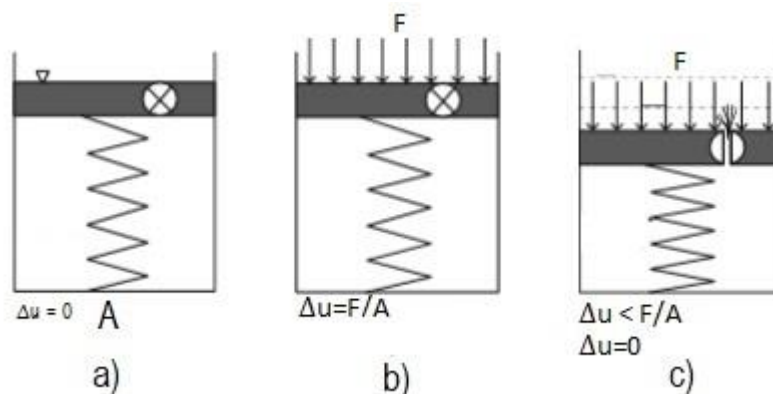
$$s = \sum \Delta s \quad (2.)$$

gdje je  $\Delta s$  slijevanje pojedinog sloja,  $\Delta \sigma_V$  dodatno vertikalno napreznje,  $E$  Young-ov modul elastičnosti i  $\Delta z$  debljina sloja.

## 2.2. Konsolidacija tla

Kako postoji velika razlika kod slijevanja krupno zrnatih i sitnozrnatih materijala te je za krupno zrnata jednostavnije predvidjeti samo slijevanje i brzinu slijevanja, konsolidaciju je vrlo bitno procijeniti zbog ponašanja građevina temeljenih na sitno zrnatom tlu. Kako je slijevanje tla je proces pri kojem uslijed promjene napreznja dolazi do premještanja čestica i smanjenja zapremine pora u tlu, tako kada su sve šupljine u tlu ispunjene vodom (potpuno zasićeno tlo,  $S_r = 1$ ) proces slijevanja tla vezan je za proces istjecanja vode iz tla i naziva se konsolidacija tla. Slika 2 prikazuje ilustraciju konsolidacije tla (tzv. model opruge). Na slici a prikazana je posuda koja predstavlja određeni volumen tla površine  $A$ . Posuda se sastoji od klipa s ventilom koji će oponaša dodatno opterećenje, opruge kao

skelet tla i vode koja predstavlja poru vodu. Sve pore promatranog volumena tla su ispunjene vodom te se može reći da je tlo potpuno saturirano. Kako nema nikakvog dodatnog pritiska na klip nema ni promjene početnog poreznog tlaka ( $\Delta u = 0$ ). Na slici b ventil je zatvoren dok se klip opterećuje opterećenjem  $F$ . Kako je ventil zatvoren, voda ne može isticati iz posude pa nema nikakvih deformacija opruge dok vanjsko opterećenje preuzima voda (porast poreznog tlaka za iznos  $\Delta u = F/A$ ). Kada se ventil otvori (slika c) voda kreće isticati iz posude. Tlak vode u posudi postupno se smanjuje ( $\Delta u < F/A$ ) dok opruga preuzima isti dio vanjskog opterećenja. Dolazi do slijeganja opruge i traje dok voda ne prestane isticati iz posude. U trenutku kad isticke sva voda ( $\Delta u = 0$ ), opruga preuzima ukupno vanjsko opterećenje te se više ne miče. Slijeganje opruge jednako je količini istisnute vode.



Slika 2. Ilustracija konsolidacije tla

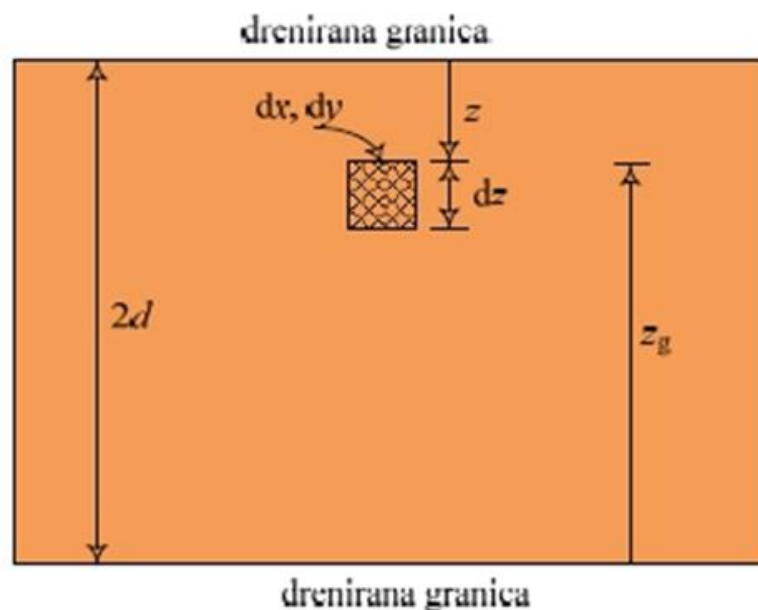
### 2.2.1. Teorija jednodimenzionalne konsolidacije

Teoriju jednodimenzionalne zadaće vremenskog toka slijeganja tla prezentirao je Terzaghi. Prema njegovoj teoriji proces konsolidacije podijeljen je na primarni i sekundarni. Prema analitičkom rješenju potrebno je riješiti diferencijalne jednadžbe koje trebaju zadovoljiti rubne uvjete. U tlu se često dogodi situacija da se sloj manje propusnosti nalazi između dva sloja veće propusnosti. U slučaju gradnje građevine na takvom tlu dodatno opterećenje izazvati će porast poreznog tlaka i proces konsolidacije u slabo propusnom sloju. U takvim uvjetima dolazi do tečenja vode iz sloja manje propusnosti prema rubovima, slojevima veće propusnosti. Ako se pretpostavi da je prevladavajući u smjeru osi  $z$  (prema dolje

i prema gore) tada se govori o jednodimenzionalnoj konsolidaciji. Za potrebe teorije uvedene su određene pretpostavke:

- tlo je homogeno, izotropno i saturirano,
- voda i čestice tla su nestišljivi,
- vrijedi Darchyev zakon,
- tečenje vode i deformacije su jedino u vertikalnom smjeru,
- koef. propusnosti i modul promjene volumena ostaju konstantni tijekom konsolidacije,
- postoji određeni odnos između koef. pora i efektivnog naprezanja.

Promatra se element tla dimenzija  $dx$ ,  $dy$  i  $dz$  na dubini  $z$  određene debljine tla  $2d$  (Slika 3).  $D$  označava najdulji put dreniranja vode iz tla, ako su obje horizontalne granice tla drenirane, onda je  $d$  jednak polovini debljine sloja tla, a ako je donja granica drenirana, onda je  $d$  jednak debljini sloja tla.



Slika 3. Element tla u sloju debljine  $2d$  (Nossan-Szavtis, 2010.)

Kod jednolikog opterećenja površine tla  $\Delta\sigma$ , početna raspodjela viška tlaka vode je  $u_e = \Delta\sigma$  dok je općenito  $u_e(z, 0) = u_0(z)$  gdje je  $u_e$  višak poreznog tlaka a  $u_0$  početni porezni tlak. Uzevši u obzir pretpostavke predstavljena je diferencijalna jednadžba jednodimenzionalne konsolidacije kao:

$$c_V \frac{\delta^2 u_e}{\delta z^2} = \frac{\delta u_e}{\delta t} \quad (3.)$$

$$c_V = \frac{k}{\rho_W * g * m_V}, \quad (4.)$$

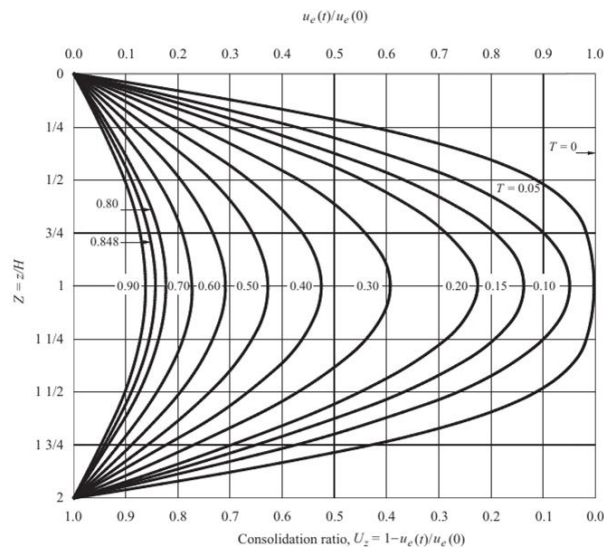
gdje je  $c_V$  koeficijent konsolidacije. Da bi se došlo do rješenja diferencijalne jednačbe potrebno je odrediti početne i rubne uvjete:

- početni uvjeti:  $u_e(z, 0) = u_0(z)$  za  $0 \leq z \leq 2d$ ,  $t = 0$ ,
- rubni uvjeti:  $u_e(0, t) = 0$  i  $u_e(2d, t) = 0$ ,  $t > 0$ .

Uvođenjem supstitucije  $M = \pi/2(2m+1)$  i  $n = 2m+1$  te bezdimenzionalnog vremenskog faktora  $T_V = \frac{c_V * t}{d^2}$  prvotna Teraghijeva jednačba pojednostavljuje se na:

$$u_e(z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \left( \sin \frac{MZ}{d} \right) e^{(-M^2 * T_V)}. \quad (5.)$$

Rješenje jednačbe daje krivulje zvane izokrone koje za dano vrijeme  $t$ , prikazuju raspodjelu viška tlaka vode  $u_e(z, t)$  (ili ukupnog tlaka vode) po visini sloja (Slika 4).



Slika 4. Raspodjela purnog tlaka  $u$  u vremenu  
[\(https://lebrary.net/135633/engineering/terzaghi\\_consolidation\\_theory/\)](https://lebrary.net/135633/engineering/terzaghi_consolidation_theory/)

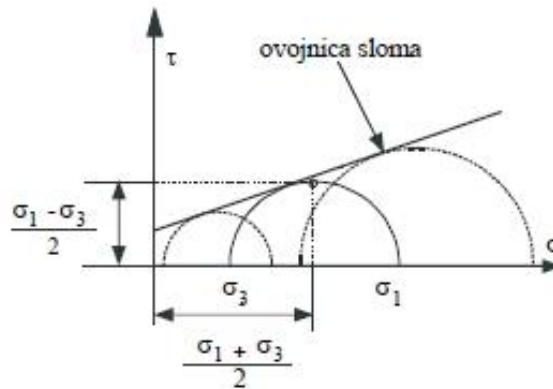
Uvedenim bezdimenzionalnim faktorom moguće je odrediti postotak ukupnog slijeganja ( $U =$  prosječni stupanj konsolidacije) koje će se ostvariti u vremenu  $T_V$  prema:

- $U < 0,6 \Rightarrow T_V = \frac{\pi}{4} U^2$ ,
- $U = 0,6 \Rightarrow T_V = 0,286$ ,
- $U > 0,6 \Rightarrow T_V = -0,933 \log(1 - U) - 0,085$ .



### 2.3. Čvrstoća tla

Čvrstoća tla podrazumijeva čvrstoću tla na smicanje koja predstavlja vrijednost posmičnog naprezanja pri lomu. Općenito se može mehanizam smicanja promatrati primjenjujući Mohrovu teoriju stanja naprezanja u ravnini (Slika 5).



Slika 5. Mohrove kružnice naprezanja

Prema Coulombovom zakonu lom je određen kao funkcija kohezije i kuta unutarnjeg trenja:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi, \quad (6.)$$

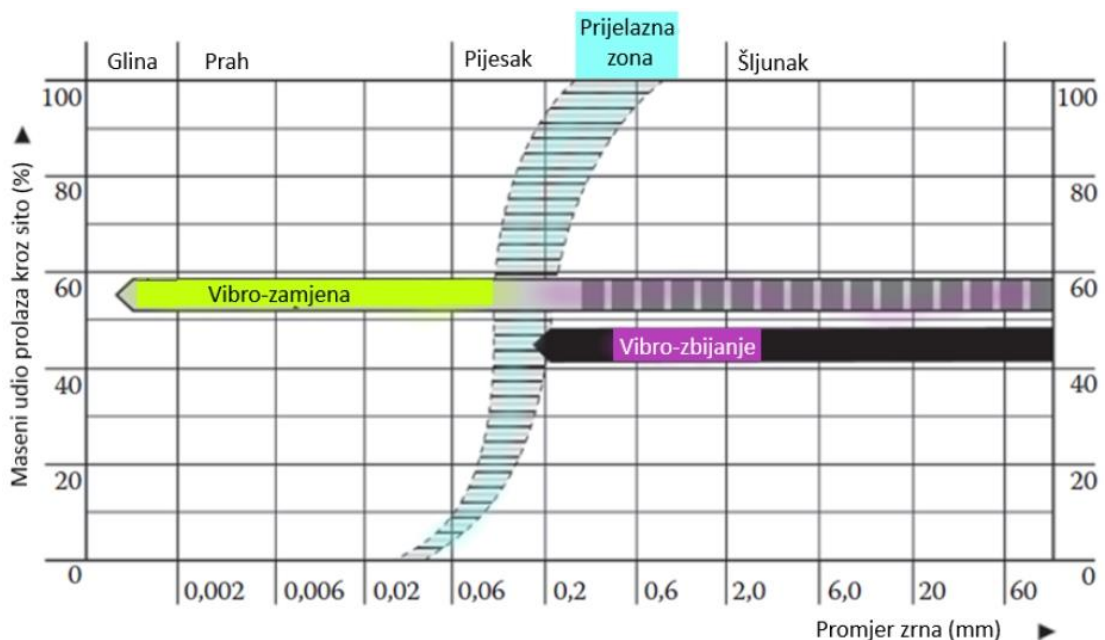
gdje je  $\tau$  posmična čvrstoća,  $c$  kohezija,  $\sigma$  naprezanje okomito na plohu sloma i  $\varphi$  kut unutarnjeg trenja koji se nazivaju parametri čvrstoće. Parametri čvrstoće nisu konstante nego ovise o vrsti materijala, stanju materijala, veličini naprezanja te načinu i brzini nanošenja opterećenja.

