

Poboljšanje tla prefabriciranim vertikalnim drenovima

Baranašić, Tena

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:130:885740>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-09**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

TENA BARANAŠIĆ

**POBOLJŠANJE TLA PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM
DRENOVIMA**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 15.07.2021. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 01.07.2021.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Sanja Kováč

Članovi povjerenstva

- 1) Izv. prof. dr. sc. Boris Karur
- 2) Dr. sc. Jasmin Jug
- 3) Prof. dr. sc. Stjepan Štelec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**POBOLJŠANJE TLA PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM
DRENOVIMA**

KANDIDAT:

TENA BARANAŠIĆ



MENTOR:

izv.prof.dr.sc. BORIS KAVUR

KOMENTOR:

dr.sc. JASMIN JUG

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: TENA BARANAŠIĆ
Matični broj: 252 - 2019./2020.
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

POBOLJŠANJE TLA PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM DRENOVIMA


- Rad treba sadržati:
1. Uvod
 2. Poboljšanje sitnozrnatog tla konsolidacijom
 3. Ubrzanje konsolidacije prefabriciranim vertikalnim drenovima
 4. Općenito o izvedbi prefabriciranih vertikalnih drenova
 5. Primjer projekta poboljšanja tla prefabriciranim vertikalnim drenovima
 6. Zaključak
 7. Popis literature
 8. Popis slika
 9. Popis tablica

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

Zadatak zadan: 08.03.2021.

Rok predaje: 01.07.2021.

Mentor:


Izv.prof.dr.sc. Boris Kavur

Drugi mentor/komentor: Predsjednik Odbora za nastavu:


Dr.sc. Jasmin Jug


Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

Poboljšanje tla prefabriciranim vertikalnim drenovima

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **izv.prof.dr.sc. Borisa Kavura i komentora dr.sc. Jasmina Juga.**

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, *23.06.2011.*

Tena Baranašić



(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 prefabriciranim vertikalnim drenovima

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, 23.06.2021.

Izv.prof.dr.sc. Boris Kavur

(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Borisu Kavuru i komentoru dr. sc. Jasminu Jugu na stručnoj pomoći te uloženom vremenu i trudu prilikom izrade ovog rada. Veliku zahvalnost također iskazujem mr. sc. Krešimiru Bolanči dipl. ing. građ. i njegovoj tvrtki KREŠO GEO d.o.o. na svesrdnoj pomoći, velikom trudu i pruženom primjeru projekta poboljšanja propusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima koji je korišten i prikazan u praktičnom dijelu ovog rada.

SAŽETAK

Ime i prezime: Tena Baranašić

Naslov rada: Poboljšanje tla prefabriciranim vertikalnim drenovima

U ovom radu prikazan je koncept poboljšanja tla prefabriciranim vertikalnim drenovima. Rad započinje problematikom mekanog sitnozrnatog zasićenog tla u kojoj je opisano ponašanje istog prilikom apliciranja opterećenja. Prezentirana je teorija radijalne konsolidacije tla vertikalnim drenovima, karakteristične dimenzije dreva te utjecaj poremećaja tla koji nastaje u procesu utiskivanja drenova. Opisana je izvedba prefabriciranih vertikalnih drenova (PVD) i načini određivanja projektnih parametara tla. Prikazan je odabir vrste PVD-a te faktori koji utječu na odabir. Opisuje se određivanje dubine, razmaka i rasporeda drenova te sam postupak ugradnje i kontrole ove metode poboljšanja tla. U 5. poglavlju rada prikazan je primjer projekta poboljšanja tla prefabriciranim vertikalnim drenovima te rezultati opažanja slijeganja u fazi predopterećenja nasipom na temelju kojih je verificirano projektno rješenje poboljšanja tla i donijeta odluka o uklanjanju predopterećenja.

Ključne riječi: prefabricirani vertikalni drenovi, konsolidacija, poboljšanje tla

ABSTRACT

Name and surname: Tena Baranašić

Title: Soil improvement by prefabricated vertical drains

This paper presents the concept of soil improvement by means of prefabricated vertical drains. It begins with the problem of soft fine-grained saturated soil and its behaviour is described during load application. The theory of radial soil consolidation with vertical drains, characteristic dimensions of the drain and the influence of soil disturbances that occur in the process of drain insertion are presented. The design of prefabricated vertical drains (PVD) and methods for determining the design parameters of the soil are also described. The selection of the type of PVD and factors which influence their selection are presented. The determination of depth, distance and pattern of drains is described, as well as the process of installation and quality control for this method of soil improvement. Chapter 5 presents an example of soil improvement by means of prefabricated vertical drains and results of soil settlements obtained during a preload phase., Based on this, the solution for soil improvement was verified and a decision on preload removal was made.

Key words: prefabricated vertical drains, consolidation, soil improvement

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POBOLJŠANJE SITNOZRNATOG TLA KONSOLIDACIJOM	2
2.1. Proces konsolidacije u sitnozrnatom zasićenom tlu.....	2
3. UBRZANJE KONSOLIDACIJE PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM DRENOVIMA	3
3.1. Analiza i teorija procesa konsolidacije tla vertikalnim drenovima	5
4. OPĆENITO O IZVEDBI PREFABRICIRANIH VERTIKALNIH DRENOVA ...	14
4.1. Određivanje projektnih parametara.....	14
4.2. Vrste prefabriciranih vertikalnih drenova	17
4.3. Faktori koji utječu na odabir PVD-a	20
4.3.1. Kapacitet odvodnje.....	20
4.3.2. Veličina pora filtra	22
4.3.3. Vlačna čvrstoća	23
4.4. Raspored, dubina ugradnje i razmak između PVD-ova	24
4.4.1. Mjerenje dubine ugradnje PVD-a	24
4.4.1.1. Digitalizirani PVD	25
4.4.1.2. PVD s dvije žice.....	26
4.4.1.3. PVD s jednom žicom	27
4.5. Ugradnja PVD-a.....	28
4.6. Kontrola poboljšanja tla	32
5. PRIMJER PROJEKTA POBOLJŠANJA TLA PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM DRENOVIMA	34
5.1. Tehnički opis.....	34
5.1.1. Uvod.....	34
5.1.2. Opis objekta	35
5.1.3. Inženjersko geološke karakteristike lokacije	36
5.1.4. Sastav i karakteristike tla	37
5.2. Tehnički uvjeti izvedbe, program kontrole i osiguranja kvalitete.....	41
5.2.1. Tehničko rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije.....	41
5.2.2. Vertikalni drenovi od polipropilena	43
5.2.2.1. Općenito	43
5.2.2.2. Način djelovanja i upotreba vertikalnih drenova	43
5.2.2.3. Zahtjevi za drenove i kontrola kvalitete proizvoda.....	44

5.2.2.4. Način ugradnje drenova	45
5.2.3. Redoslijed izrade zahvata poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije	45
5.2.4. Opažanje slijeganja	47
5.3. Geotehnički proračuni	47
5.3.1. Proračuni slijeganja	47
5.3.2. Vremenski tijek slijeganja tla uz radijalno dreniranje.....	48
5.3.3. Provjera dubine utjecaja opterećenja na slijeganje tla	52
5.4. Rezultati opažanja slijeganja i ocjena poboljšanja tla.....	53
6. ZAKLJUČAK.....	58
7. POPIS LITERATURE.....	59
8. POPIS SLIKA	61
9. POPIS TABLICA.....	63

1. UVOD

Velika stišljivost i vrlo niska nosivost karakteristična su za meka, koherentna tla sa visokim sadržajem gline i praha. Takva tla posjeduju loša geotehnička svojstva poput visokog sadržaja vlage (blizu granice tečenja), malu nedreniranu posmičnu čvrstoću i nisku hidrauličku provodljivost. Stoga, ako nisu poduzete određene metode poboljšanja svojstava tla, konstrukcije izgrađene na takvom tlu suočavati će se s problemima stabilnosti i uporabivosti. Cilj poboljšanja mekog tla je najčešće prekonsolidirati tlo do razine da buduća dodatna opterećenja budu manja od napona prekonsolidacije. Konsolidacijom se povećava gustoća, posmična čvrstoća i krutost tla. U određenim uvjetima temeljnog tla ostvarenje predviđenih slijeganja traje neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje te je potrebno ubrzati proces slijeganja, odnosno konsolidacije tla. Najjednostavnija metoda ubrzanja konsolidacije je privremeno predopterećenje. Kod slabe propusnosti tla i dugih puteva dreniranja u tlo se prije predopterećenja ugrađuju vertikalni drenovi pri čemu se skraćuje put vodi u tlu, što dovodi do skraćivanja vremenskog procesa konsolidacije tla. Vertikalni drenovi se uspješno koriste u mnogim poboljšanjima tla i projektima melioracije u svijetu, a teorija i mehanizam djelovanja biti će prikazani u ovome radu.

2. POBOLJŠANJE SITNOZRNATOG TLA KONSOLIDACIJOM

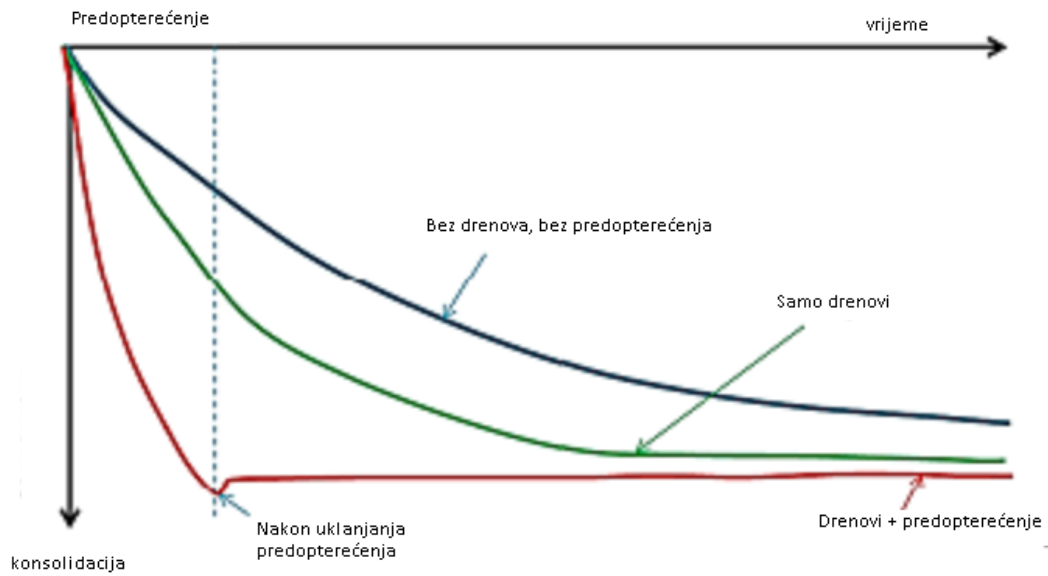
Mekana, koherentna, sitnozrnata tla, kao što su podkonsolidirane ili normalno konsolidirane do blago prekonsolidirane gline i prahovi, odlikuje vrlo niska nosivost i velika stišljivost (Kavur, 2018). Prilikom apliciranja opterećenja na površinu takvog tla dolazi do porasta tlaka vode u porama. Ako je porast opterećenja, a time i porast pornog tlaka, relativno brz i značajan to lako može dovesti do sloma mekanog tla i značajnih posmičnih deformacija (Kavur, 2018).