Do sloma u tlu dolazi kada Mohr-ova kružnica naprezanja dodirne anvelopu sloma. Anvelopa sloma određena je s dva spomenuta parametra čvrstoće koji se nazivaju kohezija i kut unutarnjeg trenja. Kut trenja je otpor materijala klizanju dok tangens kuta unutarnjeg trenja je gradijent anvelope sloma. Kut trenja karakterističan je za sve materijale tla, manji je za sitnozrnata i veći za krupnozrnata tla.

Kohezija predstavlja elektrokemijske sile među česticama, drugim riječima otpor tla smicanju u slučaju kada su normalna naprezanja jednaka nuli. Ovisi o veličini čestica, mineraloškom sastavu, vlažnosti, koeficijent pora i elektrokemijskom sastavu porne vode. Karakteristična je za sitno zrnata tla dok je za krupnozrnata tla jednaka nuli.

### 3. ŠLJUNČANI PILOTI (Vibro zamjena, eng. Vibro Replacement)

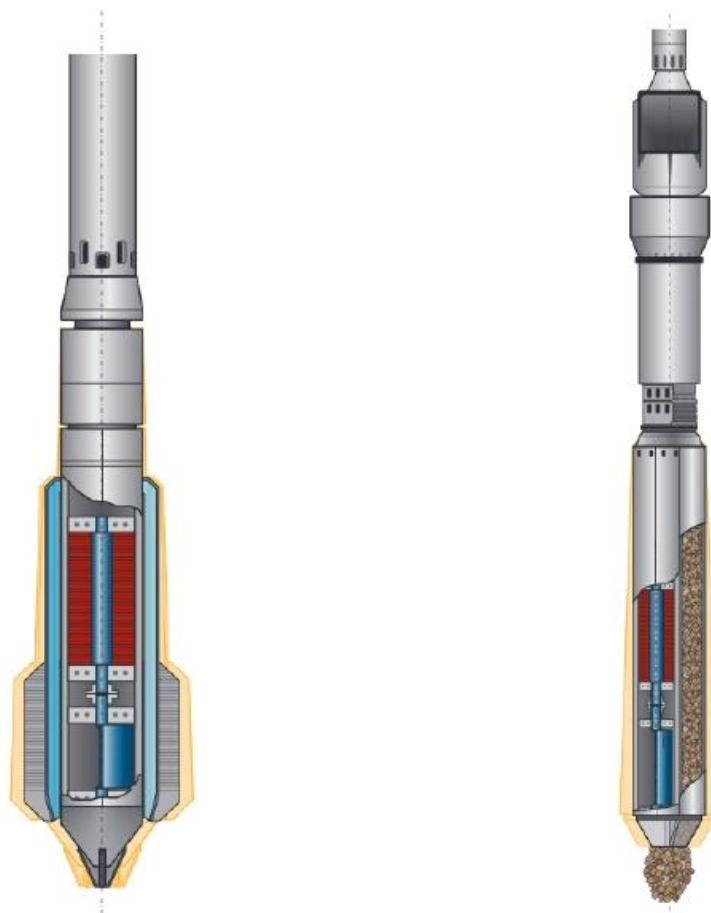
Šljunčani piloti predstavljaju jednu od dubinskih metoda poboljšanja tla. Kod primjene koristi se tzv. vibrator koji se utiskuje u tlo. Uz vibro zamjenu, vibrator koristi još i metoda zvana vibro zbijanje. Vibro zbijanje pogodno je kod nekoherentnih tla s malim udjelom finih čestica dok je vibro zamjena pogodna kod koherentnih materijala i nekoherentnih materijala s udjelom finih čestica  $< 10\%$ . Razlog tome je nemogućnost razdvajanja čestica tla pomoću vibracija proizvedenih vibratorom zbog sila kohezije. Na slici 6 prikazana je primjena određene metode u ovisnosti o vrsti tla.



Slika 6. Primjena određene metode u ovisnosti o vrsti tla (prema Khalilpasha i Sayar, 2012.).

#### 3.1. Izvedba šljunčanih pilota

Izvedba šljunčanih pilota kreće spuštanjem vibratora u tlo do projektirane dubine (obično od 4 do 10 m, u nekim slučajevima i do 30 m). Vibrator se sastoji od ekscentričnog utega i električnog motora gdje rotacijom utega nastaju horizontalne sile tj. vibracije kojima vibrator okolno tlo razmiče i zbjija. Dolaskom do projektirane dubine kreće se sa usipavanjem i zbijanjem kamenog materijala (šljunak ili drobljenac). Najčešće vrste ugradnje su mokra ugradnja s vrha i suha ugradnja s dna dok postoje još neke rjeđe korištene varijacije ove dvije metode. Ovisno o vrsti ugradnje, koristi se i određeni tip vibratora (Slika 7).

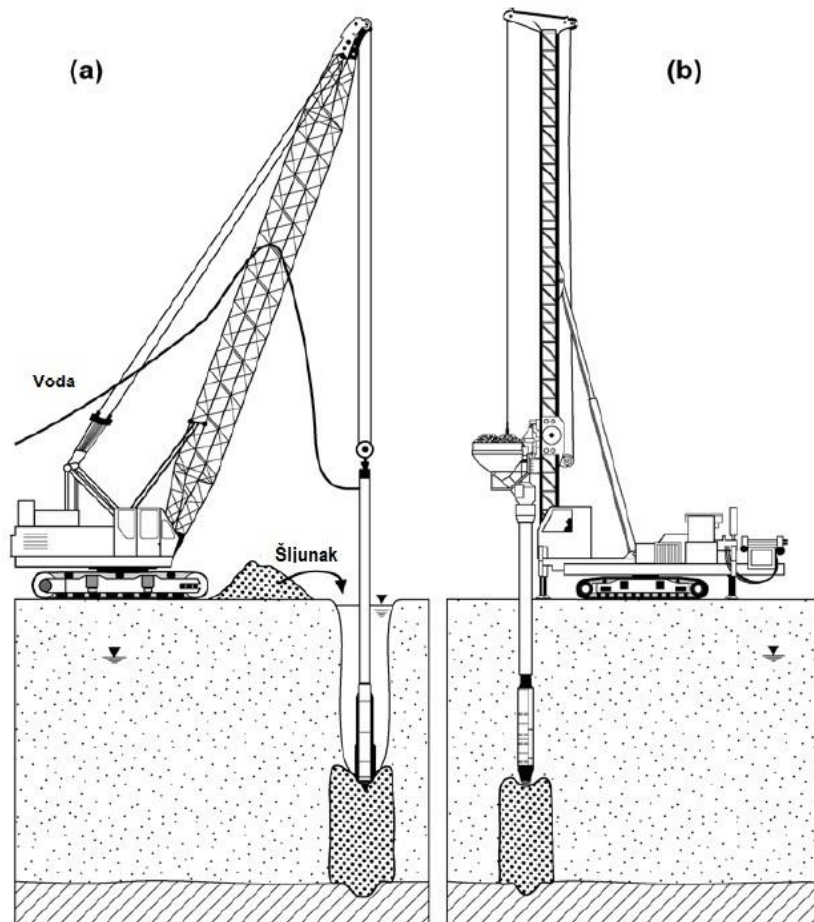


Slika 7. a) vibrator za mokru ugradnju s vrha b) vibrator za suhu ugradnju s dna (Keller, 2019.)

Metoda mokre ugradnje s vrha koristi težinu i vibracije samog vibratora zajedno sa mlazom vode za potrebe penetracije u tlo. Dolaskom do projektirane dubine, vibrator se postepeno diže kako bi kameni materijal (veličine 40 do 75mm) popunio prazan prostor. Nakon svakog usipavanja vibrator se ponovo spušta i zbija usipani kameni materijal. Kad se otpor propadanju vibratora počinje povećavati i istovremeno povećavati utrošak energije motora vibratora znači da je kameni materijal dovoljno zbijen na tom inkreментu te kreće na slijedeći. Proces se izvodi tako sve do vrha bušotine. Metoda je pogodna kod poboljšanja mekih saturiranih tla s nedreniranom posmičnom čvrstoćom ( $c_u$ ) od 10 do 30 kN/m<sup>2</sup>. Tijekom penetracije i kasnijeg procesa zbijanja kolapsirano tlo se izvozi na površinu pomoću vode. Promjer stupnjaka građenih ovom metodom je od 0.8 do 1.2 m (Kirsch i Kirsch, 2010.).

Suha ugradnja s dna koristi se tako da se vibrator utiskuje to projektirane dubine. Dolaskom do projektirane dubine, pomoću posebnog kanala na vibratoru dovodi

se kameni materijal (veličine 15 do 45 mm) koji se potom zbijaja. Kao i kod mokre metode, zbijanje se vrši po inkrementima sve do vrha bušotine. Metoda je pogodna kod poboljšanja stabilnijih sitnozrnatih tla s  $c_u = 30 - 50 \text{ kN/m}^2$ . Promjer stupnjaka građenih ovom metodom je od 0.5 do 0.8 m (Kirsch i Kirsch, 2010.). Na slici 8 prikazana je razlika između mokre ugradnje s vrha i suhe ugradnje s dna.



Slika 8. a) mokra ugradnja s vrha b) suha ugradnja s dna (prema Kirsch i Kirsch, 2010.)

### 3.2. Osnovne proračuna šljunčanih pilota

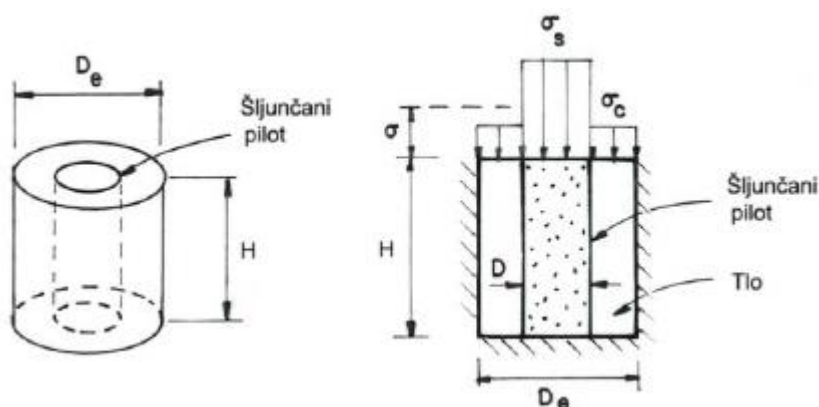
Pri poboljšanju tla šljunčanim pilotima najčešće se izrađuje mreža šljunčanih pilota, iako se u neki slučajevima može izraditi i samo jedan. Kod izrade mreže šljunčanih pilota, nosivost pojedinog pilota u grupi je veća nego bi bila nosivost jednog pilota sa istim karakteristikama i opterećenjem. Razlog tomu je dodatno zbijenost i povećanje čvrstoće tla oko unutarnjih pilota u mreži. Najčešće korišteni geometrijski rasporedi pilota su trokutasti i pravokutni (Slika 9) gdje je kod trokutastog najbolja zbijenost šljunčanih pilota na određenoj površini.



Slika 9. Raspored šljunčanih pilota: a) trokutasti b) pravokutni (prema Wang, 2009.)

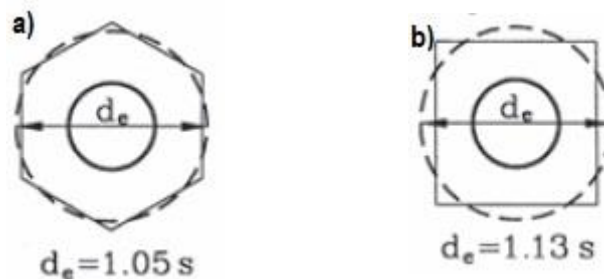
### 3.2.1. Koncept jediničnih ćelija

Koncept jediničnih ćelija temelj je većine metoda proračuna šljunčanih pilota. Površina prekrivena mrežom šljunčanih pilota dijeli se na jedinične ćelije (Slika 10). Svaku ćeliju čini sam šljunčani pilot i njegova zona utjecaja ( $D_e$ )(Slika 10).



Slika 10. Koncept jedinične ćelije (prema Bachus i Barksdale, 1983.)

U određenom rasporedu šljunčanih pilota, zone utjecaja čine određene oblike, heksagonalni ili kvadratni. Za potrebe proračuna slijeganja i stabilnosti, zone utjecaja se aproksimiraju kružnicom promjera  $D_e$  koja je površinom ista kao i prvotna površina zone utjecaja. Aproksimirana površina kružnice za trokutasti raspored iznosi  $1.05s$  i pravokutni raspored  $1.13s$ , gdje  $s$  predstavlja razmak između pilota (Slika 11). Aproksimirana zona utjecaja na kružnicu tako čini jediničnu ćeliju gdje je šljunčani pilot koncentričan vanjskoj granici jedinične ćelije.



Slika 11. Aproksimacija zone utjecaja s kružnicom (Majes i Pulko, 2006.)

### 3.2.2. Koeficijent zamjene tla

Iz koncepta jediničnih ćelija izveden je izraz koeficijenta zamjene tla ( $A_R$ ) (eng. *replacement area ratio*). Izraz predstavlja volumen tla koji je zamijenjen šljunčanim pilotom i izražen je odnosom površine pilota ( $A_c$ ) i površine zone utjecaja ( $A$ ):

$$A_R = \frac{A_c}{A}. \quad (7.)$$

Može iznositi od 0 do 1 gdje veći koeficijent prikazuje i veću mjeru zamjene tla šljunkom. Uobičajen iznos vrijednosti kreće se od 0.1 do 0.4 (Piccinini, 2015.).

### 3.3. Proračun šljunčanih pilota prema Priebeu

1976. godine Heinz J. Priebe razvio je i objavio istoimenu metodu. Temelji se na modelu jedinične ćelije. Proračun razmatra opterećenu površinu na neograničenom rasporedu pilota te je za potrebe metode uvedeno nekoliko pretpostavki:

- pilot je građen na krutom sloju te su moguće samo lateralne deformacije,
- materijal od kojeg se sastoji pilot je nestišljiv,
- gustoća pilota i tla je zanemarena.

Uz pretpostavke, također su uvedene i određene korekcije samih pretpostavki kako bi se metoda mogla koristiti što preciznije. Proračun se sastoji od nekoliko koraka, u prvome koraku se određuje osnovni stupanj poboljšanja tla  $n_0$  (eng. *Basic improvement factor*) na čijoj vrijednosti se temelje ostali koraci proračuna.

### 3.3.1. Stupanj poboljšanja tla

Stupanj poboljšanja tla najvažniji je parametar proračuna i predstavlja stupanj smanjenja slijeganja tla nakon ugradnje pilota. Ovisi o dimenzijama i geometriji pilota te deformabilnim karakteristikama pilota i okolnog tla. Izražen je kao omjer slijeganja tla prije ( $s_0$ ) i nakon ugradnje pilota ( $s$ ):

$$n = \frac{s_0}{s}. \quad (8.)$$

Ukoliko znamo slijeganje tla prije ugradnje pilota moguće je procijeniti slijeganje tla nakon ugradnje pilota:

$$s = \frac{s_0}{n}. \quad (9.)$$

### 3.3.2. Parametri čvrstoće kompozita pilot-tlo

S obzirom na to da tlo nakon ugradnje šljunčanih pilota djeluje kao zajednička cjelina, opterećenje se prenosi iz pilota u tlo i potom na okolne pilote. U odnosu na krute elemente koji se mogu kod određenih posmičnih naprezanja slomiti, šljunčani piloti se deformiraju dok ne prenesu suviše opterećenje na susjedni pilot. Zbog toga se u tlu koje je ojačano šljunčanim pilotima dešava slom tek kad je premašena posmična čvrstoća kompozita pilot-tlo pa se tako parametri čvrstoće odnose na ojačano tlo, uzevši u obzir parametre pilota i tla. Ako se pretpostave proporcionalna opterećenje na kompozitu, dolazi se do kuta trenja:

$$\tan \bar{\varphi} = m' * \tan \varphi_C + (1 - m') * \tan \varphi_S \quad (10.)$$

gdje je  $m'$  opterećenje po pilotu. Na pilotu se javlja veće opterećenje nego u okolnom tlu koje ovisi o koef. zamjene tla i stupnju poboljšanja. U situacijama s velikim koef. zamjene tla, tlo prima veći dio opterećenja nego kako je prema izračunu pa se opterećenje  $m$  mora reducirati:

$$m' = \left(\frac{n-1}{n}\right). \quad (11.)$$

Kohezija se izražava kao kohezija kompozita pilot-tlo i ovisi o koef. zamjene tla i koheziji tla. Kako se tijekom ugradnje pilota struktura tla narušava, u obzir je potrebno uzeti opterećenje  $m$  prema čemu se dolazi do:

$$c' = (1 - m')c_S. \quad (12.)$$

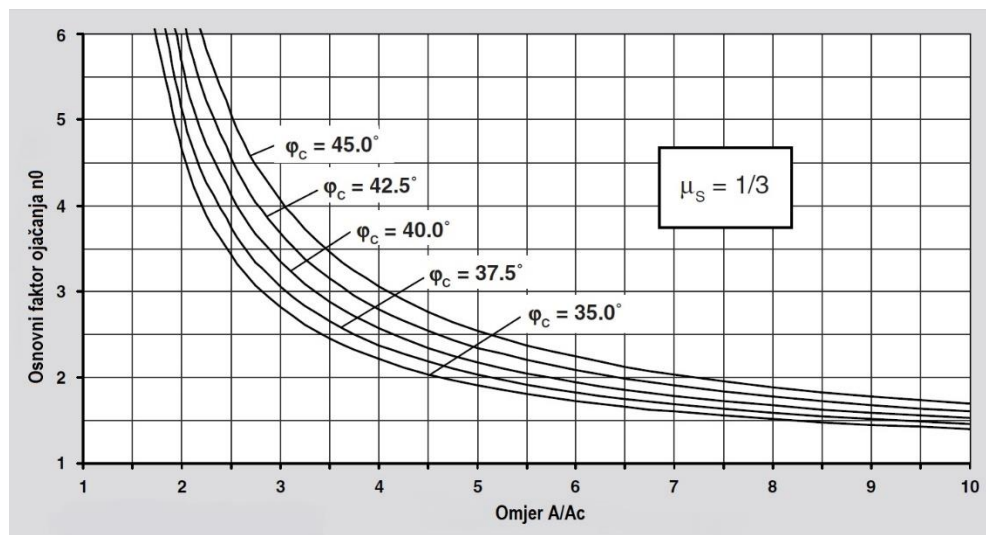
### 3.3.3.. Osnovni stupanj poboljšanja tla

Iz navedenih pretpostavki, koristeći Poissonov koef.  $\nu_s = 1/3$  za maksimalno slijeganje, Priebe je predstavio izraz osnovni faktor ojačanja kao:

$$n_0 = 1 + A_R * \left[ \frac{5 - A_R}{4 * K_{aC} * (1 - A_R)} - 1 \right], \quad (13.)$$

$$K_{aC} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_C}{2}\right). \quad (14.)$$

Osnovni faktor ojačanja predstavlja koliko je površine zamijenjeno i koliko lateralnog pritiska je razvijeno zbog ugradnje šljunčanog pilota. Zanimaruje stišljivost kamenog gradiva i pretpostavlja jednako bočno širenje cijelog pilota. Veza stupnja poboljšanja tla  $n_0$ , u ovisnosti o omjeru površina  $A/A_C$  i kutu trenja materijala šljunčanog pilota prikazana je na slici 12.



Slika 12. Veza faktora ojačanja i  $A/A_C$  (prema Priebe, 1995.)

### 3.3.4. Korekcija vezana za stišljivost pilota

U obzir se sada uzima stišljivost materijala od kojeg se sastoji pilot prema čemu opterećenjem pilota dolazi do slijeganja koje nije povezano sa deformacijama u obliku izbočenja pilota. Prema tome, dio slijeganja prilikom opterećenja pilota posljedica je stišljivosti. Ako se promatra situacija u kojoj je cjelokupno tlo zamijenjeno kamenim agregatom stvarni faktor ojačanja tla ne postiže teoretsku beskonačnu vrijednost za nestišljiv materijal kao što proizlazi iz izraza, već može poprimiti maksimalnu vrijednost koja je jednaka omjeru modula otpora pilota ( $M_{0,C}$ ) i tla ( $M_{0,S}$ ):



$$n_{1,max} = \frac{M_{o,c}}{M_{o,s}}. \quad (15.)$$

Pomoću osnovnog faktora poboljšanja dolazi se do izraza za redukcijski faktor površinskog koeficijenta zamjene kod kojeg osnovni faktor poboljšanja odgovara omjeru edometarskog modula pilota i tla ( $n_0 = D_C/D_S$ ):

$$(A_R)_1 = -\frac{4K_{ac}(n_0-2)+5}{8K_{ac}-2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4K_{ac}(n_0-2)+5}{4K_{ac}-1}\right]^2 + \frac{16K_{ac}(n_0-1)}{4K_{ac}-1}}. \quad (16.)$$

Osnovni faktor ojačanja potrebno je reducirati na realnu vrijednost s obzirom na stišljivost pilota. Uzevši u obzir  $v_s = 1/3$  dolazi se do izraza za reducirani faktor poboljšanja (Izraz 17). Kako bi se dobio reducirani faktor poboljšanja tla  $n_1$ , uvodi se modificirani koef. zamjene tla  $\overline{A}_R$ :

$$n_1 = 1 + \overline{A}_R * \left[ \frac{5 + \overline{A}_R}{4K_{ac} * (1 - \overline{A}_R)} - 1 \right], \quad (17.)$$

$$\overline{A}_R = \frac{1}{A_R + \Delta\left(\frac{A}{Ac}\right)}, \quad (18.)$$

$$\Delta\left(\frac{A}{Ac}\right) = \frac{1}{(A_R)_1} - 1. \quad (19.)$$

### 3.3.5. Korekcija vezana za dubinu pilota

Kod proračuna  $n_1$  zanemaruje se gustoća pilota i tla pa tako početna razlika tlaka između pilota i tla koja stvara ispučenje ovisi isključivo o raspodjeli temeljnog opterećenja  $q$  na pilotu i tlu te je konstantna. Uzevši u obzir težinu pilota i tla početni pritisak se smanjuje isto kao i izbočenje tj. povećanjem vertikalnog naprezanja pilota, piloti su bolje zbijeni lateralno te tako imaju i veću nosivost.

U proračunu se primjenjuje gustoća tla i materijala pilota. Zanemarivanje gustoće tla i materijala pilota znači da razlika horizontalnih pritisaka između tla i pilota ovisi samo o raspodjelu vanjskog opterećenja na pilot i tlo, te da je ona konstantna po čitavoj dužini pilota. Radi dodane težine pilota i tla, razlika tlakova se smanjuje sa dubinom. Zbog toga Priebe je uveo dubinski faktor  $f_D$  kojim se faktor ojačanja  $n_1$  povećava prema:

$$n_2 = f_D n_1 \quad (20.)$$

gdje je:

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - 1 \sum(\gamma_s \Delta d)}{K_{oc} q_c}}, \quad (21.)$$

$$q_C = \frac{q}{A_R \frac{1 - \bar{A}_R}{p q_S}}, \quad (22.)$$

$$\frac{q_C}{q_S} = \frac{5 + \bar{A}_R}{4K_{aC} * (1 - \bar{A}_R)}, \quad (23.)$$

$$K_{oC} = 1 - \sin \varphi_C \quad (24.)$$

za  $v_s = 1/3$ , gdje je  $\Delta d$  dubina poboljšanja za koju vertikalno naprezanje glasi  $\sigma_v = \Sigma(\gamma^* \Delta d)$ ,  $K_{0,c}$  tlak pilota u mirovanju (smanjenjem bočnih deformacija smanjuje se aktivan tlak) i  $q_C$  površinsko opterećenje pilota.

## **4. POBOLJŠANJE TLA PRIMJENOM ŠLJUNČANIH PILOTA ZA POTREBE GRADNJE UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA VIROVITICA**

Tlo na lokaciji budućeg uređaja za pročišćavanje otpadnih nije povoljno u smislu nedovoljnih vrijednosti deformacijskih modula. Kao način poboljšanja određeni su šljunčani piloti ojačani cementom koji će osigurati veću nosivost, smanjiti ukupno slijeganje i svesti na prihvatljivu razinu s strane uporabivosti. Objekti od kojeg se sastoji Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda su prikazani su u prilogu 1.

Generalno, temeljenje objekta i ojačanje temeljnog tla izvodi se šljunčanim pilotima promjera  $\varnothing 900$  mm, u trokutnom rasporedu na osnom razmaku 200 i 250 cm. Proračun slijeganja tla proveden je Priebeovom metodom i korištenjem programa Settle 3D, Rocscience.

Postupak izvedbe se kompjutorski prati te su mjerenja automatizirana. Oprema za praćenje ugradnje se sastoji od: kontrolne jedinice, kompjutera i jedinice za pohranu podataka. Tijekom ugradnje registriraju se sljedeći podaci:

- oznaka pozicije,
- datum,
- početak, kraj i trajanje ugradnje,
- dubina ugradnje,
- energija ugradnje.

Nakon završetka radova, kontrola postignutog poboljšanja provodi se provedbom:

- dinamičkog penetracijskog testa teškom udarnom sondom prema DIN-u: 8 ispitivanja, od čega 3 kroz šljunčani pilot, a 3 pokraj pilota,
- ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti šljunčanog pilota na dubini temeljenja: 8 ispitivanja,
- spektralne analize površinskih valova (SASW) u 5 profila.

### **4.1. Geotehnički istražni radovi**

Za potrebe gradnje Uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u okviru geotehničkih istražnih radova izvedene su tri istražne bušotine dubine 15,0 m i

dvije dubine 6,0 m kako bi se mogla provesti kategorizacija vrste tla i njegovih osnovnih fizikalno-mehaničkih svojstava.

Prema izvedenim istražnim radovima tlo je građeno od pretežito pjeskovito-glinenog materijala niske plastičnosti. Za potrebe projektiranja i izrade geostatičkih proračuna usvojen je model tla preuzet iz geotehničkog izvještaja (Tablica 1) i opterećenja prema tablici 2.