2.1 Proces konsolidacije u sitnozrnatom zasićenom tlu

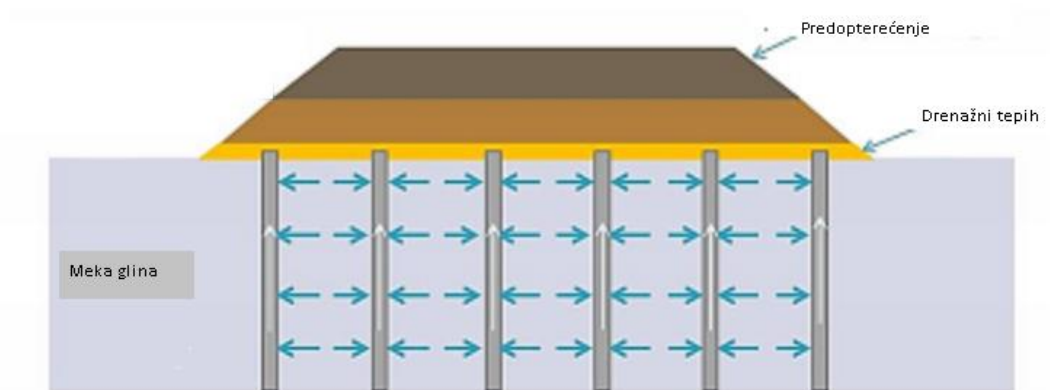
U zasićenom tlu efektivna naprezanja među česticama tla jednaka su razlici ukupnog naprezanja u tlu i pornog tlaka (Kavur, 2018). Koherentna zasićena tla mogu se slijegati samo na račun otjecanja porne vode jer su čestice tla i voda nestlačivi (Gotić R. i Gotić I., 2000). Prilikom nanošenja opterećenja, dodatno opterećenje će se prvo manifestirati kroz porast pornog tlaka vode među česticama. Porast pornog tlaka u opterećenoj zoni uzrokuje kretanje vode prema zonama s nižim pornim tlakom. Takav proces istiskivanja vode iz sitnozrnatog tla nazivamo primarnom konsolidacijom (Kavur, 2018). Kako narasli porni tlak u tlu postupno opada, tako raste efektivno naprezanje među česticama tla. Proces završava disipacijom suviška pornog tlaka nakon kojeg čestice tla preuzmu ukupno vanjsko opterećenje, odnosno efektivno naprezanje naraste za ukupnu vrijednost vanjskog opterećenja (Vitković, 2016). Konsolidacijom tla povećavaju se gustoća, posmična čvrstoća i krutost, a to su najčešće i ciljevi poboljšanja ovakvog tla. Tlo „pamti“ maksimalno opterećenje kojem je bilo podvrgnuto tijekom svoje geološke prošlosti. Takvo se opterećenje naziva napon prekonsolidacije. Slijeganje tla je pri opterećenjima koja su niža od napona prekonsolidacije prihvatljivog iznosa za većinu inženjerskih konstrukcija, stoga je cilj poboljšanja prekonsolidirati sitnozrnato tlo tako da buduća dodatna opterećenja u tlu budu niža od napona prekonsolidacije. Tlo se pod opterećenjem postupno deformira smanjenjem pornog prostora te deformiranjem samih čestica tla. Smanjenjem pornog prostora smanjuje se i njegova propusnost. Vodopropusnost sitnozrnatog tla je općenito vrlo niska te će i proces konsolidacije pri dugim putevima dreniranja biti posljedično spor. Zbog toga je obično nužno poduzimati mjere za ubrzanje procesa konsolidacije.

3. UBRZANJE KONSOLIDACIJE PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM DRENOVIMA

Jedna od najčešćih i ekonomski najisplativijih metoda poboljšanja tla konsolidacijom je predopterećenje (Holtz, 1987). Predopterećenje podrazumijeva izgradnju privremenog nasipa kako bi se ubrzala primarna konsolidacija te smanjila slijeganja ispod buduće konstrukcije. Međutim, glavno ograničenje predopterećenja je vrijeme potrebno za postizanje potrebnog stupnja konsolidacije. Upravo zbog tog ograničenja ova se metoda gotovo u svim uvjetima upotrebljava u kombinaciji sa vertikalnim drenovima (Sakleshpur i sur. 2018). Brzina procesa konsolidacije ovisi s jedne strane o vodopropusnosti tla, a s druge o duljini puta dreniranja. Predopterećenje vertikalnim drenovima ubrzava primarnu konsolidaciju mekog tla zbog dva mehanizma. Prvo, drenovi se ugrađuju na maloj međusobnoj udaljenosti pa je time i maksimalna duljina puta dreniranja vode smanjena na polovicu njihovog razmaka. Drugo, ugradnjom drenova smjer tečenja porne vode mijenja se iz vertikalnog u radijalno (Slika 2.). Većina sedimentnih naslaga pokazuje anizotropiju s obzirom na hidrauličku provodljivost na takav način da je horizontalna komponenta provodljivosti najmanje dvostruko veća od vertikalne komponente (Sakleshpur i sur. 2018). Dakle, koeficijent konsolidacije za protok porne vode u horizontalnom smjeru je veći od onog u vertikalnom smjeru. Zbog ova dva efekta, vrijeme potrebno za postizanje potrebnog stupnja konsolidacije se u ovom slučaju smanjuje na nekoliko mjeseci, umjesto da traje desetljećima korištenjem samog predopterećenja (Sakleshpur i sur. 2018). Vertikalni drenovi se uspješno koriste u mnogim poboljšanjima tla i projektima melioracije u svijetu, a njihova upotreba prvi put je patentirana 1926. godine od strane Daniela D. Morana (Chu i Raju, 2013). Tada su se vertikalni drenovi ugrađivali u tlo sipanjem pijeska izravno u vertikalne bušotine ili prvo u "čarapu" od geosintetičke tkanine ili geotekstila koja se spušta u bušotinu. Prefabricirani vertikalni drenovi (PVD) izgrađeni od drva i kartona razvijeni su 1947. godine od strane Waltera Kjellmana.



Slika 1. Tipične krivulje vremenskog slijeganja tla za različite situacije (prema Sakleshpur i sur. 2018)



Slika 2. Radijalno dreniranje tla vertikalnim drenovima tijekom preopterećenja (prema Sakleshpur i sur. 2018)

3.1. Analiza i teorija procesa konsolidacije tla vertikalnim drenovima

Pri odabiru vrste PVD-a prilikom ove metode poboljšanja potrebno je odgovoriti na pitanja poput:

Koliki je razmak između drenova potreban za postizanje potrebnog stupnja konsolidacije unutar određenog vremena?

Koliko je vremena potrebno da se postigne traženi stupanj konsolidacije za zadani razmak između drenova?

Da bismo odgovorili na ova pitanja potrebno je poznavanje teorije konsolidacije. Najosnovnija teorija konsolidacije je Terzaghijeva jednodimenzionalna jednačba konsolidacije, koja se može zapisati kao:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (1)$$
$$c_v = \frac{k_v}{m_v \gamma_w}$$

gdje su:

c_v - koeficijent konsolidacije tla u vertikalnom smjeru,

u_e - suvišak poreznog tlaka vode u porama tla,

t - stvarno vrijeme,

z - položaj elementa tla,

k_v - koeficijent propusnosti tla u vertikalnom smjeru,

$m_v = \Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma_v$ je koeficijent vertikalne kompresije

γ_w - zapreminska težina vode.

Jednadžba (1) izvedena je pod pretpostavkom da je kretanje vode samo u okomitom smjeru, tj. može se primijeniti samo u slučaju konsolidacije sa vertikalnim dreniranjem. Međutim, upotrebom PVD-ova otvara se mogućnost dreniranja vode u horizontalnom smjeru. U tom je slučaju potrebno razmatranje radijalne konsolidacije (Barron, 1948):

$$c_h \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2)$$

$$c_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w}$$

gdje su:

c_h - koeficijent konsolidacije tla u horizontalnom smjeru,

k_h - koeficijent vodopropusnosti tla u horizontalnom smjeru.

Jednadžba (2) izvedena je pod pretpostavkama da se sva vertikalna opterećenja u početku prenose porastom tlaka vode u porama i da se sve tlačne deformacije unutar tla javljaju u okomitim smjerovima. Kombinacijom vertikalnog i horizontalnog dreniranja, jednadžba postaje (Carillo, 1942):

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} + c_h \left(\frac{\partial^2 u_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_e}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (3)$$

Za poboljšanje tla procjenjuje se napredak konsolidacije koristeći stupanj postignute konsolidacije U :

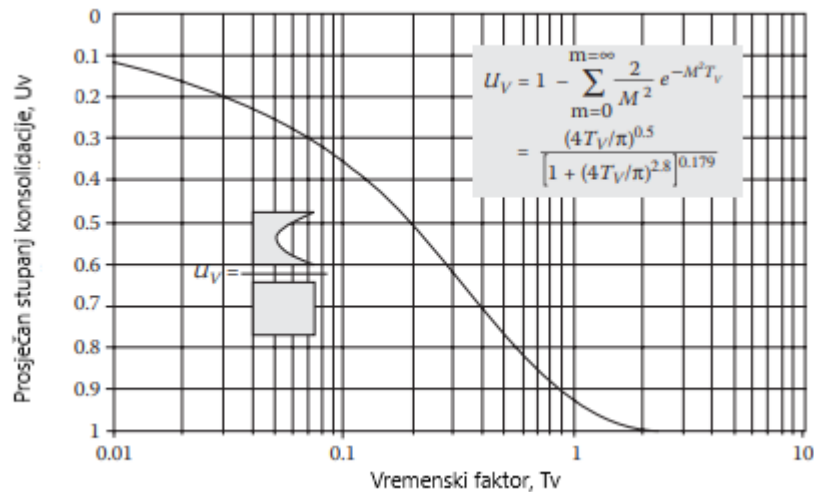
$$U = \frac{S_{C(t)}}{(S_C)_{ult}} 100\% \quad (4)$$

gdje je $S_c(t)$ trenutna vrijednost konsolidacije, a $(S_c)_{ult}$ konačna vrijednost konsolidacije.

Koristeći Terzaghijevu jednadžbu konsolidacije (1) i pretpostavljajući oblik početne raspodjele tlaka vode u porama, veza između prosječnog stupnja konsolidacije U_v i vremenskog faktora $T_v = c_v t / H_d^2$ može se odrediti kao što je prikazano na Slici 3 ili može biti izražena jednadžbom krivulje. Jednu od jednadžbi zatvorenog oblika predložili su Sivaram i Swamee (1997):

$$U_v = \frac{S_c(t)}{(S_c)_{ult}} 100\% = \frac{(4T_v/\pi)^{0.5}}{[1 + (4T_v/\pi)^{2.8}]^{0.179}} \quad (5)$$

gdje je U_v prosječan stupanj konsolidacije uslijed vertikalnog dreniranja vode.



Slika 3. Odnos između prosječnog stupnja konsolidacije U_v i vremenskog faktora T_v izveden na temelju rješenja jednadžbe (1) (prema Bo i sur. 2003)

Za radialnu konsolidaciju Barron (1948) je dao sljedeća rješenja uvažavajući pretpostavke prihvaćene za jednadžbu (1):

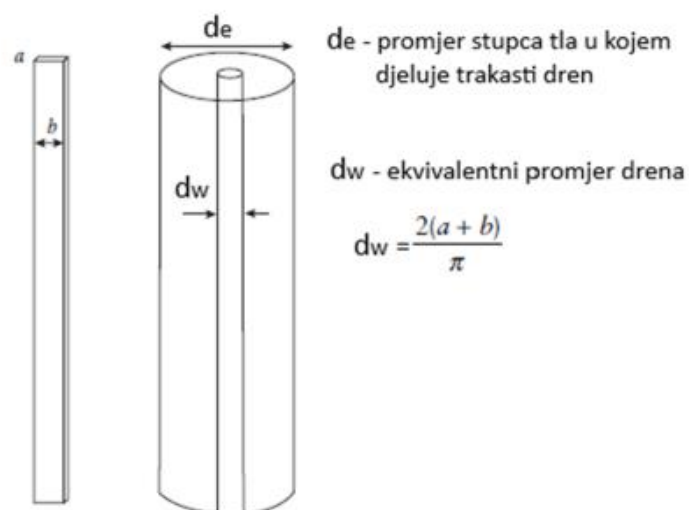
$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n)}\right] \quad (6a)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \ln(n) - \frac{(3n^2 - 1)}{4n^2} \approx \ln(n) - 0.75 \quad (6b)$$

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} \quad (6c)$$

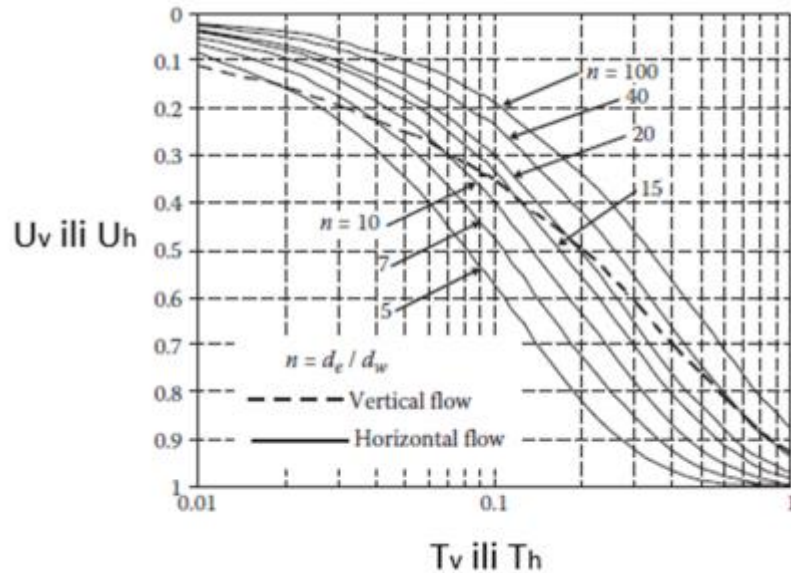
$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (6d)$$

gdje je T_h vremenski faktor, n je omjer između promjera stupca tla u kojem djeluje trakasti dren, d_e i ekvivalentnog promjera drena, d_w , kao što je prikazano na slici 4. Na ovoj su slici a i b debljina i širina drena.