Tablica 1. Opis temeljnog tla

Opis	Dubina sloja [m]		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi'$ [°]	$c_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M_v$ [kN/m <sup>2</sup> ]
CL	1,6	1,6	18	15	22	50	7400
CL/SC_1	4,2	5,8	19	7	29	100	7400
CL/SC_2	4,2	10	19	5	26	120	8800
CL/SC_3	5	15	19	5	32	150	16200

#### 4.1.1. Podzemna voda

Razina podzemne vode RPV nalazi se na dubini 4,7 m od površine terena.

Podzemna voda može negativno utjecati na konzistentno stanje sloja prahovito-pjeskovite gline (CL/SC) koji će se očekivano naći na kontaktu temelja i temeljnog tla kod objekata čija je dubina temeljenja veća od 1,20 m. Ovisno o uvjetima prilikom iskopa predlaže se izvršiti zamjenu materijala u debljini od min. 50 cm do kote temeljenja uz zbijanje. Na kontaktu temeljnog tla i zamjenskog materijala potrebno je postaviti geotekstil u svrhu odvajanja slojeva i filtracije.

Ovisno o dubinama temeljenja pojedinih objekata potrebno je voditi računa o mogućem negativnom utjecaju podzemne vode u fazi iskopa građevnih jama pa je tako predviđena izvedba zaštitne konstrukcije iskopa građevnih jama slijedećih objekata:

- 010 - retencijsko preljevni bazen i crpna stanica preljevni voda,  $D_f = 7,85$  m,
- 030 - gruba rešetka,  $D_f = 5,90$  m,
- 040+085 - ulazna crpna stanica,  $D_f = 6,90$  m.

## 4.2. Geostatički proračuni

### 4.2.1. Analiza opterećenja

Tablica 2. Dimenzije, dubina temeljenja i opterećenja objekata

Objekt	Tloctne dimenzije temelja BxL [m]	Dubina temeljenja [m]	Stalno opterećenje q [kn/m <sup>2</sup> ]	Uporabno opterećenje q [kn/m <sup>2</sup> ]
010, 400 Temeljna ploča	28,40x12,20	7,85	70,0	40,0
010 Temeljna ploča	6,45x8,20	6,25	70,0	40,0
030 Temeljna ploča	10,80x4,0	5,90	70,0	15,0
030 Temeljna traka	0,6x9,80	1,0	115,0	45,0
040, 085 Temeljna ploča	4,20x9,10	6,90	70,0	15,0
060, 080 Temeljna traka	1,0x13,60	1,0	125,0	20,0
060, 080 Temeljna ploča	15,30x14,30	0,25	7,5	20,0
110 Temeljna ploča	36,10 × 25,60	4,20	50 – Područje uz rub bazena 20 – sredina ploče 35 – prosječno opterećenje	60
170/180 Temeljna ploča	4,0x10,10	2,50	45	35
250 Temeljna ploča	10,00x10,00	1,50	35	40
270 Temeljna ploča	11,40 × 19,10	4,05	40 – Područje uz rub bazena 20 – U sredini ploče 30 – prosječno opterećenje	60
290 Temeljne trake	0,60 × 9,45	1,00	40	12
410, 430 Temeljna traka	0,6x26,90	1,0	130,0	25,0
450 Temeljna traka	0,45x6,0	1,0	130,0	25,0

#### 4.2.2. Proračun nosivosti šljunčanih pilota

Provedeni su proračuni nosivosti šljunčanih pilota na razmaku od 2,0 m i 2,5 m.

Proračun se vršio prema:

$$q_{ult} = c_c N_c + \bar{q} N_q + \frac{1}{2} W \gamma_c N_\gamma \quad (25.)$$

gdje su:

$$N_c = \frac{\cos \frac{\varphi_c}{2} \sqrt{K_{pc} c_c}}{\cos \frac{\varphi_s}{2} K_{as}}, \quad (26.)$$

$$N_q = \frac{K_{pc} \cos \frac{\varphi_c}{2}}{K_{as} \cos \frac{\varphi_s}{2}}, \quad (27.)$$

$$N_\gamma = \tan \eta_a \left( \frac{\cos \frac{\varphi_c}{2} K_{pc}}{\cos \frac{\varphi_s}{2} K_{as}} - \frac{\gamma_s}{\gamma_c} \right), \quad (28.)$$

$$W = \frac{A_s}{s}, \quad (29.)$$

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\varphi_s)}{\cos(\delta_1) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_s + \delta_1) \sin(\varphi_s)}{\cos(\delta_1)}} \right]^2}, \quad (30.)$$

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\varphi_c)}{\cos(\delta_2) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi_c + \delta_2) \sin(\varphi_c)}{\cos(-\delta_2)}} \right]^2}, \quad (31.)$$

$$K_{pc} = K_{pc} \left( 1 + \frac{c_w}{c_c} \right), \quad (32.)$$

$$\delta_1 = \frac{\varphi_s}{2}, \quad (33.)$$

$$\delta_2 = \frac{\varphi_c}{2}, \quad (34.)$$

$$\eta_a = \varphi_s + \tan^{-1} \left( \frac{-\tan \varphi_s + c_1}{c_2} \right), \quad (35.)$$

$$c_1 = \sqrt{\tan \varphi_s (\tan \varphi_s + \cot \varphi_s) (1 + \tan \delta_1 * \cot \varphi_s)}, \quad (36.)$$

$$c_2 = 1 + (\tan \delta_1 [\tan \varphi_s + \cot \varphi_s]), \quad (37.)$$

$$\eta_p = -\varphi_c + \tan^{-1}\left(\frac{\tan \varphi_c + C_3}{C_4}\right), \quad (38.)$$

$$C_3 = \sqrt{\tan \varphi_c (\tan \varphi_c + \cot \varphi_c) (1 + \tan \delta_2 * \cot \varphi_c)}, \quad (39.)$$

$$C_4 = 1 + (\tan \delta_2 [\tan \varphi_c + \cot \varphi_c]), \quad (40.)$$

$$P_a = \frac{1}{2} K_{as} \gamma_s H^2 + q_{ult} K_{as} H, \quad (41.)$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_{pc} \gamma_c H^2 + \bar{q} H K_{pc} + 2 C_c \sqrt{K_{pc}} H, \quad (42.)$$

$$H = W * \tan \eta_a = \frac{A_s}{S} \tan \eta_a i \quad (43.)$$

$$P_a \cos \delta_1 = P_p \cos \delta_2. \quad (44.)$$

Proračun nosivosti šljunčanih pilota na razmaku od 2,0 m (tablica 3):

Tablica 3. Ulazni parametri tla

Jedinična težina tla	$\gamma_c =$	18,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
Kohezija	$C_c =$	10,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Nedrenirana čvrstoća	$C_{uc} =$	50,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi_c =$	23,00	[°]
Adhezija	$C_w =$	3,00	[kN/m <sup>2</sup> ]

Tablica 4. Ulazni parametri šljunčanih pilota

Promjer šljunčanog pilota	$D =$	0,90	[m]
Osni razmak šljunčanih pilota	$S =$	2,00	[m]
Jedinična težina šljunčanog pilota	$\gamma_s =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
Kohezija	$C_s =$	0,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi_s =$	40,00	[°]

Tablica 5. Proračun nosivosti šljunčanog pilota

Površina poprečnog presjeka šljunčanog pilota	$A_s =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
Širina trake jednog reda šljunčanih pilota	$W =$	0,318	[m]
Nagib aktivnog pritiska u odnosu na horizontalu	$\delta_1 =$	20,00	[°]
Nagib pasivnog pritiska u odnosu na horizontalu	$\delta_2 =$	11,50	[°]
	$C_1 =$	1,563	
	$C_2 =$	1,739	
Nagib aktivnog klina u odnosu na horizontalu	$\eta_a =$	62,60	[°]
	$C_3 =$	1,321	
	$C_4 =$	1,566	
Nagib pasivnog klina u odnosu na horizontalu	$\eta_p =$	25,11	[°]
Koeficijent aktivnog bočnog pritiska	$K_{as} =$	0,199	
Koeficijent pasivnog bočnog pritiska	$K_{pc} =$	3,140	
	$K_{pcc} =$	4,082	
Visina imaginarnog zida	$H =$	0,614	[m]
Faktor nosivosti	$N_c =$	21,13	
Faktor nosivosti	$N_q =$	16,42	
Dodatno opterećenje na površini pasivne regije	$q =$	10,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Faktor nosivosti	$N_\gamma =$	29,64	
Nosivost šljunčanog pilota	$q_{ult} =$	<b>460,39</b>	[kN/m <sup>2</sup> ]



Proračun nosivosti šljunčanih pilota na razmaku od 2,5 m (tablica 4):

Tablica 6. Ulazni parametri tla

Jedinična težina tla	$\gamma_c =$	18,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
Kohezija	$C_c =$	10,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Nedrenirana čvrstoća	$C_{uc} =$	50,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi_c =$	23,00	[°]
Adhezija	$C_w =$	3,00	[kN/m <sup>2</sup> ]

Tablica 7. Ulazni parametri šljunčanih pilota

Promjer šljunčanog pilota	$D =$	0,90	[m]
Osni razmak šljunčanih pilota	$S =$	2,50	[m]
Jedinična težina šljunčanog pilota	$\gamma_s =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
Kohezija	$C_s =$	0,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi_s =$	40,00	[°]

Tablica 8. Proračun nosivosti šljunčano pilota

Površina poprečnog presjeka šljunčanog pilota	$A_s =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
Širina trake jednog reda šljunčanih pilota	$W =$	0,254	[m]
Nagib aktivnog pritiska u odnosu na horizontalu	$\delta_1 =$	20,00	[°]
Nagib pasivnog pritiska u odnosu na horizontalu	$\delta_2 =$	11,50	[°]
	$C_1 =$	1,563	
	$C_2 =$	1,739	
Nagib aktivnog klina u odnosu na horizontalu	$\eta_a =$	62,60	[°]
	$C_3 =$	1,321	
	$C_4 =$	1,566	
Nagib pasivnog klina u odnosu na horizontalu	$\eta_p =$	25,11	[°]
Koeficijent aktivnog bočnog pritiska	$K_{as} =$	0,199	
Koeficijent pasivnog bočnog pritiska	$K_{pc} =$	3,140	
	$K_{pcc} =$	4,082	
Visina imaginarnog zida	$H =$	0,491	[m]
Faktor nosivosti	$N_c =$	21,13	
Faktor nosivosti	$N_q =$	16,42	
Dodatno opterećenje na površini pasivne regije	$q =$	10,00	[kN/m <sup>2</sup> ]
Faktor nosivosti	$N_y =$	29,64	
Nosivost šljunčanog pilota	$q_{ult} =$	<b>443,42</b>	[kN/m <sup>2</sup> ]

### 4.2.3. Proračun stupnja poboljšanja tla Priebeovom metodom

Piloti na razmaku od 2,0 m:

- objekt 060, 080 – temeljna traka (tablica 9, 10, 11 i 12)

Tablica 9. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{0,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 0,6	0,6	18	22	15	0,3	7,4	1,0
2	CL	0,6 – 4,8	4,2	9	29	7	0,3	7,4	2,2
3	CL	4,8 – 9	4,2	9	26	5	0,3	8,8	0,5
4	CL	9 – 10,5	1,5	9	32	5	0,3	16,2	0,1
Ukupno:									3,7

Tablica 10. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,0	[m]
$d =$	10,5	[m]
$q =$	145	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,7	[m]
$\gamma_c =$	19,0	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40	[°]
$M_{0,c}$	200,0	[Mpa]

Tablica 11. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	3,464	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,184	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	2,157	

Tablica 12. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 0,6	0,6	2,157	1,939	2,012	31,91	7,46	15	0,48
2	CL	0,6 – 4,8	4,2	2,157	1,939	2,228	35,42	3,14	16	0,97
3	CL	4,8 – 9	4,2	2,157	1,905	2,185	34,15	2,29	19	0,24
4	CL	9 – 10,5	1,5	2,157	1,754	1,833	35,84	2,73	30	0,03
Ukupno:										1,72

- objekt 060, 080 – temeljna ploča (tablica 13, 14, 15 i 16)

Tablica 13. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{o,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 1,35	1,35	18	22	15	0,3	7,4	0,4
2	CL	1,35 – 5,55	4,2	9	29	7	0,3	7,4	1,3
3	CL	5,55 – 9,75	4,2	9	26	5	0,3	8,8	0,8
4	CL	9,75 – 10,5	0,75	9	32	5	0,3	16,2	0,0
Ukupno:									2,5

Tablica 14. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,0	[m]
$d =$	10,5	[m]
$q =$	27,5	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,7	[m]
$\gamma_c =$	19,0	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40	[°]
$M_{o,c}$	200,0	[Mpa]

Tablica 15. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	3,464	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,184	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	2,157	

Tablica 16. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 1,35	1,35	2,157	1,939	3,376	35,38	4,44	25	0,13
2	CL	1,35 – 5,55	4,2	2,157	1,939	6,118	38,40	1,14	45	0,21
3	CL	5,55 – 9,75	4,2	2,157	1,905	5,867	37,93	0,85	52	0,13
4	CL	9,75 – 10,5	0,75	2,157	1,754	1,980	36,16	2,53	32	0,02
Ukupno:										0,49

- objekt 110 – temeljna ploča (tablica 17, 18, 19 i 20)

Tablica 17. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{o,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 1,6	1,6	18	29	7	0,3	7,4	0,4
2	CL	1,6 – 5,8	4,2	9	26	5	0,3	8,8	0,8
3	CL	5,8 – 7,0	1,2	9	32	5	0,3	16,2	0,2
Ukupno:									1,4

Tablica 18. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,0	[m]
$d =$	7,00	[m]
$q =$	80	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,70	[m]
$\gamma_c =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40,00	[°]
$M_{o,c}$	200,00	[Mpa]

Tablica 19. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	3,464	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,184	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	2,157	

Tablica 20. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 1,6	1,6	2,157	1,939	2,346	35,67	2,98	17	0,16
2	CL	1,6 – 5,8	4,2	2,157	1,905	2,481	34,90	2,02	22	0,33
3	CL	5,8 – 7,0	1,2	2,157	1,754	1,871	35,93	2,67	30	0,10
Ukupno:										0,59

- objekt 170/180 – temeljna ploča (tablica 21, 22, 23 i 24)

Tablica 21. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{o,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 3,3	3,3	18	29	7	0,3	7,4	1,6
2	CL	3,3 – 7,5	4,2	9	26	5	0,3	8,8	0,8
3	CL	7,5 – 8,2	0,7	9	32	5	0,3	16,2	0,0
Ukupno:									2,5

Tablica 22. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,20	[m]
$d =$	8,20	[m]
$q =$	80	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,70	[m]
$\gamma_c =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40,00	[°]
$M_{o,c} =$	200,00	[Mpa]

Tablica 23. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	4,192	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,152	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	1,908	

Tablica 24. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 3,3	3,3	1,908	1,744	2,616	36,14	2,68	19	0,62
2	CL	3,3 – 7,5	4,2	1,908	1,718	2,193	34,17	2,28	19	0,37
3	CL	7,5 – 8,2	0,7	1,908	1,601	1,658	35,37	3,02	27	0,02
Ukupno:										1,02

- objekt 250 – temeljna ploča (tablica 25, 26, 27 i 28)

Tablica 25. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{0,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 4,3	4,3	18	29	7	0,3	7,4	1,6
2	CL	4,3 – 8,5	4,2	9	26	5	0,3	8,8	0,8
3	CL	8,5 – 8,2	0,7	9	32	5	0,3	16,2	0,0
Ukupno:									2,5

Tablica 26. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,20	[m]
$d =$	8,20	[m]
$q =$	80	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,70	[m]
$\gamma_c =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40,00	[°]
$M_{0,c}$	200,00	[Mpa]

Tablica 27. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	4,192	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,152	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	1,908	

Tablica 28. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 4,3	4,3	1,908	1,744	3,084	36,75	2,27	23	0,53
2	CL	4,3 – 8,5	4,2	1,908	1,718	2,193	34,17	2,28	19	0,37
3	CL	8,5 – 9,2	0,7	1,908	1,601	1,658	35,37	3,02	27	0,02
Ukupno:										0,92

- objekt 270 – temeljna ploča (tablica 29, 30, 31 i 32)

Tablica 29. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{o,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 1,8	1,8	18	29	7	0,3	7,4	0,7
2	CL	1,8 – 6	4,2	9	26	5	0,3	8,8	1,3
3	CL	6 - 7	1	9	32	5	0,3	16,2	0,1
Ukupno:									2,1

Tablica 30. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,00	[m]
$d =$	7,00	[m]
$q =$	90	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,70	[m]
$\gamma_c =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40,00	[°]
$M_{o,c}$	200,00	[Mpa]

Tablica 31. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	3,464	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,184	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	2,157	

Tablica 32. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 1,8	1,8	2,157	1,939	2,346	35,67	2,98	17	0,30
2	CL	1,8 – 6	4,2	2,157	1,905	2,401	34,71	2,08	21	0,53
3	CL	6 - 7	1	2,157	1,754	1,839	35,85	2,72	30	0,08
Ukupno:										0,90

Piloti na razmaku od 2,5 m:

- objekt 010, 400 – temeljna ploča (tablica 33, 34, 35 i 36)

Tablica 33. Parametri slojeva prije ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$\gamma'_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_s$	$M_{0,s}$ [Mpa]	$S_0$ [cm]
1	CL	0 – 2,85	2,85	9	26	5	0,3	7,4	0,6
2	CL	2,85 – 4,0	1,15	9	32	5	0,3	8,8	0,7
Ukupno:									1,3

Tablica 34. Ulazni parametri proračuna

$d_c =$	0,9	[m]
$S =$	2,5	[m]
$d =$	4	[m]
$q =$	110	[kN/m <sup>2</sup> ]
$v_s =$	0,33	
$RPV =$	4,7	[m]
$\gamma_c =$	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varphi_c =$	40,00	[°]
$M_{0,c}$	200,0	[Mpa]

Tablica 35. Dobiveni parametri proračuna

$A_c =$	0,636	[m <sup>2</sup> ]
$A =$	5,413	[m <sup>2</sup> ]
$A_R =$	0,118	
$K_{a,c} =$	0,217	
$n_0 =$	1,666	

Tablica 36. Parametri slojeva nakon ojačanja tla

Sloj	USCS	Dubina [m]	$\Delta d$ [m]	$n_0$	$n_1$	$n$	$\varphi$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$M$ [Mpa]	$S$ [cm]
1	CL	0 – 2,85	2,85	1,666	1,550	1,722	32,42	2,90	13	0,36
2	CL	2,85 – 4,0	1,15	1,666	1,532	1,596	35,18	3,13	14	0,43
Ukupno:										0,79

U tablici 37 prikazane su vrijednosti slijeganja koje su dobivene Priebeovom metodom a prikazuju vrijednosti prije i nakon poboljšanja tla ispod objekata.



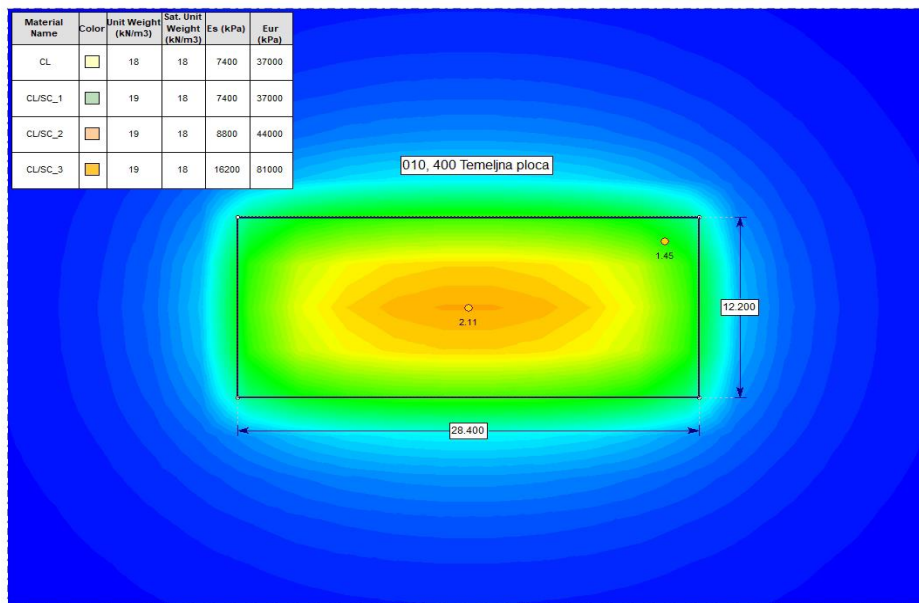
Tablica 37. Vrijednosti slijeganja ispod objekata prije i nakon poboljšanja tla

Objekt	Ne poboljšano tlo	Poboljšano tlo
	Slijeganje [cm]	Slijeganje [cm]
<b>060, 080 – traka</b>	3,7	1,72
<b>060, 080 – ploča</b>	2,5	0,49
<b>110 – ploča</b>	1,4	0,59
<b>170/180 - ploča</b>	2,5	1,02
<b>250 – ploča</b>	2,5	0,92
<b>270 – ploča</b>	2,1	0,9
<b>010, 400 – ploča</b>	1,3	0,79

#### 4.2.4. Proračun slijeganja korištenjem računalnog programa Settle 3D, Rocscience

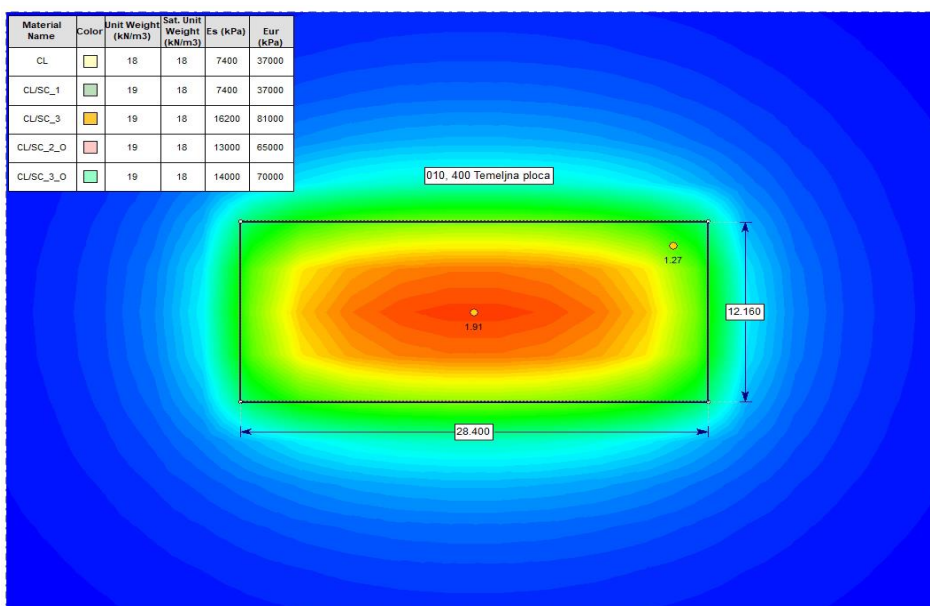
Objekt 010, 400 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 13):
  - središnja točka:  $w = 2,11$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,45$  cm,



Slika 13. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

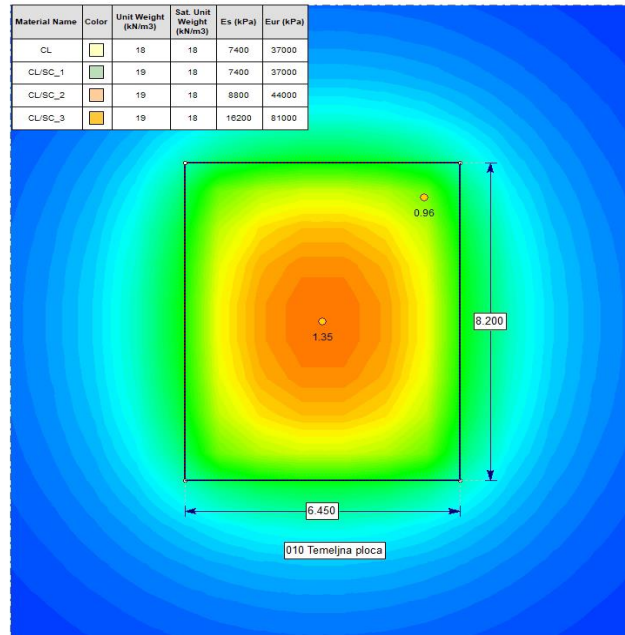
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 14):
  - središnja točka:  $w = 1,91$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,27$  cm.



Slika 14. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

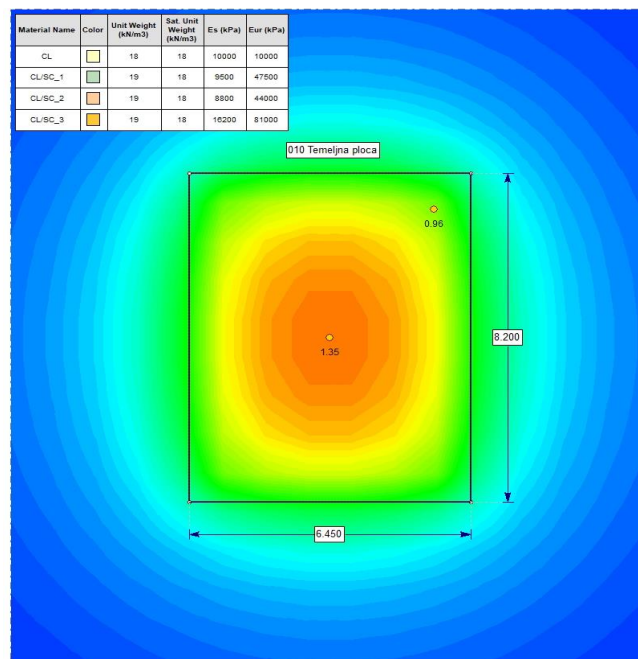
Objekt 010 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 15):
  - središnja točka:  $w = 1,35$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 0,96$  cm,



Slika 15. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

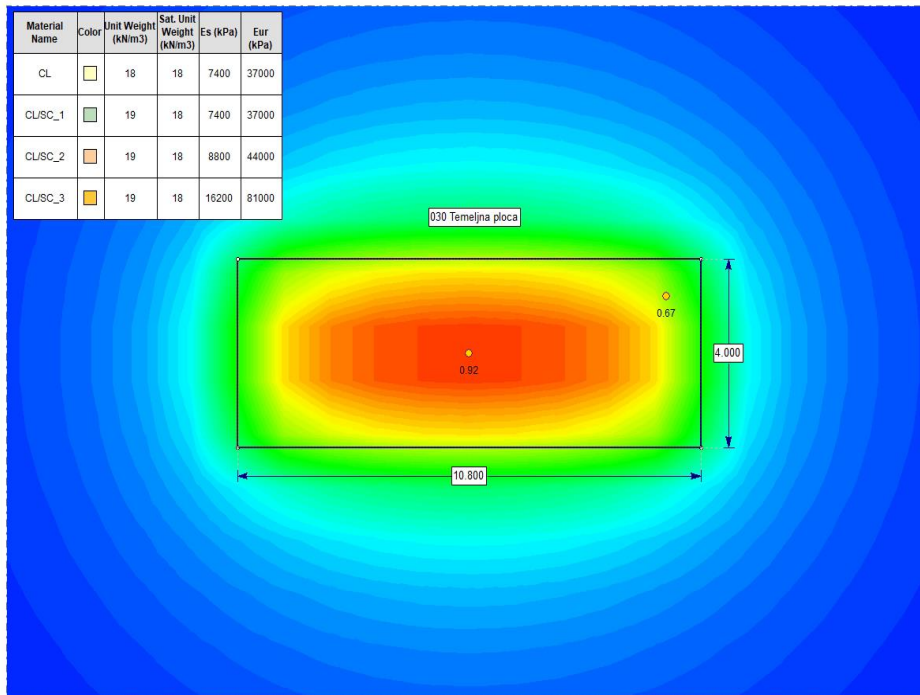
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 16):
  - središnja točka:  $w = 1,35$  cm,
  - karakteristična točka:  $w=0,96$  cm.