Slika 4. Karakteristične dimenzije trakastog PVD-a (Chu i Raju, 2013)

Odnos između stupnja postignute konsolidacije (U_h ili U_v) i vremenskog faktora (T_h ili T_v) za različite vrijednosti geometrijskog parametra n (omjer promjera cilindra tla pod djelovanjem drena i ekvivalentnog promjera trakastog drena) prikazan je dijagramom na slici 5.



Slika 5. Odnos između stupnja postignute konsolidacije (U_h ili U_v) i vremenskog faktora (T_h ili T_v) za različite vrijednosti geometrijskog parametra n (Bo i sur. 2003)

Prikazana krivulja na slici 3. za vertikalni tok također je dana za usporedbu. Međutim, treba napomenuti da PVD trakasti dren nije kružnog poprečnog presjeka već pravokutnog. Ima tipičnu širinu od 100 mm i debljinu od 3-6 mm. Da bi se jednadžbe (6) mogle koristiti potrebno je uvesti ekvivalentni promjer drena d_w . Metodu koja se temelji na jednakom opsegu predložio je Hansbo (1979):

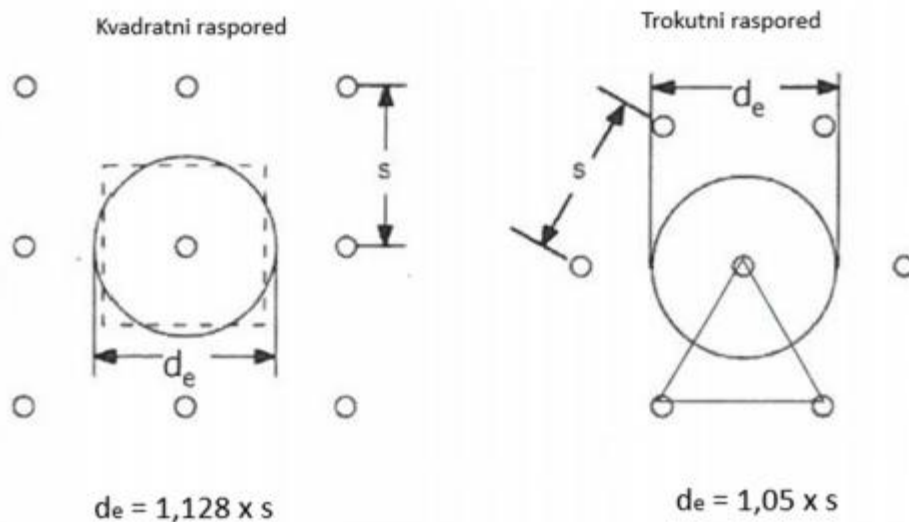
$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (7)$$

Karakteristični promjer stupca tla koji je izložen djelovanju drena, d_e , ovisi o razmaku i tipu drena. D_e se izračunava na temelju ekvivalentne površine presjeka. Za drenove ugrađene u kvadratnom tlocrtnom rasporedu na razmaku s kao što je prikazano na slici 6, d_e se može odrediti kao:

$$s^2 = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad d_e = 1.128s \quad (8)$$

Za drenove ugrađene u trokutnom tlocrtnom rasporedu, prikazano na slici 6, d_e se može odrediti kao:

$$s^2 \sin 60^\circ = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad d_e = 1.05s \quad (9)$$



Slika 6. Kvadratni i trokutni raspored drenova i karakterističan promjer stupca tla d_e (Hansbo, 1993)

Kod relativno velikih duljina PVD-ova, konsolidacija gline kontrolirana je horizontalnom (radijalnom) drenažom. Međutim, kod relativno malih duljina PVD-ova, dreniranje se odvija u vertikalnom i horizontalnom smjeru. U ovom slučaju kombinirani stupanj konsolidacije U_{vh} može se izračunati pomoću Carillove jednadžbe (Carillo, 1942):

$$(1 - U_{vh}) = (1 - U_v)x(1 - U_h) \quad (10)$$

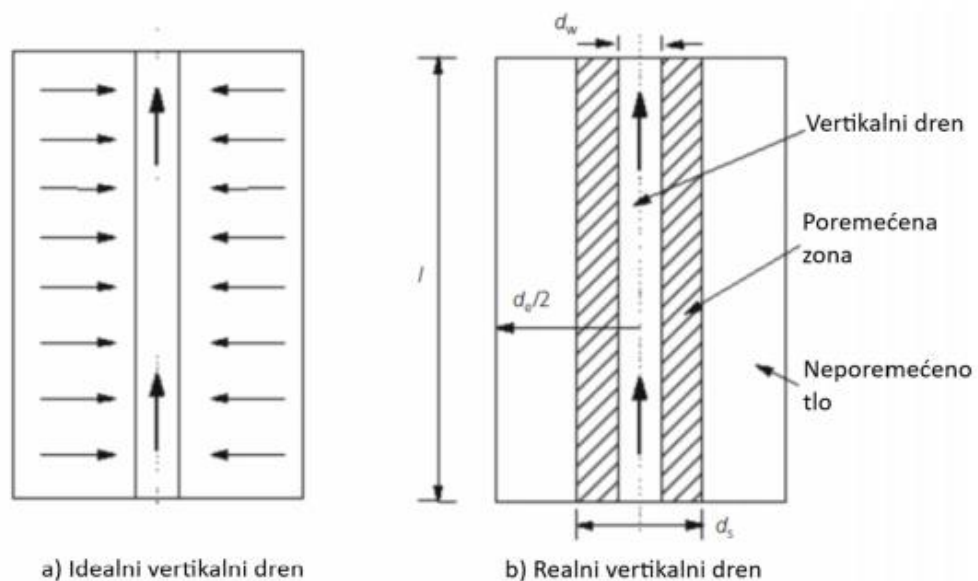
U jednadžbi (6) pretpostavlja se da se hidraulički otpor drena može zanemariti. Ako se otpor drena uzme u obzir, izraz za $F(n)$ iz jednadžbe (6) promjenit će se u (Hansbo, 1981):

$$F(n) \approx \ln(n) - 0.75 + \pi z(2l - z) \frac{k_h}{q_w} \quad (11)$$

gdje je l najduži put dreniranja s ugrađenim PVD-om, z je dubina, a q_w kapacitet odvodnje drena. Iz gornjeg izraza može se vidjeti da kada je kapacitet odvodnje q_w dovoljno velik, posljednji izraz postat će vrlo mali tako da se učinak otpora drena može zanemariti. Moderni, sintetički, visokokvalitetni PVD-ovi mogu osigurati dovoljno velik kapacitet odvodnje. Stoga se otpor drena može zanemariti prilikom projektiranja PVD-a. U praksi ovo zahtjeva da se kapacitet odvodnje PVD-a posebno provjeri (u laboratoriju) kao dio postupka kontrole kvalitete tijekom ugradnje. Stoga je važno osigurati pravilno odabranu kvalitetu PVD-a (Chu i Raju, 2013).

Prethodna analitička rješenja (Barron, 1947; Carillo 1942; Hansbo 1981) pretpostavljaju idealne uvjete dreniranja pri kojima su svojstva tla u radijalnom smjeru nakon ugradnje drena ostala nepromijenjena (neporemećena). Međutim, tijekom postupka ugradnje PVD-a dolazi do narušavanja strukture tla (Kavur, 2018).

Na Slici 7. Prikazani su presjeci idealnog i realnog vertikalnog drena. Proces ugradnje (utiskivanja i izvlačenja mandrele) će uzrokovati izvjesno poremećenje okolnog tla u radijalnom smjeru. Promjer cilindra poremećenog tla d_s i intezitet poremećaja uvjetovani su svojstvima tla (krutost), oblikom, promjerom d_m , karakteristikama površine cijevi (mandrela) za utiskivanje drena i dr. U poremećenoj zoni je propusnost tla k_s smanjena u odnosu na propusnost k_h neporemećenog tla. Promjer poremećene zone biti će veći što je veći i promjer cijevi za utiskivanje (mandrele) i što je krutost tla u koje utiskujemo dren veća (Kavur, 2018). Veličinu pomjera poremećene zone d_s i propusnost k_s poremećenog tla je nažalost gotovo nemoguće odrediti ispitivanjem. Promjer poremećene zone se na temelju iskustva iz raznih studija procjenjuje $d_s = (4 \text{ do } 7) d_w$ ili $d_s = (3 \text{ do } 4) d_m$. Kao rezultat poremećaja tla, koeficijent propusnosti uvelike se smanjuje u odnosu na neporemećeno tlo. Propusnost k_s se uzima 2 do 3 puta nižom od k_h . Studije (Bo i sur., 2013; Chu i sur. 2004) su pokazale da se propusnost marinskih gлина u poremećenoj zoni može smanjiti između 2 i 10 puta u odnosu na neporemećeno stanje (Chu i Raju, 2013).



Slika 7. Model poremećene i neporemećene zone oko verikalnog drena (Chu i Raju, 2013)

Uzimajući u obzir poremećenje tla u okolini drena, koje nastaje zbog ugradnje PVD-a, Barron (1948) i Hansbo(1979, 1981) su predložili rješenje koje obuhvaća promjer cilindra poremećenog tla d_s i umanjenu propusnost poremećenog tla k_s

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{FS(n)}\right] \quad (12)$$

$$F(n) = \ln(n) - 0.75 + \ln(s) \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right)$$

gdje je: $s = d_s/d_w$.

Iz jednadžbe (12) može se vidjeti da kada je $s = 1$ i $k_h = 1$ (nema poremećene zone) jednadžba postaje identična jednadžbi (6).

Korištenje prethodno predstavljenih analitičkih rješenja ograničeno je pretpostavkom jednodimenzionalnog, linearno – elastičnog ponašanja tla, a varijacija svojstava tla po dubini i širini poboljšanog sloja se zanemaruje. Za modeliranje dvodimenzionalnih ili trodimenzionalnih slučajeva, kao slijeganje pod nasipom, potrebno je koristiti se numeričkim metodama konačnih elemenata (Chu i Raju, 2013).

4. OPĆENITO O IZVEDBI PREFABRICIRANIH VERTIKALNIH DRENOVA

Projekt poboljšanja tla korištenjem prefabriciranih vertikalnih drenova sastoji se od sljedećih koraka (Chu i Raju, 2013):

1. Karakterizacija geotehničkih svojstava tla i određivanje parametara koji utječu na projekt PVD-a
2. Određivanje dubine i rasporeda PVD-a
3. Odabir PVD-ova koji udovoljavaju projektnim specifikacijama
4. Određivanje razmaka između drenova potrebnog za ostvarenje određenog stupnja konsolidacije
5. Ugradnja i kontrola kvalitete PVD-a
6. Nadziranje postupka poboljšanja tla
7. Provjera stupnja konsolidacije i ostalih projektnih specifikacija

4.1. Određivanje projektnih parametara

Određivanje vrijednosti konsolidacijskih parametara tla jedan je od najzahtjevnijih zadataka s kojima se susreću inženjeri geotehnike (Hansbo, 1997). U teorijama konsolidacije, kao što su Terzaghijeva i Barronova jednadžba konsolidacije (jednadžbe (1) i (2)), pretpostavlja se da je koeficijent konsolidacije konstantan, međutim u praksi on ovisi o mnogim faktorima, poput stupnja prekonsolidacije (*OCR*), stanju naprezanja, modelu tla pa čak i metodi određivanja (Chu i Raju, 2013). Stoga je prilikom procjene ovog parametra potrebna dobra inženjerska prosudba. Koeficijent propusnosti također je jedan od ključnih parametara potreban za projektiranje PVD-a. Koeficijent propusnosti tla ima najširi raspon varijacija među svim parametrima tla. Njegova vrijednost može varirati od 10^{-11} m/s za meku glinu do 10^{-3} m/s za pijesak i šljunak. Iako je propusnost tla koja treba biti tretirana vertikalnim drenovima obično niska, tijekom konsolidacije može znatno varirati (Chu i Raju, 2013).

Specifični parametri tla neophodni za izvedbu poboljšanja tla prefabriciranim vertikalnim drenovima (Holtz, 1987):

1. Napon prekonsolidacije σ_p' i stupanj prekonsolidacije (*OCR*)
2. Koeficijent konsolidacije u horizontalnom i vertikalnom smjeru, c_h i c_v
3. Koeficijent propusnosti tla u horizontalnom i vertikalnom smjeru k_h i k_v
4. Promjer poremećene zone d_s i propusnost poremećene zone k_s
5. Indeks kompresije C_c i indeks rekompresije C_r
6. Nedrenirana posmična čvrstoća C_u i nedrenirani Youngov modul E_u također mogu biti potrebni za analizu stabilnosti nasipa ili izvedbe vertikalnih drenova u mekoj glini.

Općenito se parametri konsolidacije tla mogu odrediti preko laboratorijskih ispitivanja, in situ ispitivanja, povratnih proračuna iz terenskih mjerenja ili njihovom kombinacijom (Chu i Raju, 2013). U laboratorijskim pokusima mogu se precizno definirati stanje naprezanja i uvjeti dreniranja kao i promjene parametara tla s naprežanjem i procesom konsolidacije. Međutim, na rezultate obično utječe poremećenost uzorka. In situ pokusi su obično relativno brzi za provođenje i stoga su korisniji od laboratorijskih ispitivanja u identificiranju profila tla i karakterizaciji ponašanja istog. U terenskim ispitivanjima uvjeti naprezanja i dreniranja općenito nisu precizno definirani. Interpretacija podataka od fizičkih mjerenja do parametara tla ponekad se temelji na proizvoljnim pretpostavkama ili korelacijama uspostavljenim samo za određenu vrstu tla. Vrste laboratorijskih i in situ ispitivanja koje su prikladne za određivanje parametara konsolidacije sažete su u tablici 1 (Chu i Raju, 2013).

Tablica 1. Vrste laboratorijskih i in situ ispitivanja prikladne za određivanje parametara konsolidacije (prema Chu i Raju, 2013)

<i>Vrsta ispitivanja</i>	<i>Naziv ispitivanja</i>	<i>Parametri</i>	<i>Napomena</i>
Laboratorijsko ispitivanje	Edometarski pokus	C_v, k_v (indirektno), C_c, C_r, σ_p'	Potreban kvalitetan, neporemećeni uzorak
	Pokus Rowe ćelijom	c_h i k_h (direktno ili indirektno)	
In-situ ispitivanje	Ispitivanje statičkim piezo-penetrometrom (CPTU)	c_h i k_h (indirektno)	Na temelju disipacije pornog tlaka
	Ispitivanje samobušecim tipom presiometra (SBPM)	c_h i k_h (indirektno)	Na temelju bočnog pritiska, disipacije pornog tlaka
	Ispitivanje dilatometrom (DMT)	c_h i k_h (indirektno)	Na temelju stanja naprezanja
	Ispitivanje permeametrom (BAT)	k_h (direktno)	Korištenje piezometra
	Povratna analiza	Na temelju pornog tlaka	c_h (faktorizirano)
	Na temelju procjene slijeganja	c_h (faktorizirano)	







4.2. Vrste prefabriciranih vertikalnih drenova

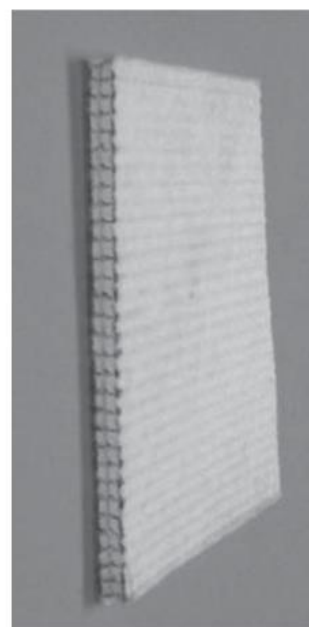
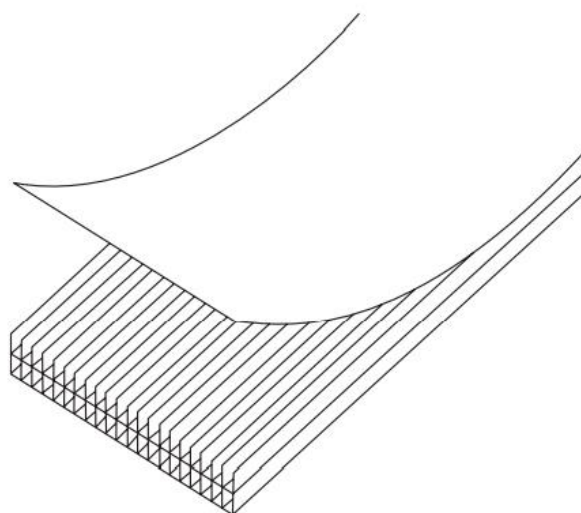
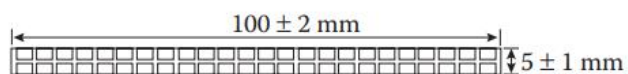
Prefabricirani vertikalni drenovi izvide se u standardnim veličinama, tipičnog presjeka širine od 100 mm i debljine 3-6 mm. Obično se sastoje od plastične jezgre i filtra sastavljenih od različite vrste materijala. Fleksibilna jezgra obično je izrađena od polipropilena, a obje su strane jezgre udubljene radi omogućavanja strujanja vode duž drena. Također, jezgra pruža otpor izvicanju te služi kao potpora geotekstilu filtra (Scorza i Fox, 2014). Jezgra je omotana izdržljivom filtarskom tkaninom od geotekstila s izvrsnim filtracijskim svojstvima, omogućujući slobodan pristup porne vode u dren. Također, sprječava prolazak sitnozrnatog tla u područje jezgre (Scorza i Fox, 2014). Danas su na tržištu dostupne tri vrste PVD-a (Chu i Raju, 2013). Prva je uobičajena vrsta trakastog drena u kojoj su jezgra i filter međusobno odvojeni i labavi (Slika 9). Tipični oblici uobičajenih PVD-ova prikazani su u Tablici 2. Drugi tip je takozvani integrirani PVD (Slika 9) u kojem su jezgra i filter međusobno prilijepljeni toplinom. Vlačna čvrstoća kod ove vrste PVD-ova je znatno veća nego što je to slučaj kod odvojivog tipa. Jezgra i filter deformirat će se kao jedno tijelo, a kombinirana vlačna čvrstoća biti će veća zbog interakcije dvaju elemenata (Liu i Chu 2009). Također, integrirani PVD ima veći kapacitet odvodnje, veću otpornost na začepljenje i ekonomski je isplativiji (Liu i Chu 2009).



Slika 8. Uobičajene vrste PVD-a (Chu i Raju, 2013)

Tablica 2. Tipični poprečni presjeci jezgri trakastih drenova (prema Chu i Raju, 2013)

<i>Jezgra</i>		<i>Vrsta filtra</i>
Poprečni presjek	Opis	
	Valoviti presjek	Netkani geotekstil
	Rebrasti presjek	Sintetika
	Monofilament	Netkani geotekstil
	Dvostruko presvučeni	Netkani geotekstil
	Jednostrano udubljenje	Netkani geotekstil
	Dvostrano udubljenje	Netkani geotekstil



Slika 9. Integrirani PVD (Liu i Chu, 2009)

Treći tip su drenovi kružnog poprečnog presjeka (Slika 10) koji se koriste isključivo u metodi poboljšanja tla vakuumskim predopterećenjem.



Slika 10. Dren kružnog poprečnog presjeka (Chu i Raju, 2013)

4.3. Faktori koji utječu na odabir PVD-a

Različite projektne situacije zahtijevaju različite vrste PVD-ova. Faktori koji utječu na kvalitetu PVD-a u projektu poboljšanja su kapacitet odvodnje, prividna veličina otvora filtra (AOS) i vlačna čvrstoća (Chu i sur. 2006).

4.3.1. Kapacitet odvodnje

Vidljivo iz jednadžbe (11) na hidraulički otpor drena uvelike utječu kapacitet odvodnje q_w , propusnost tla k_s i najduži put dreniranja l_m . Da bi se procijenila učinkovitost PVD-a pri odvodnji vode iz tla, uvodi se bezdimenzionalni faktor odvodnje (Chu i Raju, 2013):

$$D = \frac{q_w}{k_h l_m^2} \quad (13)$$

Jednadžba (13) uvažava pretpostavku da će veći kapacitet odvodnje biti neophodan u slučaju većeg k_h ili dužeg PVD-a. Utjecaj hidrauličke otpornosti tla može se odrediti pomoću bezdimenzionalnog faktora odvodnje. Xie (1987) je utvrdio da slijedeći uvjet mora biti ispunjen kako bi se hidraulička otpornost tla mogla zanemariti:

$$\frac{\pi k_h}{4 q_w} l_m^2 < 0.1 \quad (14)$$

To zahtijeva da faktor odvodnje D , izgleda:

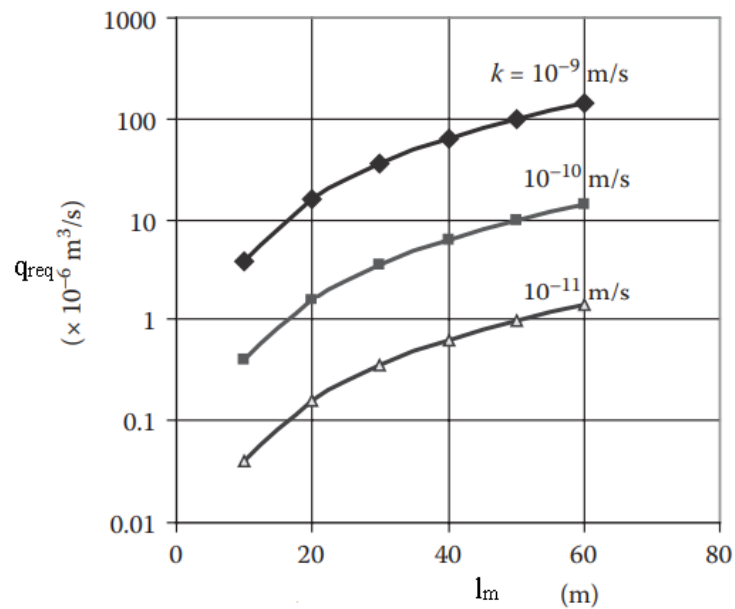
$$D = \frac{q_w}{k_h l_m^2} \geq 7.85 \quad (15)$$

Kako bi se uzeli u obzir svi faktori koji utječu na kapacitet odvodnje, uvodi se faktor sigurnosti:

$$q_{req} \geq 7.85F_s k_h l_m^2 \quad (16)$$

Gdje je q_{req} traženi kapacitet odvodnje, F_s faktor sigurnosti ($F_s = 4 \sim 6$).

Veza između q_w , k_s i l_m za $F_s = 5$ pri zanemarivom hidrauličkom otporu tla, prikazana je Slici 11 (Chu i Raju, 2013).



Slika 11. Ovisnost traženog kapaciteta odvodnje o duljini PVD-a i propusnosti tla (Chu i Raju, 2013)

4.3.2. Veličina pora filtra

Dva ključna parametra koja utječu na kvalitetu filtra su prividna veličina otvora filtra (AOS) i poprečna propusnost filtra. Veličina pora ili prividna veličina otvora filtra (AOS) mora biti dovoljno mala da spriječi ulazak sitnih čestica tla u PVD. S druge strane, ne smije biti premalih dimenzija jer filter mora pružiti dovoljnu propusnost. Najčešće korišten kriterij za određivanje veličine pora predložen je prema Carroll (1983):

$$O_{95} \leq (2\sim 3)D_{85} \quad (17)$$

$$O_{50} \leq (10\sim 12)D_{50} \quad (18)$$

Gdje je O_{95} prividna veličina otvora filtra, O_{50} veličina otvora filtra koja je veća od 50 % pora tkanine filtra, a D_{85} i D_{50} odnose se na veličine promjera čestica tla koje prolaze kroz otvore i čiji je težinski udio 85 odnosno 50 % u ukupnom uzorku. Za PVD-ove, obično je $O_{95} \leq 0,075$ mm. Propusnost filtra trebala bi biti jednog reda veličine veća od propusnosti tla. Zbog mogućnosti začepjenja filtra propusnost istog trebala bi biti puno veća, međutim većina PVD-a ima veću propusnost od 10^{-4} m/s što je daleko više od potrebnog (Chu i sur. 2006).

4.3.3. Vlačna čvrstoća

Mehanička svojstva prefabriciranih vertikalnih drenova, posebno vlačna čvrstoća jezgre i filtra, važna su zbog naprezanja kojima se drenovi izlažu tijekom ugradnje. PVD-ovi trebaju imati vlačnu čvrstoću od minimalno 5 kN/m, a deformacija produljenja pri maksimalnom vlačnom naprezanju bi se trebala kretati od 2 – 10% (Holtz, 1987). Preporučene minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava geotekstila za filtre drena dane su u Tablici 3.