Slika 16. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

Objekt 030 – temeljna ploča:

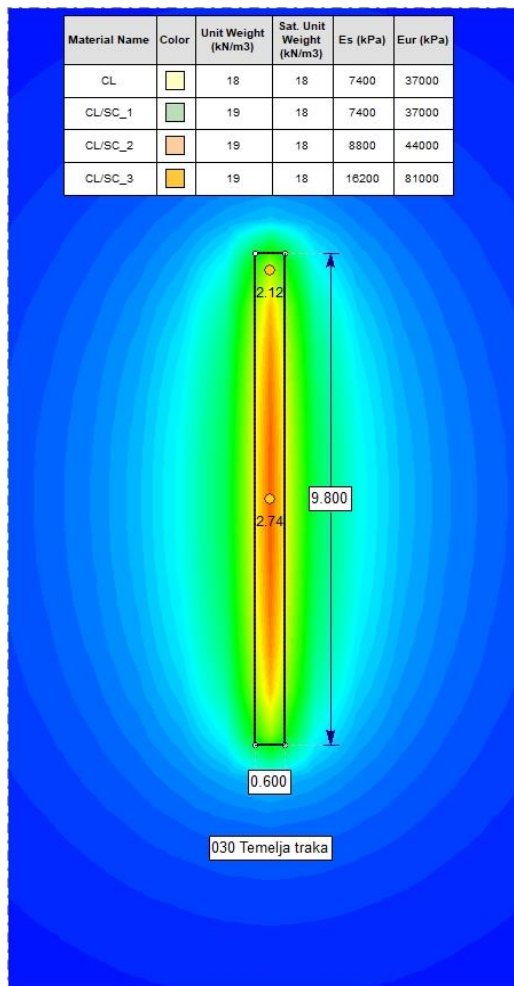
- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 17):
  - središnja točka:  $w = 0,92$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 0,57$  cm.



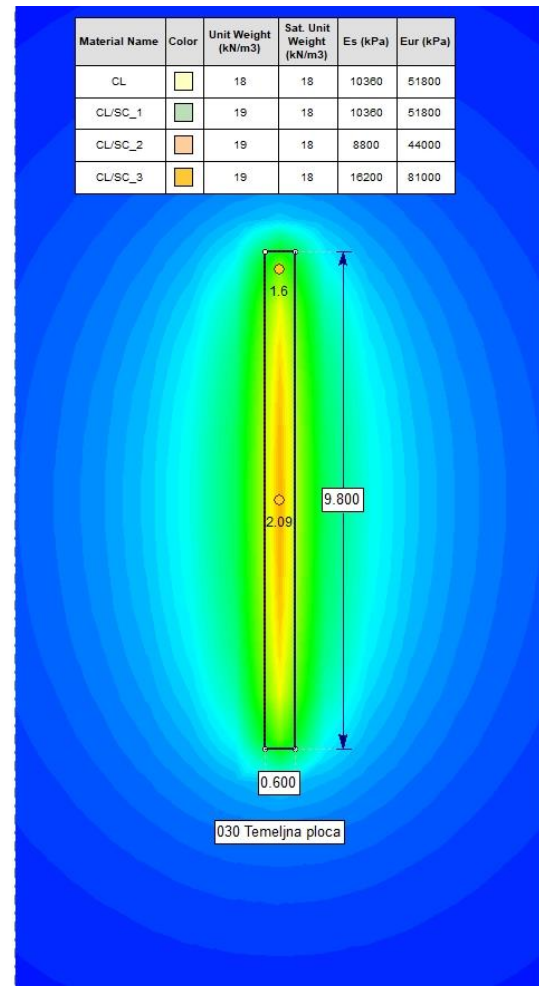
Slika 17. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

Objekt 030 – temeljna traka:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 18):
  - središnja točka:  $w = 2,74$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 2,12$  cm,
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 19):
  - središnja točka:  $w = 2,09$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,6$  cm.



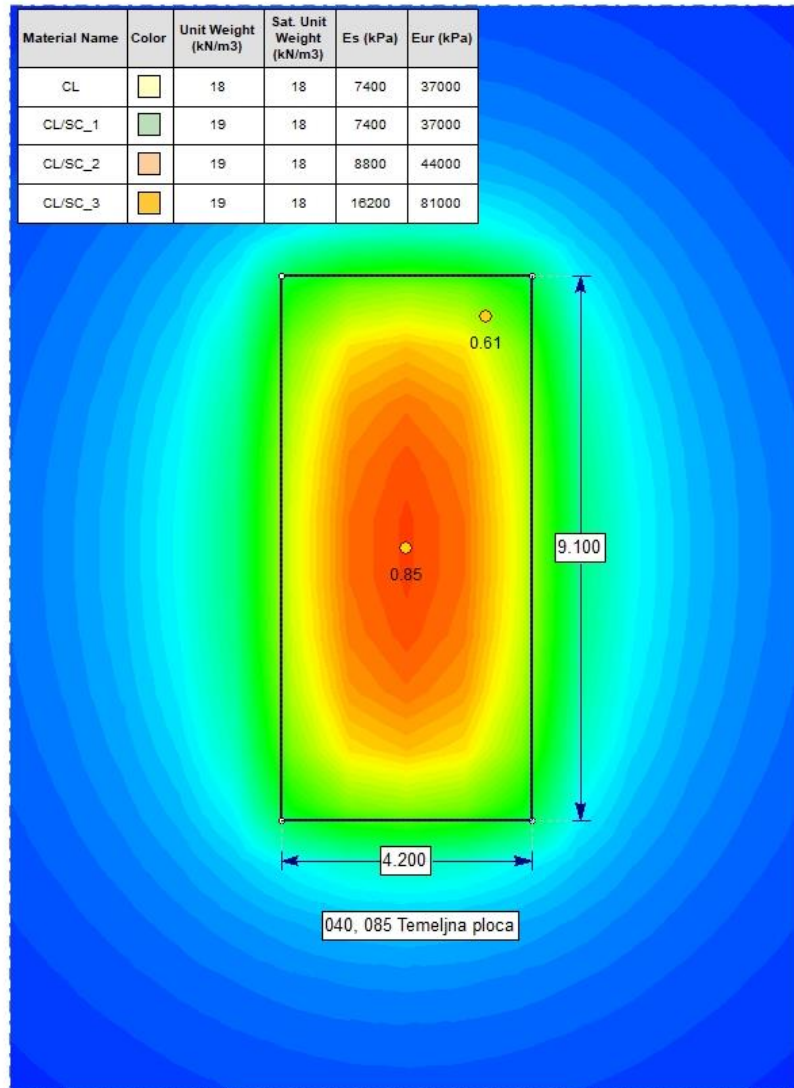
Slika 18. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla



Slika 19. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

Objekt 040, 085 – temeljna ploča:

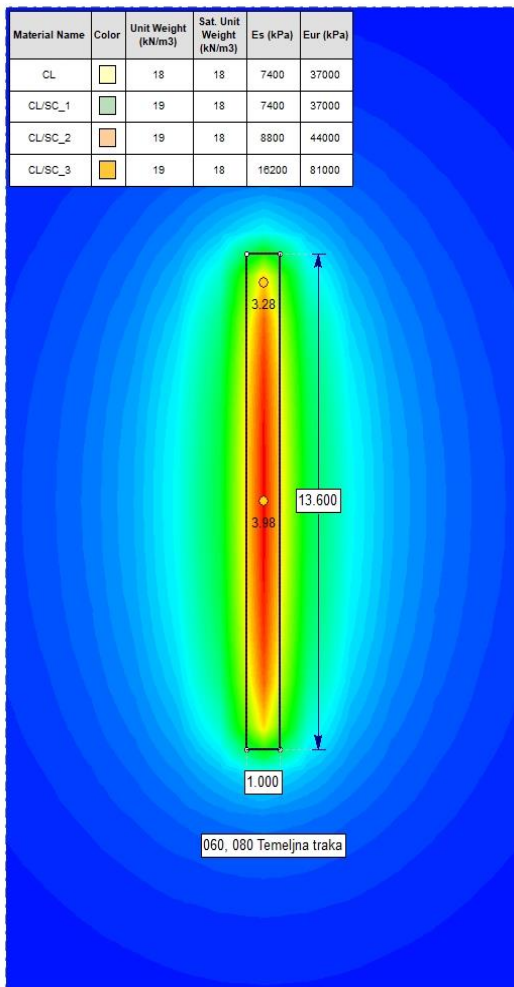
- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 20):
  - središnja točka:  $w = 0,85$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 0,61$  cm.



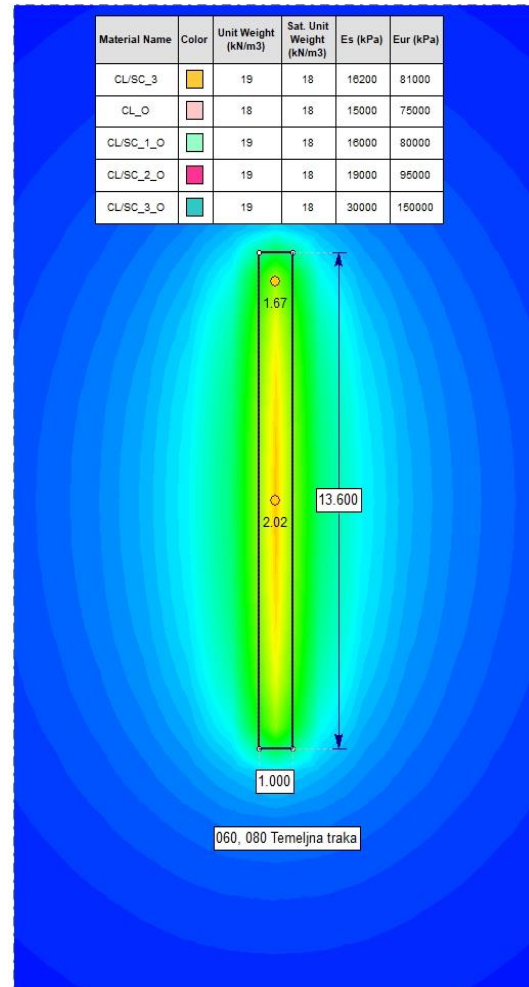
Slika 20. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

Objekt 060, 080 – temeljna traka:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 21):
  - središnja točka:  $w = 3,98$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 3,28$  cm,
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 22):
  - središnja točka:  $w = 2,02$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,67$  cm.



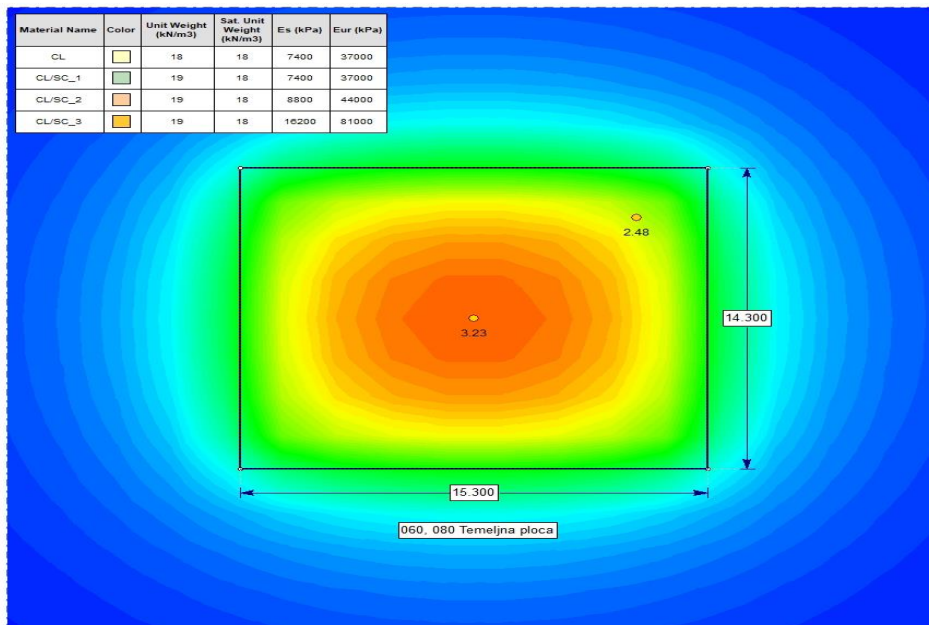
Slika 21. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla



Slika 22. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

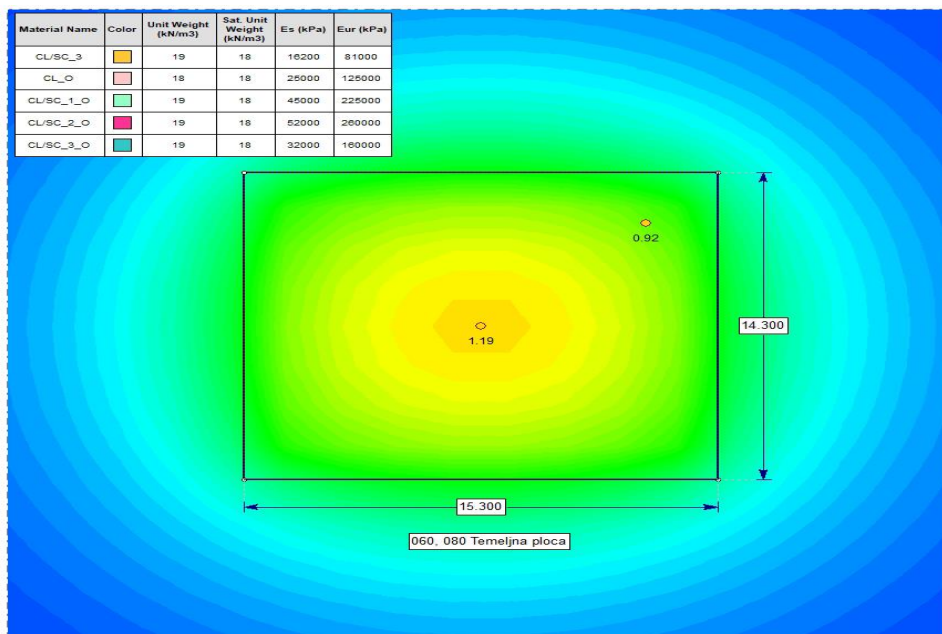
Objekt 060, 080 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 23):
  - središnja točka:  $w = 3,23$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 2,48$  cm,



Slika 23. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 24):
  - središnja točka:  $w = 1,19$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 0,92$  cm.