Tablica 3. Preporučene vrijednosti mehaničkih svojstava geotekstila za filtre drena (prema Holtz, 1987)

<i>Svojstvo</i>		<i>Minimalna vrijednost</i>
Sila prihvata	ASTM D- 4632	350 N
Sila proboja	ASTM D- 3787	100 N
Otpor na proboj	ASTM D-3786	900 kN/m ²
Sila paranja	ASTM D- 4533	100 N

4.4. Raspored, dubina ugradnje i razmak između PVD-ova

Kao što je spomenuto, PVD-ovi mogu biti ugrađeni u trokutnom ili kvadratnom tlocrtnom rasporedu. Iako je kvadratni raspored jednostavniji prilikom ugradnje PVD-a, trokutni se raspored češće izvodi, ne samo zbog ekonomičnosti već zbog ravnomjernije konsolidacije između drenova (Scorza i Fox, 2014).

Razmak između PVD-ova potreban za ostvarenje određenog stupnja konsolidacije tla može se izračunati preko prethodno navedenih relacija u poglavlju 3.1. U teoriji, što je razmak između PVD-ova manji, konsolidacija će biti brža (Indraratna i sur. 2003). Međutim, kada su PVD-ovi međusobno nedovoljno razmaknuti može doći do značajnog poremećenja okolnog tla tijekom ugradnje. Iako su predložene jednadžbe za procjenu promjera poremećene zone, teško je precizno kvantificirati d , jer na vrijednost istog utječu brojni čimbenici poput veličine i oblika mandrele, osjetljivosti tla i sl.

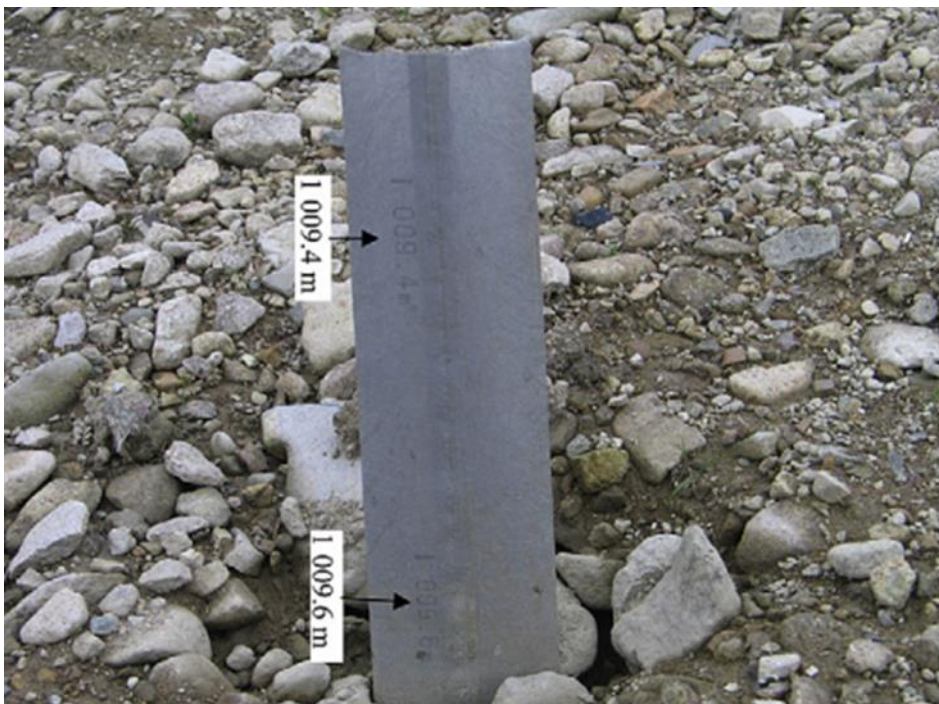
Obično se PVD-ovi ugrađuju kroz cijelu dubinu mekog sloja tla. Međutim, ako se primjenjuje predopterećenje na ograničenom području, kao što je uski nasip, većina naprezanja raspodijeliti će se samo unutar određene dubine. U tom slučaju nije potrebno ugraditi PVD-ove kroz cijelu dubinu stišljivog sloja tla (Chu i Raju, 2013).

4.4.1. Mjerenje dubine ugradnje PVD-a

Na učinak poboljšanja tla ovom metodom povećati učinak ima dubina ugradnje istog. Ako je za PVD-ove u projektu isplanirano da se ugrađuju po čitavoj debljini mekog sloja tla, a prilikom izvedbe to nije realizirano predviđeni stupanj konsolidacije neće biti ostvaren (Liu i sur. 2009). Slijedom toga, važno je mjeriti stvarnu dubinu prilikom ugradnje PVD-a. Također, mjerenjem dubine ugradnje PVD-a stječe se konkretnije znanje o dubini mekog tla na mjestima ugradnje. Do danas su usvojene tri metode kojima se može izravno izmjeriti dubina prodiranja PVD-a.

4.4.1.1. Digitalizirani PVD

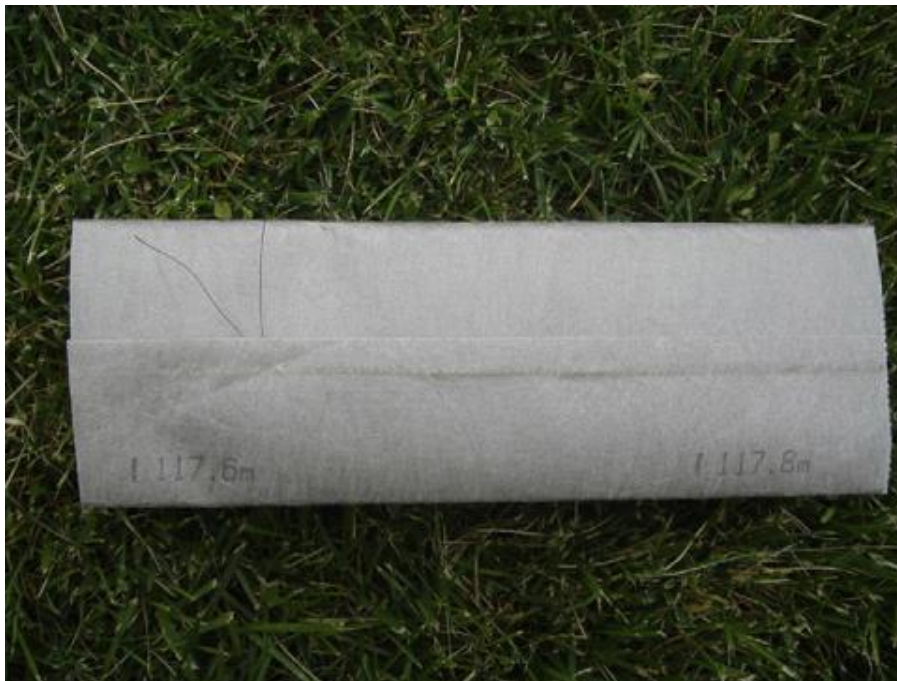
Prva metoda uključuje ispis mjerne skale na površinu PVD-a s intervalom od 20 ili 25 cm, tako da se njegova linearna duljina može izravno očitati (Slika 12). Mjerilo se ispisuje na površinu PVD-a automatski pomoću pisaa. Razlika u duljini između otiska na dnu PVD-a te brojanog otiska na završetku ugrađenog PVD-a predstavljat će ukupnu duljinu istog. Duljina ukupno korištenih PVD-ova također se može lako izračunati. Metoda je vrlo jednostavna i ne donosi velike dodatne troškove. Međutim ima brojne nedostatke poput nečitljivosti mjerne skale uslijed dugog vremenskog skladištenja, uslijed promjena temperature može doći do širenja i skupljanja PVD-a što predstavlja problem prilikom očitavanja, također se prilikom ugradnje PVD može rastegnuti i očitavanje može biti pogrešno (Liu i sur. 2009).



Slika 12. PVD sa ispisanom mjernom skalom (Liu i sur. 2009)

4.4.1.2. PVD s dvije žice

Druga metoda uključuje ugradnju dviju izoliranih bakrenih žica uzduž spoja filtra kako je prikazano na Slici 13. Prije ugradnje žice se međusobno povežu na donjem kraju PVD-a pri čemu se izolacija na mjestu povezivanja mora ukloniti, a minimalna duljina veze mora iznositi 20 mm. Na gornjem kraju PVD-a žice se spajaju na uređaj za mjerenje električnog otpora (Slika 14). Uređaj izravno mjeri otpor žica te ga pretvara u duljinu i pohranjuje očitavanja. Iako je ova metoda najpouzdanija, nedostaci korištenja javljaju se zbog dodatnih troškova te nepravilnog povezivanja žica (Liu i sur. 2009).



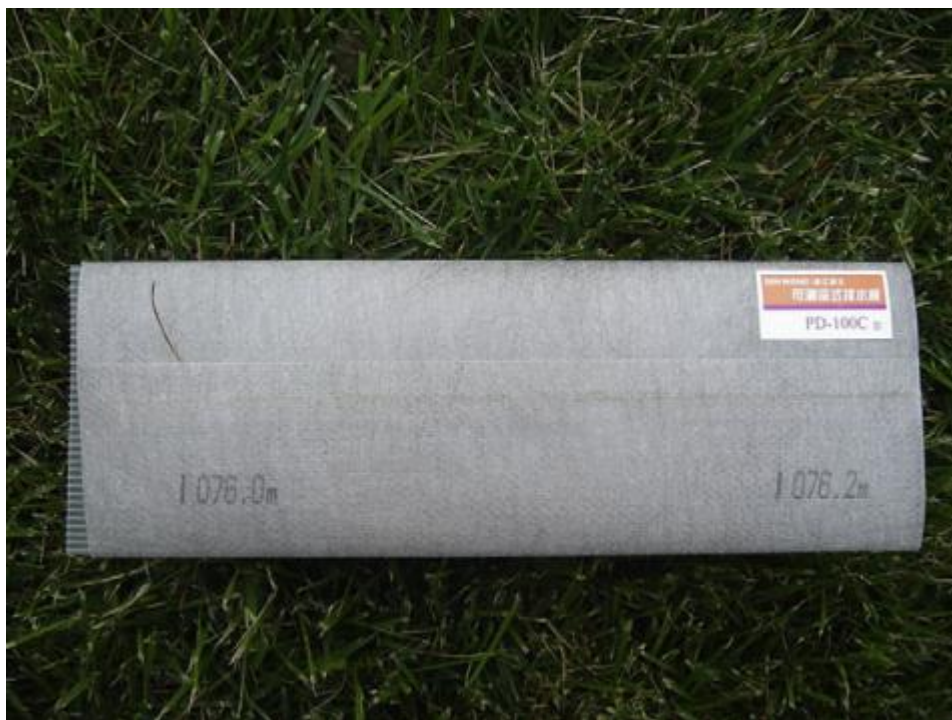
Slika 13. PVD s dvije žice, metoda mjerenja dubine (Liu i sur. 2009)



Slika 14. Uređaj za mjerenje električnog otpora žica u PVD-u (Liu i sur. 2009)

4.4.1.3. PVD s jednom žicom

Metoda PVD-a s jednom žicom (Slika 15) razvijena je kako bi se izbjeglo nepravilno povezivanje žica u prethodnoj metodi. U ovoj se metodi koristi samo jedna žica ugrađena također duž spoja filtra. Metoda se temelji na principu mikrovalnog mjerenja impedancije mjernim uređajem posebno dizajniranim za mjerenje impedancije te izravnim pretvaranjem iste u duljinu (sličan uređaju na Slici 14). Impedancija žice je mjerena bilježenjem vremena emitiranja i primanja mikrovalova. Pogreška mjerenja je unutar 20 cm što je prihvatljivo za mnoge projekte. Metoda mjerenja impedancije relativno je nova za inženjere geotehnike i biti će potrebno izgraditi iskustvo prije nego se metoda počinje primjenjivati s povjerenjem (Liu i sur. 2009).



Slika 15. PVD s jednom žicom, metoda mjerenja dubine (Liu i sur. 2009)

4.5. Ugradnja PVD-a

S obzirom na vrstu tla u koju se PVD ugrađuje strojevi za ugradnju mogu se klasificirati u četiri skupine (Chu i Raju, 2013):

1. Strojevi statičkog tipa utiskivanja za normalno tlo (Slika 16.)
2. Pogonski strojevi vibracijskog tipa utiskivanja za tvrdo tlo ili meko tlo sa tvrdim gornjim slojem
3. Lagana instalacijska oprema na kamionu za vrlo meko tlo
4. Opremljena teglenica za ugradnju ispod vodenih površina (Slika 17.)

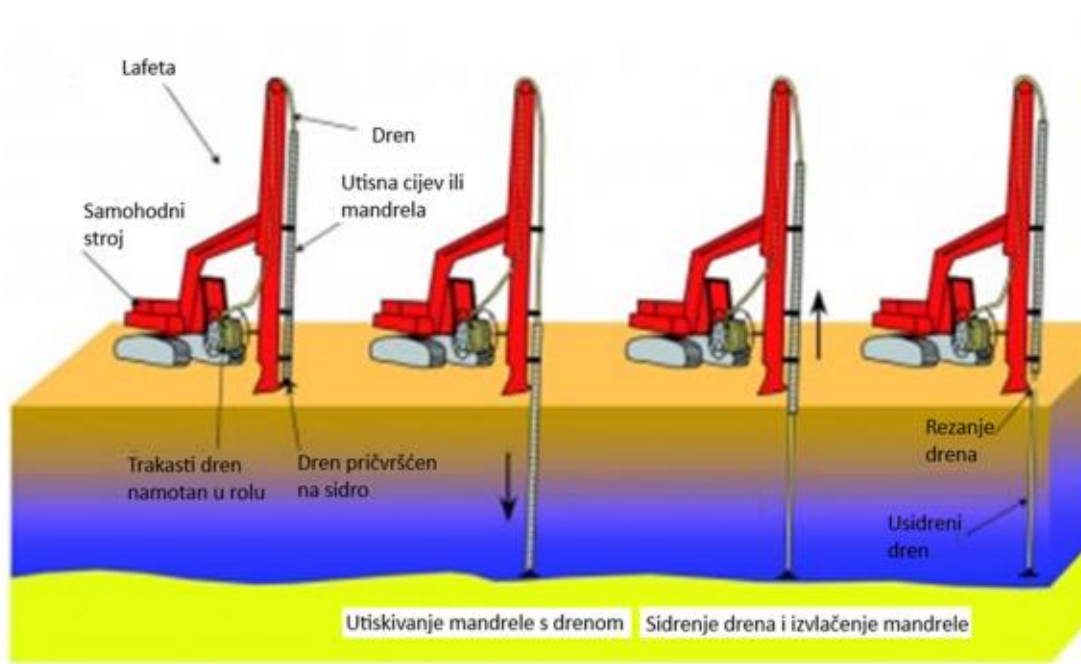


Slika 16. Stroj za statičko utiskivanje drenova (Liu i sur. 2009)

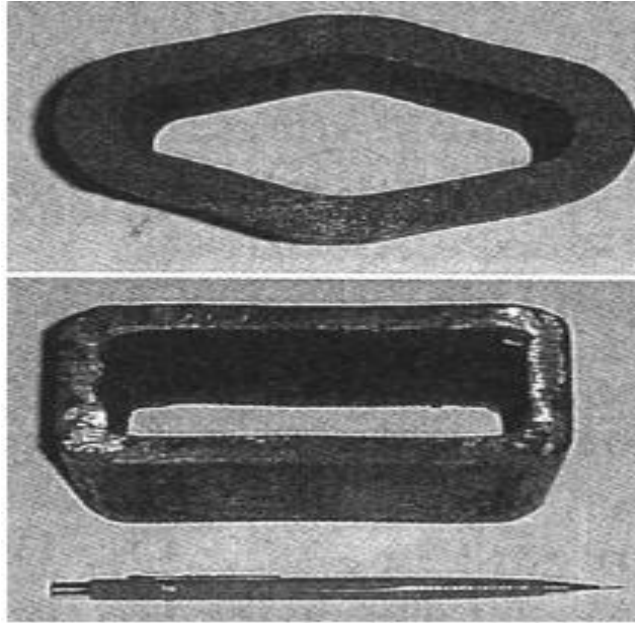


Slika 17. Teglenica opremljena za ugradnju PVD-a (Chu i sur. 2009)

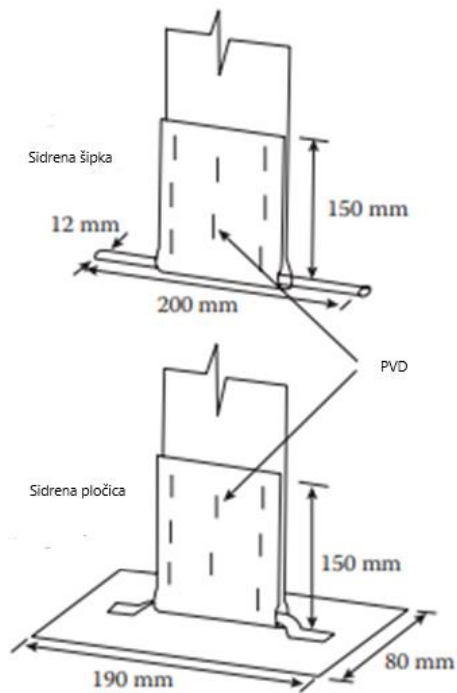
Na Slici 18. shematski je prikazana ugradnja PVD-a strojnim utiskivanjem. Postupak ugradnje započinje postavljanjem drenažnog sloja tla koji će služiti kao stabilna radna platforma, a kasnije za prikupljanje vode iz drenova. Sa pripremljenog platoa PVD se ugrađuje u tlo postupkom strojnog utiskivanja mandrele zajedno sa PVD-om. Jedan kraj PVD-a koji je namotan u rolu provlači se kroz mandrelu preko lafete stroja. Poprečni presjek mandrele može biti kružni, romboidni, pravokutni i kvadratni. Najčešće se koriste mandrele romboidnog i pravokutnog poprečnog presjeka kao što je prikazano na Slici 19. Tipične dimenzije pravokutnog poprečnog presjeka mandrele su duljina 120-145 mm, širina 60 mm i debljina 10 mm. Za mandrele romboidnog poprečnog presjeka karakteristične dimenzije su duljina 120-145 mm, širina 50-85 mm i debljina 5-15 mm. Lafeta treba imati dovoljnu duljinu za utiskivanje (Chu i Raju, 2013) PVD-a u jednom kontinuiranom manevru i obično je 2-3 m dulja od mandrele pomoću koje se PVD utiskuje statičkim ili vibracijskim potiskom u tlo. Kada se mandrela sa PVD-om utisne do projektirane dubine sloja mekog tla, slijedi izvlačenje mandrele. Izvlačenjem mandrele PVD ostaje u tlu jer je zakvačen na sidrenu pločicu ili sidrenu šipku (Slika 20), pomoću preklapanja ili spajalica, koja se aktivira izvlačenjem mandrele iz tla. Traka PVD-a se zatim odreže tako da viri 100-200 mm iznad površine drenažnog sloja (Chu i Raju, 2013)



Slika 18. Ugradnja PVD-a strojnim utiskivanjem (Scorza i Fox, 2014)



Slika 19. Romboidni i pravokutni poprečni presjek mandrele (Chu i Raju, 2013)



Slika 20. Karakteristične dimenzije sidrene pločice i sidrene šipke (Chu i Raju, 2013)

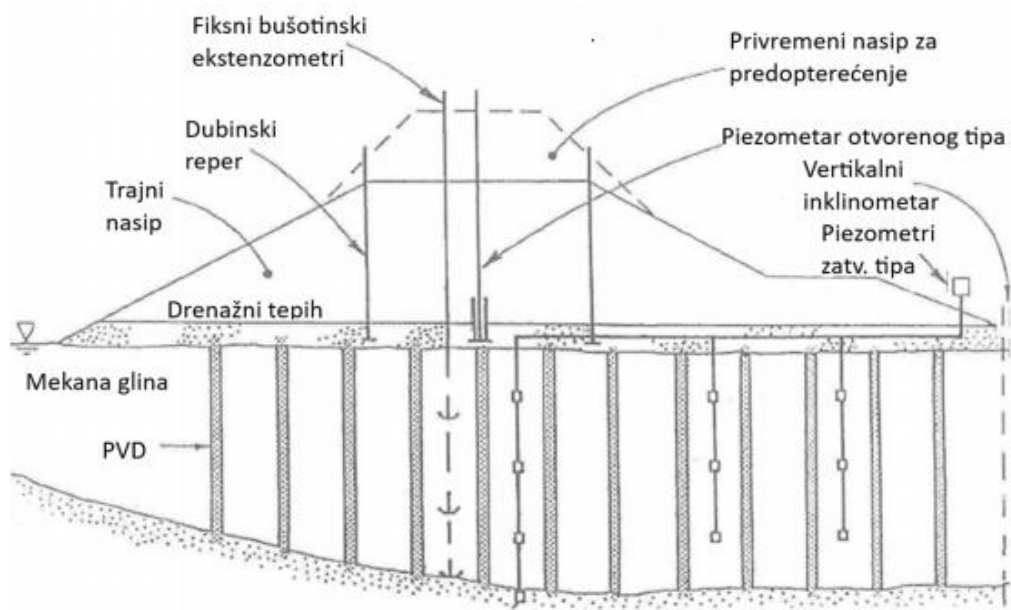
4.6. Kontrola poboljšanja tla

Projekt poboljšanja tla prefabriciranim vertikalnim drenovima obično se provodi do dosezanja potrebnog stupnja konsolidacije. Za procjenu stupnja konsolidacije najčešće se koriste piezometri zatvorenog tipa za praćenje promjene pornih tlakova i različite metode mjerenja slijeganja tla. Za praćenje promjene pornih tlakova na različitim dubinama mekog tla ugrađuju se piezometri, najčešće na polovici razmaka između drenova. Za projekte koji koriste vakuumsko predopterećenje poželjno je izmjeriti porni tlak unutar PVD-a, pa se piezometri ugrađuju unutar PVD-a kao što je prikazano na Slici 21 (Chu i Raju, 2003).



Slika 21. Ugradnja piezometra unutar PVD-a (Chu i Raju, 2003)

Za praćenje slijeganja nasipa i temeljnog tla najčešće se koriste dubinski reperi, fiksni bušotinski ekstenzometri, mobilne ektenzometarske sonde (npr. klizni deformetar), magnetni ektenzometar i horizontalni inklinometri (Kavur, 2018).



Slika 22. Praćenje učinaka poboljšanja tla PVD-ovima (prema Sanyal, 2016)

5. PRIMJER PROJEKTA POBOLJŠANJA TLA PREFABRICIRANIM VERTIKALNIM DRENOVIMA

5.1. Tehnički opis

5.1.1. Uvod

Za potrebe izrade diplomskog rada uspostavljen je kontakt s gosp. Krešom Bolančom dipl. ing. građ., vlasnikom tvrtke KREŠO GEO d.o.o., koji je ustupio podatke iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima.

Za potrebe izrade geotehničkog elaborata i glavnog projekta za predmetne građevine u Pločama, na području ušća rijeke Neretve koje ima formu široke delte, obavljani su opsežni geotehnički istražni radovi. Svrha ovih radova je bila dobivanje uvida u geotehnička obilježja lokacije i potrebnih podataka za izradu glavnog projekta.

Program ispitivanja izrađen je na osnovi podataka dobivenih prethodnim ispitivanjima na lokaciji i ispitivanjima provedenim na široj lokaciji zahvata. Osnovna svrha predviđenih ispitivanja je bila određivanje mehaničkih karakteristika materijala (parametre čvrstoće u nedreniranom i dreniranom stanju, deformabilnost tla) i karakteristike vodopropusnosti u vertikalnom i horizontalnom smjeru) kako bi se s dovoljnom sigurnošću moglo odrediti:

- fizikalno-mehanička svojstva tla ispitivanjima na terenu i u laboratoriju
- optimalan način temeljenja objekata visokogradnje
- geotehnički model za proračune otpornosti i slijeganja nasipa, plitkih i dubokih temelja
- metode ubrzanja konsolidacije i poboljšanja tla
- slijeganje tla ispod nasipa i temelja objekata
- vrijeme konsolidacije tla ispod nasipa i temelja objekata.

5.1.2. Opis objekta

Objekt se sastoji se od tri zasebne jedinice koje su povezane središnjim dijelom. Tlocrtno objekt ima nepravilni oblik, ali zasebno svaka jedinica je pravilnog pravokutnog tlocrta. Prvi dio zgrade je tlocrtnih dimenzija 13,3 x 42,0 m, drugi 26,38 x 13,3 m i treći 34,90 x 13,30 m. Svaka poslovna jedinica zasebno je objekt pravilnog oblika po visini i tlocrtu, a sve tri poslovne jedinice su međusobno dilatirane.

Koncept temeljenja objekta:

Kako bi se objekt visinski povoljno smjestio u odnosu na trasu prometnice potrebno je izvesti nasipavanje cijelog područja za oko 1,7 m što je s geotehničkog stajališta nepovoljno i uzrokovat će znatna slijeganja. Relativna kota objekta $\pm 0,00$ m je 3,2 m n.m, a teren se nalazi na koti oko 1,5 m n.m.

Tlo na lokaciji je vrlo loših mehaničkih karakteristika i predstavlja iznimno nepovoljnu sredinu za temeljenje objekta. Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja, podataka o objektu i prethodnih iskustava stečenih tijekom izgradnje susjednih građevina, odabrano je temeljenje na ploči uz sustavno poboljšanje tla s predopterećenjem. Predviđene mjere će osigurati nosivost plićih slabonosivih slojeva tla, ubrzati konsolidaciju, slijeganje objekta svesti na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirati mogućnost likvefakcije pod dinamičkim opterećenjem.