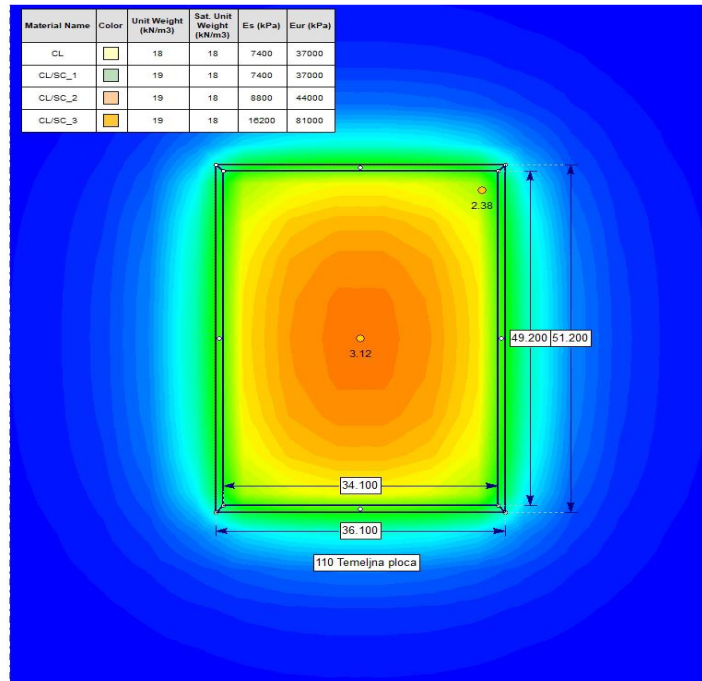


Slika 24. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla



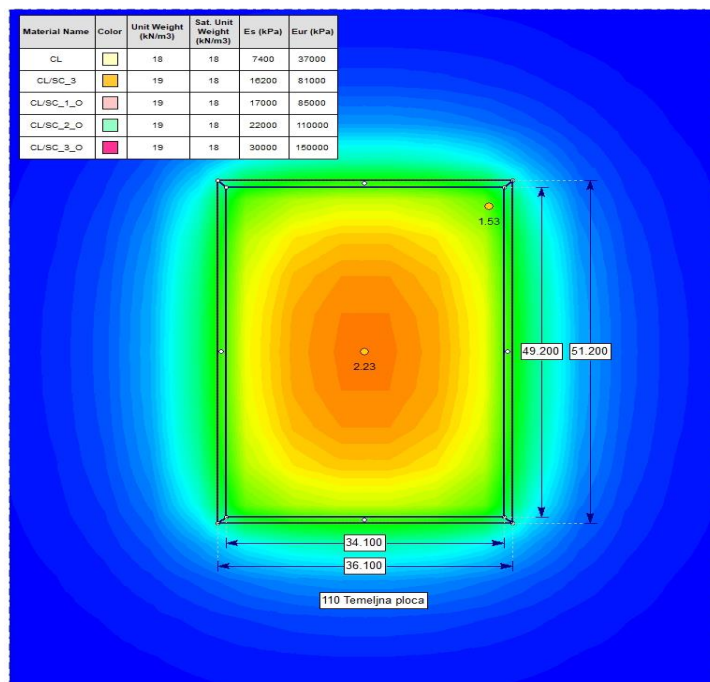
Objekt 110 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 25):
  - središnja točka:  $w = 3,12$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 2,38$  cm,



Slika 25. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

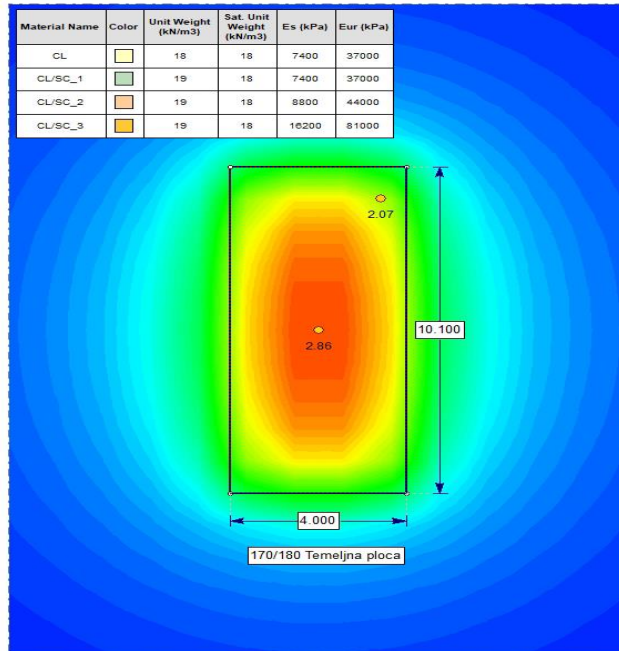
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 26):
  - središnja točka:  $w = 2,23$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,53$  cm.



Slika 26. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

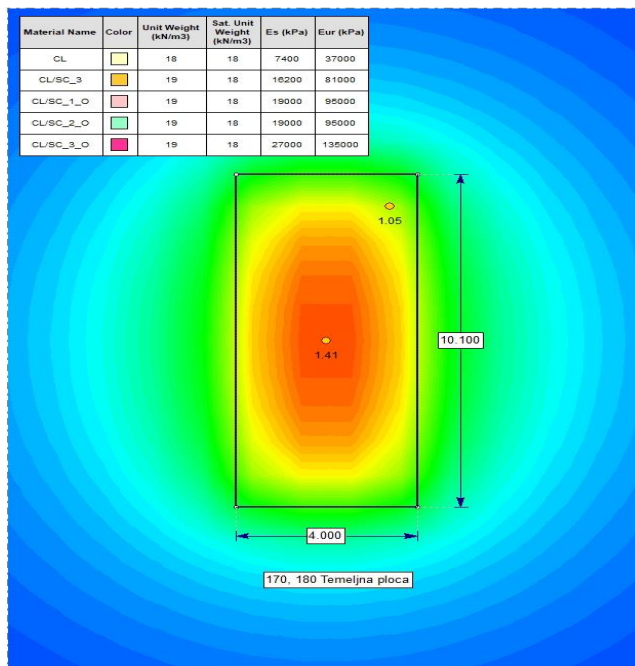
Objekt 170/180 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 27):
  - središnja točka:  $w = 1,86$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 2,07$  cm,



Slika 27. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

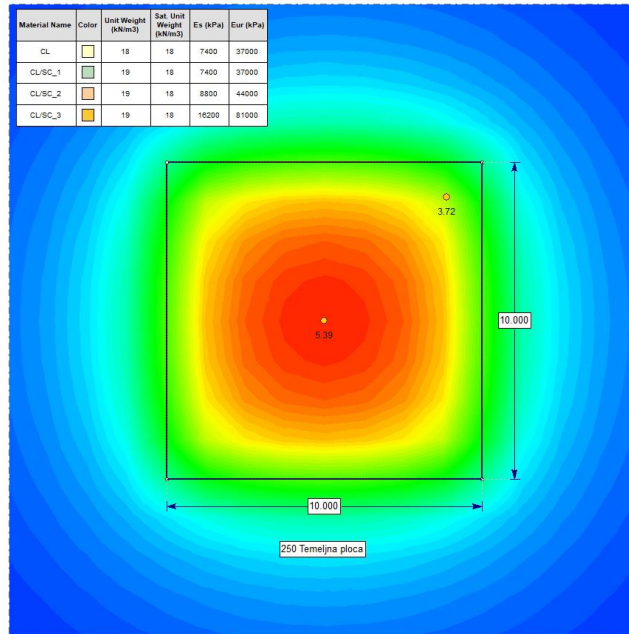
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 28):
  - središnja točka:  $w = 1,41$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,05$  cm.



Slika 28. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

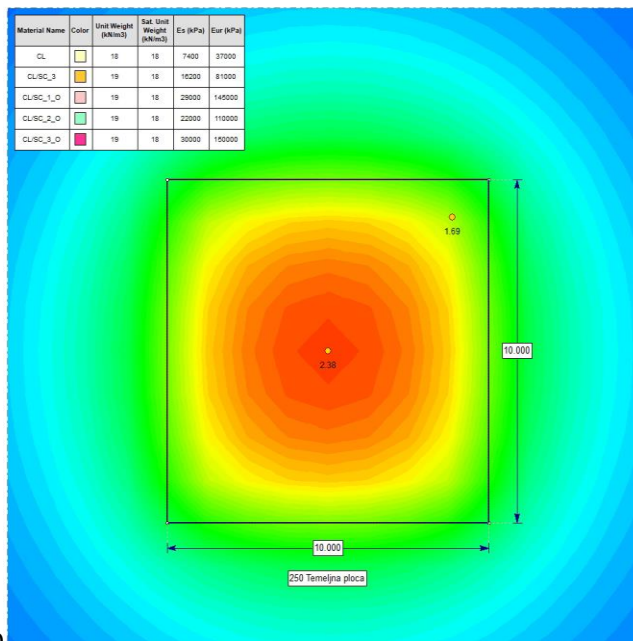
Objekt 250 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 29):
  - središnja točka:  $w = 5,39$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 3,72$  cm,



Slika 29. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 30):
  - središnja točka:  $w = 2,38$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,69$  cm.

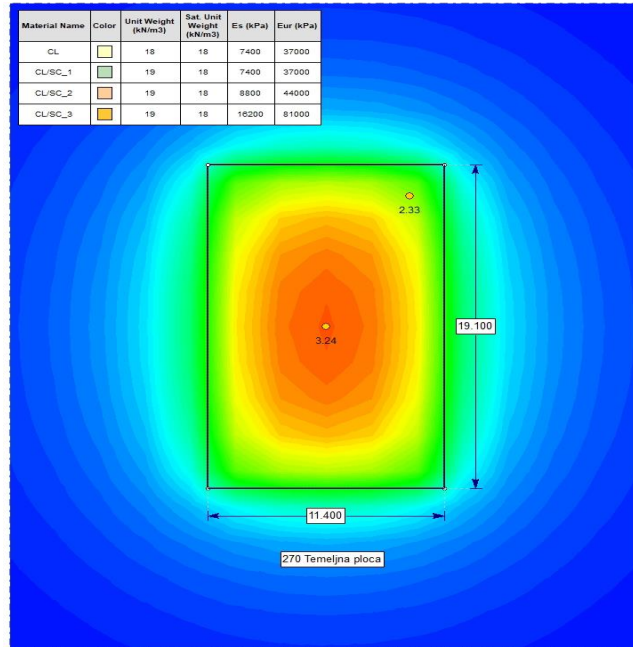


9

Slika 30. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

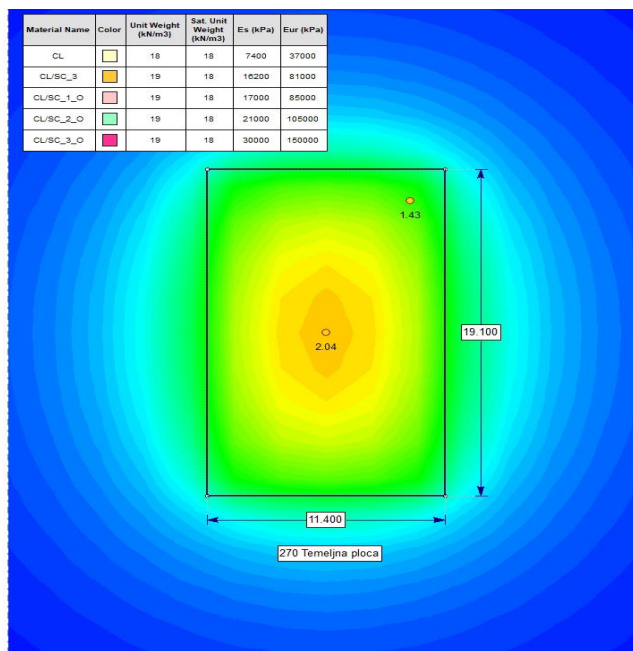
Objekt 270 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 31):
  - središnja točka:  $w = 3,24$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 2,33$  cm,