Glavnim geotehničkim projektom predviđene su sljedeće mjere:

- ugradnja šljunčanih pilota
- ugradnja prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.)
- predopterećenje u iznosu većem od 30% od konačnog opterećenja građevinom u trajanju od minimalno 4 mjeseca.

5.1.3. Inženjersko geološke karakteristike lokacije

Ušće rijeke Neretve ima formu široke delte, koja se lepezasto otvara prema moru, gdje ima najveću širinu. Na deltu rijeke Neretve, kao i na ostala ušća rijeka na Mediteranu, djelovale su promjene razine mora tijekom kvartara, odnosno posljednjih 2 milijuna godina. To je za geološke pojmove vrlo kratko razdoblje, u kojem je nastala duboka depresija u reljefu i kompleks sedimenata, koji danas ispunjavaju deltu. Sedimenti delte svojim sastavom pripadaju grupi nevezanih sedimenata, ali ne treba zaboraviti na mogućnost pojave poluvezanih i vezanih naslaga unutar kompleksa sedimenata delte. Današnja delta rijeke Neretve, koja seže sve do Metkovića nastala je najvjerojatnije povezivanjem više izoliranih jezera u tom prostoru, koja su se erozijskim procesima otvarala prema moru s obzirom na nižu razinu mora i do 150 m od današnje erozijski procesi su mogli doprijeti i do tih dubina, pa nije začuđujuće nalaziti tipične flow sedimente duboko ispod današnje razine mora. Sedimenti delte rijeke Neretve su zasigurno najveća i najdublja pojava naslaga kvartarne starosti u cijelom prostoru. Delta rijeke Neretve je duboka depresija otvorena prema moru, čija dubina može na nekim mjestima sezati i do 150 m ispod razine mora. Razlog je niža razina mora tijekom kvartara, što je potvrđeno istraživanjima u cijelom Mediteranu i upravo je ta promjena razine mora tijekom kvartara imala bitan utjecaj na formiranje današnjih ušća rijeka u more i odnosa slatke i slane vode u recentnom obalnom području Mediterana, pa i naše Jadranske obale. Sedimenti ušća naših rijeka sežu do najnižih erozijskih razina, pa tako i delta rijeke Neretve. Karbonatna podloga delte je zasigurno nepravilna, što potvrđuju i pojave izdignutih stijena u delti, ovisno o lokalnim strukturno-tektonskim prilikama, pa se i debljina naslaga delte mijenja od mjesta do mjesta. Izvedene istražne bušotine pokazuju dosta ujednačene odnose unutar sedimentnog kompleksa. Depresija delte je ispunjena najvećim dijelom nanosom rijeke Neretve, ali i marinskim sedimentima zbog stalno aktivnog odnosa mora i akumulacijskog djelovanja rijeke Neretve. Maksimalne debljine sedimenata delte mogu biti čak i do 150 m, međutim ono što se sigurno može reći da su u rasponu 100 do 150 m, barem u centralnom dijelu. U takvim uvjetima nastao je široki spektar flow sedimenata, koji se može očekivati u delti, a dio je istražen bušenjem u sklopu istražnih radova. Prema determinaciji jezgre istražnih bušotina mogu se postaviti neke pravilnosti. U najmlađem dijelu sedimenata do dubine oko 12 m prevladavaju pjeskovite gline niske plastičnosti i dijelom prašinaste naslage, a dublje su glinovite naslage, u kojima ispod dubina oko 15-20 m gline postaju sve konzistentnije, a utjecaj

marinskih organskih komponenti sve veći u širokom rasponu od niske do visoke plastičnosti. Pojava pijeska na dubinama oko 35-40 m ukazuje na povremene usmjerene pronose krupno klastičnog materijala, odnosno meandriranja korita rijeke u širokoj depresiji delte. Svi sedimenti delte su saturirani podzemnom vodom tj. razina podzemne vode je tijekom godine konstantno oko površine terena, od minimalno oko 50 cm ispod površine do plavljenja područja, a na dnevne oscilacije utječu plima i oseka sredine (iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.).

5.1.4. Sastav i karakteristike tla

Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja, kao i za potrebe odabrane metode temeljenja, određene su sljedeće dvije geotehničke sredine (iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.):

1. GEOTEHNIČKA ZONA 1. [dubina od 0 do 10 m]:

prema podacima koji su dobiveni in-situ ispitivanjima (CPTU i istražno bušenje) izrazito je heterogena. Sačinjavaju je pretežno pjeskoviti materijali s proslojcima/slojevima praha i gline niske plastičnosti, (SM, ML/SM i ML/CL);

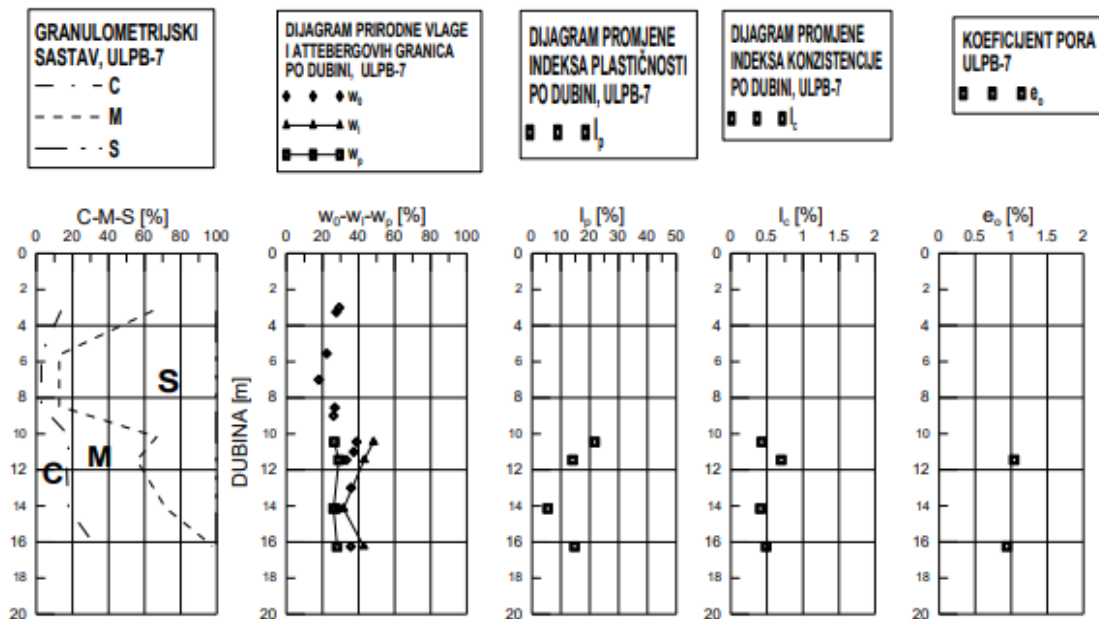
-debljina sloja:	$h=10$ m
-zapreminska težina:	$\gamma=16$ kN/m ³
-nedrenirana posmična čvrstoća tla:	$c_u =20$ kPa
-korigirana vrijednost otpora na vrhu:	$q_t=0,6-1,35$ MPa
-broj udaraca SPT-a:	$N=4-9$

2. GEOTEHNIČKA ZONA 2. [ispod 10 m]:

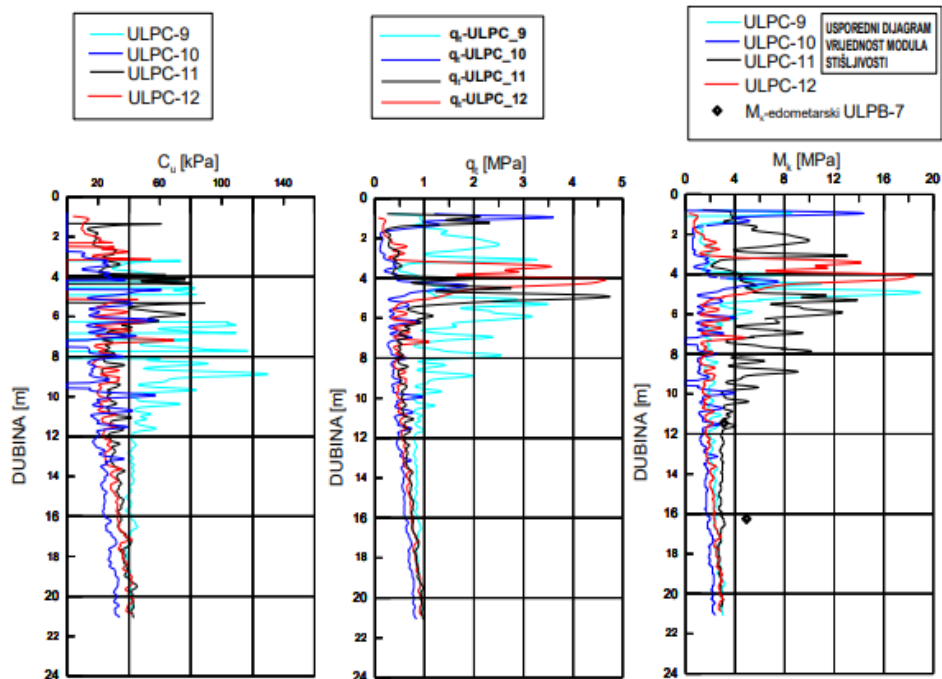
sačinjavaju je pretežno prašinski i glinoviti materijali niske plastičnosti (CL/ML, ML), prisutni proslojci pijeska;

- zapreminska težina: $\gamma=17 - 18 \text{ kN/m}^3$
- nedrenirana posmična čvrstoća tla: $c_u = 25 - 70 \text{ kPa}$
- korigirana vrijednost otpora na vrhu: $q_t = 0,5 - 1,8 \text{ MPa}$
- broj udaraca SPT-a: $N=5-8$

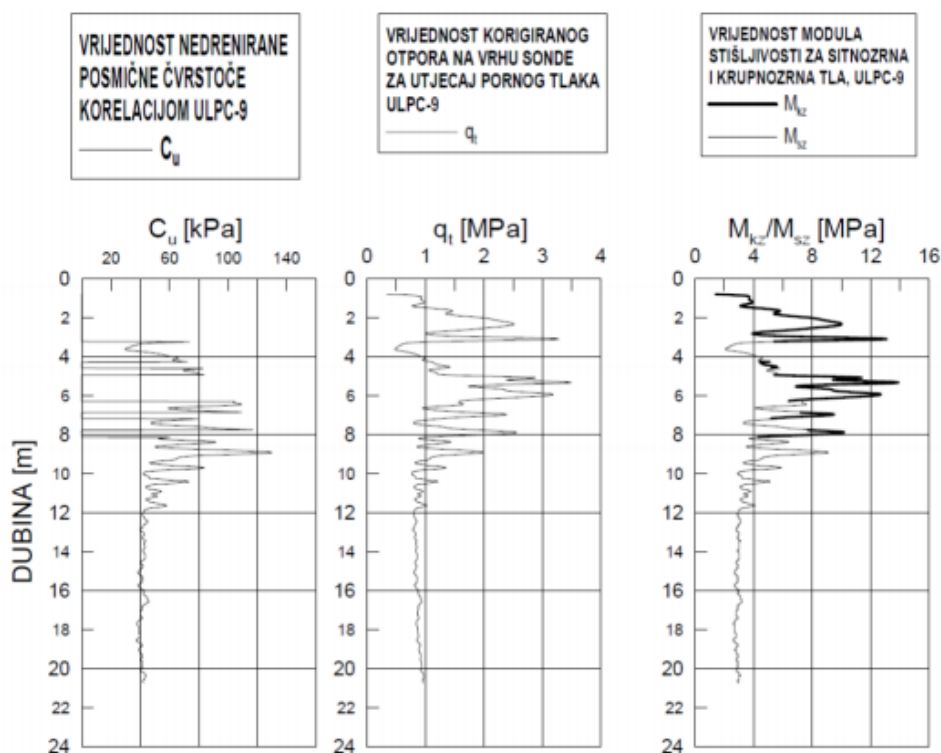
Analizom rezultata ispitivanja tla statičkom penetracijom s mjerenjima pornih tlakova i pokusima njihove disipacije, može se zaključiti da su fizikalne karakteristike slojeva tla i njihova distribucija po dubini ujednačeni. Tlo je saturirano podzemnom vodom tj. razina podzemne vode je tijekom godine konstantno oko površine terena, od minimalno oko 50 cm ispod površine do plavljenja područja, a na dnevne oscilacije utječu plima i oseka. Razina podzemne vode u vrijeme ispitivanja je registrirana na koti od -0,1 m do -0,4 m od površine terena.