Slika 31. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

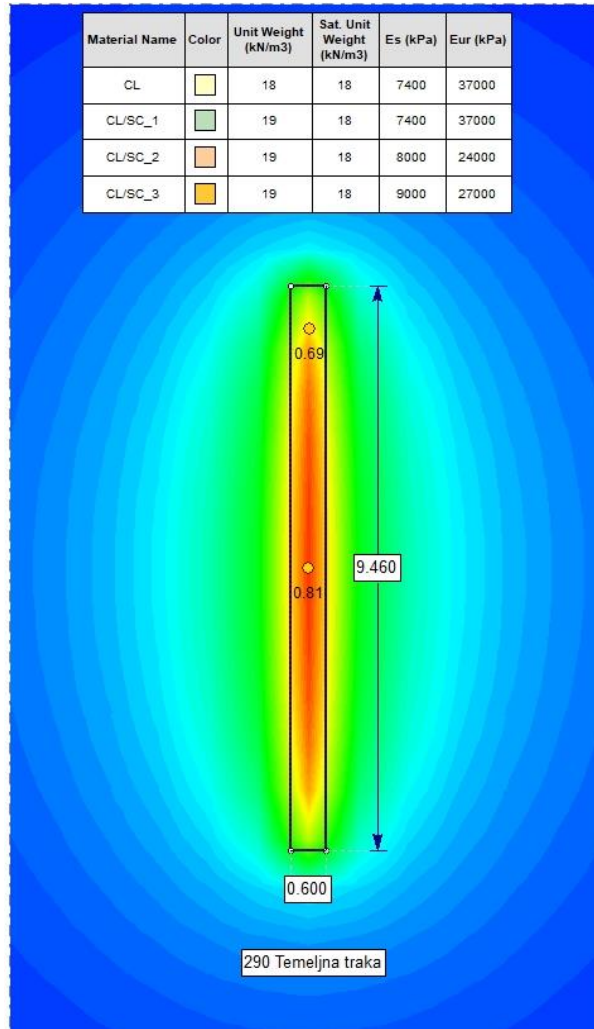
- vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla (slika 32):
  - središnja točka:  $w = 2,04$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 1,43$  cm.



Slika 32. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla

Objekt 290 – temeljna ploča:

- vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla (slika 33):
  - središnja točka:  $w = 0,81$  cm,
  - karakteristična točka:  $w = 0,69$  cm.



Slika 33. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla

U tablici 38 prikazane su vrijednosti slijeganja koje su dobivene računalno a prikazuju vrijednosti prije i nakon poboljšanja tla ispod objekata.

Tablica 38. Vrijednosti slijeganja ispod objekata prije i nakon poboljšanja tla

Objekt	Ne poboljšano tlo		Poboljšano tlo	
	Slijeganje u središnjoj točki	Slijeganje u karakterističnoj točki	Slijeganje u središnjoj točki	Slijeganje u karakterističnoj točki
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
<b>010, 400 - ploča</b>	2,11	1,45	1,91	1,27
<b>010 - ploča</b>	1,35	0,96	1,35	0,96
<b>030 - ploča</b>	0,92	0,57		
<b>030 - traka</b>	2,74	2,12	2,09	1,6
<b>040, 085 - ploča</b>	0,85	0,61		
<b>060, 080 - traka</b>	3,98	3,28	2,02	1,67
<b>060, 080 - ploča</b>	3,23	2,48	1,19	0,92
<b>110 - ploča</b>	3,12	2,38	2,23	1,53
<b>170, 180 - ploča</b>	2,86	2,07	1,41	1,05
<b>250 - ploča</b>	5,39	3,72	2,38	1,69
<b>270- ploča</b>	3,24	2,33	2,04	1,43
<b>290 - traka</b>	0,81	0,69		

S obzirom na činjenicu da je za zadovoljenje projektnih kriterija nosivosti i slijeganja bilo potrebno dodatno ojačati šljunčane pilote cementom, oni nisu bili u mogućnosti osigurati ubrzanje slijeganja temeljnog tla.

Općenito, kada šljunčani piloti nemaju u sebi komponentu cementa, oni osim samog ojačanja temeljnog tla, služe i kao vertikalni drenovi. Na taj način oni omogućavaju ubrzanje konsolidacionih procesa u kontinuumu slabo propusnog tla.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je prikaz postupaka ojačanja tla primjenom šljunčanih pilota generalno i konkretno za objekt UPOV u Virovitici. Na predmetnoj lokaciji provedeni su geotehnički istražni radovi, karakterizacija tla i geostatički proračuni u koje se ubraja proračun nosivosti šljunčanih pilota i proračun slijeganja prije i nakon poboljšanja tla.

Šljunčani piloti predstavljaju dubinsku metoda poboljšanja tla. Kod primjene koristi se tzv. vibrator koji se utiskuje u tlo. Šljunčani piloti pogodni su kod koherentnih materijala i nekoherentnih materijala s udjelom finih čestica < 10 %. Izvedba šljunčanih pilota kreće spuštanjem vibratora u tlo do projektirane dubine. Dolaskom do projektirane dubine kreće se sa usipavanjem i zbijanjem kamenog materijala. Najčešće vrste ugradnje su mokra ugradnja s vrha i suha ugradnja s dna gdje svaka koristi vibrator određene izvedbe.

U svrhu istražnih radova izvedene su tri istražne bušotine dubine 15,0 m i dvije dubine 6,0 m kako bi se mogla provesti kategorizacija vrste tla i njegovih osnovnih fizikalno-mehaničkih svojstava. Prema izvedenim istražnim radovima tlo je građeno od pretežito pjeskovito - glinenog materijala niske plastičnosti.

Geostatičkim proračunima dobivene su vrijednosti nosivosti šljunčanog pilota na razmaku od 2,0 m i 2,5 m te vrijednosti stupnja poboljšanja tla. Nosivost šljunčanih pilota na 2,0 m razmaka iznosi 460,39 kN/m<sup>2</sup> dok je za šljunčane pilote na 2,5 m razmaka 443,42 kN/m<sup>2</sup>.

Na temelju dobivenih podataka provedena je procjena slijeganja pomoću Priebeove metode i računalnim softverom Settle 3D, Rocscience. Dobivene vrijednosti slijeganja prikazane su u poglavlju 4.2.3. i 4.2.4. . Mogu se vidjeti različite vrijednosti slijeganja između Priebeove metode i Settle 3D softvera koje ukazuju na nedostatke Priebeove metode koji se odnose na pretpostavke vezane za teoriju jedinične ćelije i dubinskog faktora  $f_D$  a na koje su ukazali Bouassida et al.

Generalno primjena šljunčanih pilota je optimalna na nizu međusobno različitih inženjerskih zadataka. U konkretnom slučaju UPOV Virovitica postignuta je zahtijevana krutost, ali i čvrstoća temeljnog tla, kako bi se ispunili uvjeti s obzirom na granična stanja sloma i uporabivosti predmetnih objekata.

## 6. LITERATURA

1. Bachus, R. C., Barksdale, R. D (1983.). DESIGN AND CONSTRUCTION OF STONE COLUMNS VOL. 1. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
2. Bouassida, M., Ellouze, S., Hazzar, L. (2008.) Investigating Priebe's method for settlement estimation of foundation resting on soil reinforced by columns. Conference Paper.
3. CIVIL PLANETS. What is Foundation Settlement? – Types & Causes (Online). Dostupno na: [https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible\\_settlement\\_of\\_the\\_foundation](https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible_settlement_of_the_foundation) .(12.8.2021.)
4. Ebrary. The Terzaghi consolidation theory (Online). Dostupno na: [https://ebrary.net/135633/engineering/terzaghi\\_consolidation\\_theory](https://ebrary.net/135633/engineering/terzaghi_consolidation_theory) . (12.8.2021.)
5. Keller (2019.). Vibro techniques brochure keller uk (Online). Dostupno na: <https://www.keller.co.uk/sites/keller-uk/files/2019-03/vibro-techniques-brochure-keller-uk.pdf> .(12.8.2021.)
6. Khalilpasha, M., Sayar, A. (2012.). Soil improvement Using Vibro Replacement Technique. Advances in Environmental Biology, 6(2): 658-661, 2012.
7. Kirsch, F., Kirsch K. (2010.). GROUND IMPROVEMENT BY DEEP VIBRATORY METHODS. Spon Press, New York.
8. Majes, B., Pulko B. (2006.). Analytical method for the analysis of stone-columns according to the Rowe dilatancy theory. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Jamova, Ljubljana, Slovenija.
9. Nossan-Szavtis, V. (2010.) Procesi tečenja u tlu i stijeni. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
10. Piccinini, I. (2015.) Ground Improvement with Stone Columns - Methods of Calculating Settlement Improvement Factor. University of Glasgow, School of Engineering, MSc. Civil Engineering, Glasgow.
11. Priebe, J. H. (1995.). The design of vibro replacement. Keller Grundbau GmbH, Kaiserleistr, Offenbach.
12. Wang, G. (2009.). Consolidation of Soft Clay Foundations Reinforced by Stone Columns under Time-Dependent Loadings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135(12).



## 7. POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste slijeganja ( <a href="https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible_settlement_of_the_foundation">https://civilplanets.com/settlement-of-foundation/#Permissible_settlement_of_the_foundation</a> , 2021.) .....	2
Slika 2. Ilustracija konsolidacije tla .....	4
Slika 3. Element tla u sloju debljine 2d (Nossan-Szavtis, 2010.) .....	5
Slika 4. Raspodjela pornog tlaka u u vremenu ( <a href="https://ebrary.net/135633/engineering/terzaghi_consolidation_theory">https://ebrary.net/135633/engineering/terzaghi_consolidation_theory</a> ) .....	6
Slika 5. Mohrove kružnice naprezanja .....	7
Slika 6. Primjena određene metode u ovisnosti o vrsti tla (prema Khalilpasha i Sayar, 2012.) .....	8
Slika 7. a) vibrator za mokru ugradnju s vrha b) vibrator za suhu ugradnju s dna (Keller, 2019.) .....	9
Slika 8. a) mokra ugradnja s vrha b) suha ugradnja s dna (prema Kirsch i Kirsch, 2010.) .....	10
Slika 9. Raspored šljunčanih pilota: a) trokutasti b) pravokutni (prema Wang, 2009.) .....	11
Slika 10. Koncept jedinične ćelije (prema Bachus i Barksdale, 1983.) .....	11
Slika 11. Aproksimacija zone utjecaja s kružnicom (Majes i Pulko, 2006.) .....	12
Slika 12. Veza faktora ojačanja i $A/A_c$ (prema Priebe, 1995.) .....	14
Slika 13. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	32
Slika 14. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	32
Slika 15. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	33
Slika 16. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	33
Slika 17. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	34
Slika 18. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	35
Slika 19. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	35
Slika 20. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	36
Slika 21. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	37
Slika 22. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	37
Slika 23. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	38
Slika 24. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	38
Slika 25. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	39
Slika 26. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	39
Slika 27. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	40
Slika 28. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	40
Slika 29. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	41
Slika 30. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	41
Slika 31. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	42
Slika 32. Vrijednosti slijeganja ispod objekta nakon poboljšanja tla .....	42
Slika 33. Vrijednosti slijeganja ispod objekta prije poboljšanja tla .....	43

## 8. POPIS TABLICA

Tablica 1. Opis temeljnog tla.....	18
Tablica 2. Dimenzije, dubina temeljenja i opterećenja objekata .....	19
Tablica 3. Ulazni parametri tla .....	22
Tablica 4. Ulazni parametri šljunčanih pilota .....	22
Tablica 5. Proračun nosivosti šljunčanog pilota.....	22
Tablica 6. Ulazni parametri tla .....	23
Tablica 7. Ulazni parametri šljunčanih pilota .....	23
Tablica 8. Proračun nosivosti šljunčano pilota.....	23
Tablica 9. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	24
Tablica 10. Ulazni parametri proračuna .....	24
Tablica 11. Dobiveni parametri proračuna .....	24
Tablica 12. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	24
Tablica 13. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	25
Tablica 14. Ulazni parametri proračuna .....	25
Tablica 15. Dobiveni parametri proračuna .....	25
Tablica 16. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	25
Tablica 17. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	26
Tablica 18. Ulazni parametri proračuna .....	26
Tablica 19. Dobiveni parametri proračuna .....	26
Tablica 20. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	26
Tablica 21. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	27
Tablica 22. Ulazni parametri proračuna .....	27
Tablica 23. Dobiveni parametri proračuna .....	27
Tablica 24. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	27
Tablica 25. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	28
Tablica 26. Ulazni parametri proračuna .....	28
Tablica 27. Dobiveni parametri proračuna .....	28
Tablica 28. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	28
Tablica 29. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	29
Tablica 30. Ulazni parametri proračuna .....	29
Tablica 31. Dobiveni parametri proračuna .....	29
Tablica 32. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	29
Tablica 33. Parametri slojeva prije ojačanja tla .....	30
Tablica 34. Ulazni parametri proračuna .....	30
Tablica 35. Dobiveni parametri proračuna .....	30
Tablica 36. Parametri slojeva nakon ojačanja tla .....	30
Tablica 37. Vrijednosti slijeganja ispod objekata prije i nakon poboljšanja tla ..	31
Tablica 38. Vrijednosti slijeganja ispod objekata prije i nakon poboljšanja tla ..	44

# 9. PRILOZI

## PRILOG BR. 1 – SITUACIJSKI FAZA 1