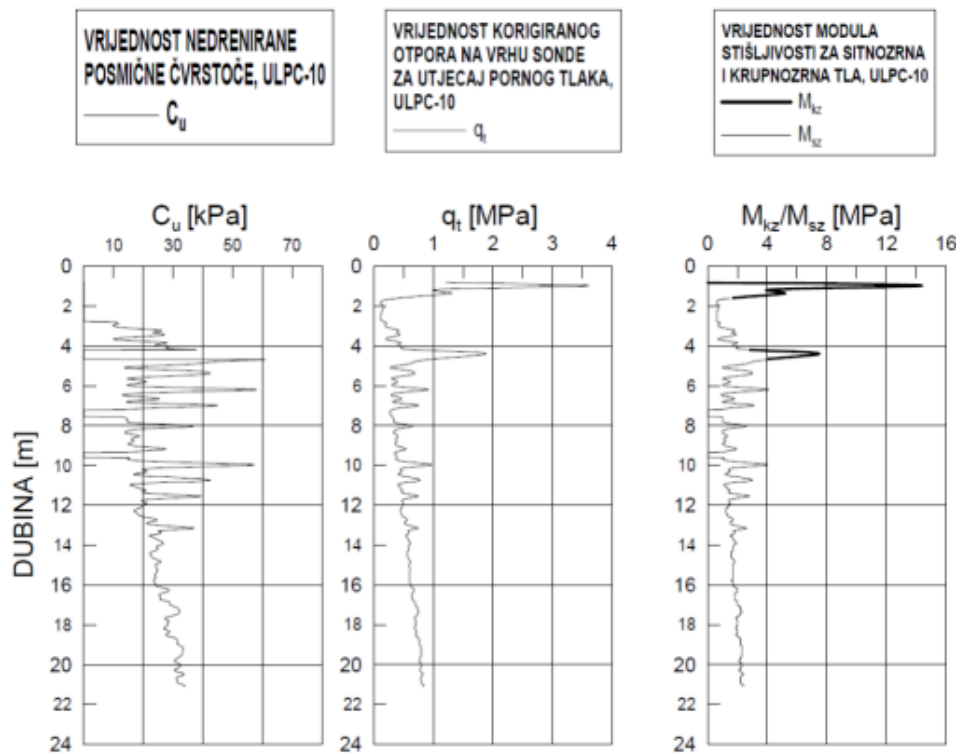
Slika 23. Prikaz fizikalnih karakteristika materijala, bušotina ULPB-7



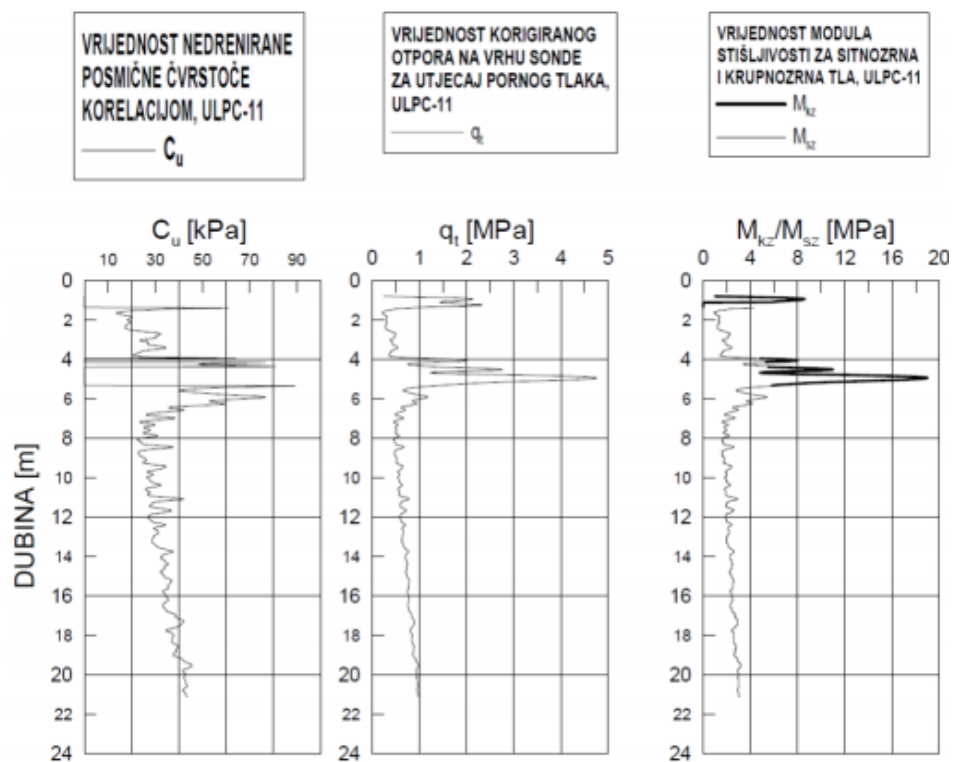
Slika 24. Usporedni dijagram dobivenih vrijednosti iz CPTU-i edometra [c_u , q_t , M_k]



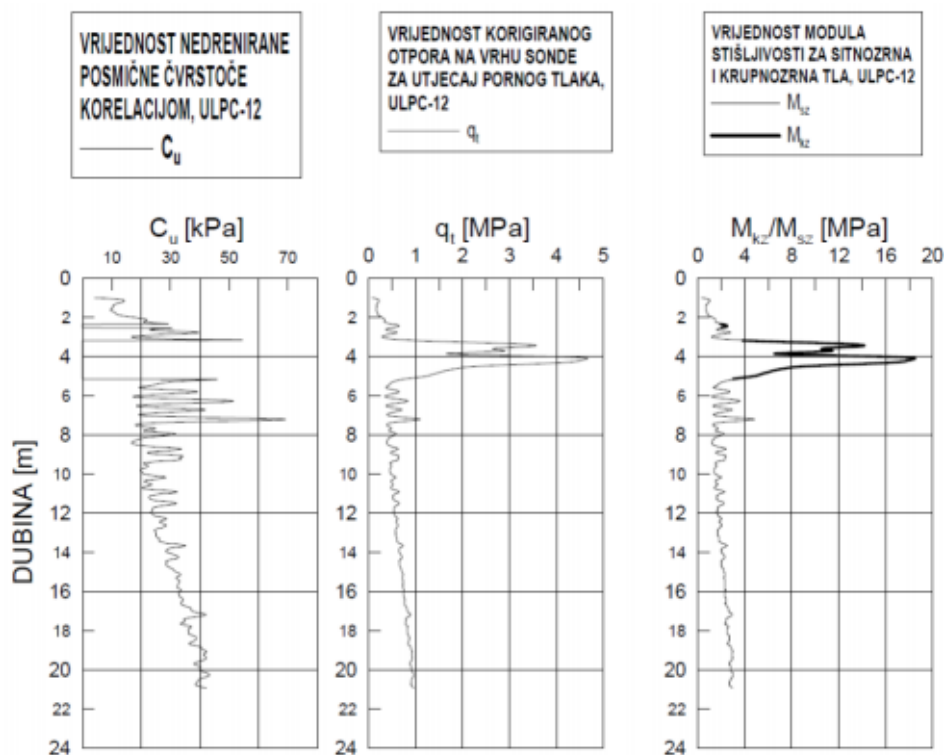
Slika 25. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{ksz}/M_{kz}] za sondu ULPC-9



Slika 26. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{kz}/M_{sz}] za sondu ULPC-10



Slika 27. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{kz}/M_{sz}] za sondu ULPC-11



Slika 28. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{kz}/M_{sz}] za sondu ULPC-12

5.2. Tehnički uvjeti izvedbe, program kontrole i osiguranja kvalitete

5.2.1. Tehničko rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

Tlo na lokaciji je građeno od mekanih marinskih sedimenata male nosivosti i velike stišljivosti. Kako bi se osigurala nosivost plćih slabonosivih slojeva tla, ubrzala konsolidacija, slijeganje objekata svelo na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirala mogućnost likvefakcije projektirano je poboljšanje tla šljunčanim pilotima promjera 100 cm i ugradnja prefabriciranih drenova tipa COFRA MD7007 ili ekvivalent. Predviđeni tehnički uvjeti izvedbe su u skladu sa uobičajenim principima projektiranja i izvedbe radova na dubokom temeljenju i poboljšanju tla te normama HRN EN 1997-1:2008 i HRN EN 1997-2:2008 – Geotehničko projektiranje, HRN EN 14731:2008 – Izvedba posebnih geotehničkih radova – Poboljšanje tla dubinskim vibriranje i HRN EN 15237:2008 – Izvedba posebnih geotehničkih radova – Uspravne drenaže.

Kako bi se osigurala nosivost plćih slabonosivih slojeva tla, ubrzala konsolidacija, slijeganje zgrade svelo na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirala mogućnost likvefakcije projektirano je sljedeće rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije:

- ugradnja šljunčanih pilota promjera 100 cm
- prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.)
- predopterećenje u trajanju od minimalno 4 mjeseca.

Šljunčani piloti se ugrađuju do dubine 10 m ispod površine terena (imaju dvojnu ulogu poboljšanja tla i dreniranja), a polipropilenski drenovi do dubine 22 m ispod površine terena.

Zahvat je podijeljen u tri zone poboljšanja tla sredine (*iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.*):

ZONA 1 – Ispod nižih dijelova objekta. Šljunčani piloti u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 3,0 x 3,0 m. Između njih se ugrađuju prefabricirani drenovi u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,25 x 1,25 m.

ZONA 2 – Ispod središnjeg dijela objekta. Šljunčani piloti u trokutastom rasporedu na osnom razmaku 2,5 i x 2,8 m. Između njih se ugrađuju prefabricirani drenovi u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,25 x 1,25 m.

ZONA 3 –nema opterećenja objektom. Nisu projektirani šljunčani piloti. Prefabricirani drenovi se ugrađuju u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,25 x 1,25 m.

Nakon ugradnje šljunčanih pilota i drenova tlo je potrebno predopteretiti nasipom do opterećenja koje je 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja ispod temeljne ploče. Visina nasipa za predopterećenje je minimalno 3,5 m. Vrijeme predopterećenja planira se na 4 mjeseca, a odluka o završetku faze predopterećenja te početku gradnje građevina donijeti će se na osnovi rezultata mjerenja slijeganja temeljnog tla.

5.2.2. Vertikalni drenovi od polipropilena

5.2.2.1. Općenito

Projektom je predviđeno ubrzanje konsolidacije ugradnjom drenova od polipropilena, dimenzija poprečnog presjeka 3 x 100 mm (tip COFRA MD7007 ili ekvivalent) do dubine 30 m ispod aktualne površine terena. Vertikalni drenovi od polipropilena se koriste za ubrzanje konsolidacije stišljivih tala zasićenih vodom kod kojih prilikom opterećenja nasipom ili temeljem objekta dolazi do dugotrajnih slijeganja temeljnog tla. Ovakvim sistemom dreniranja se omogućava pornoj vodi da teče vodoravno prema najbližem drenu (vodoravni put dreniranja je najkraći put i iznosi do polovice osnog razmaka između pojedinih drenova) te brzu evakuaciju vode iz tla. Dreniranjem se smanjuju porni tlakovi u tlu, a time tlo dolazi u drenirano stanje što pozitivno djeluje na stabilnost.

Napomena:

Projektom je predviđena i Izvedba šljunčanih stupnjaka kojima se poboljšavaju mehaničke karakteristike temeljnog tla. Šljunčani stupnjaci ujedno djeluju kao vertikalni drenovi pružajući pornoj vodi najkraći vodoravni (radijalni) put dreniranja. Dreniranjem se smanjuju porni tlakovi u tlu što pozitivno djeluje na stabilnost. Ugradnjom kamenog materijala (šljunka ili drobljenca) poboljšavaju se mehanička svojstva temeljnog tla koje se sada ponaša kao kompozit koji ima poboljšane parametre čvrstoće (zajedničko djelovanje tla i stupnjaka) i prosječni modul stišljivosti kompozita. U ovom diplomskom radu se neće podrobnije razmatrati uloga šljunčanih pilota u ovom projektu.

5.2.2.2. Način djelovanja i upotreba vertikalnih drenova

Uloga vertikalnih drenova je ubrzanje konsolidacije koherentnog tla do razine gdje su naknadna slijeganja u prihvatljivom iznosu tj. nemaju negativan utjecaj na nasip ili konstrukciju. Drenovi nemaju ulogu poboljšanja mehaničkih karakteristika tla (povećanje nosivosti i smanjenje slijeganja) nego djeluju kao mjera ubrzanja konsolidacije tla (vrijeme konsolidacije se može smanjiti od nekoliko godina ili desetaka godina na nekoliko mjeseci, ovisno o karakteristikama propusnosti tla i rasporeda drenova). Jezgra drenova je izvedena od visokokvalitetnog polipropilena i smještena je u čvrst i izdržljiv filter od geotekstila koji ima veliku propusnost i omogućava slobodan prolaz vode, a također sprječava prolaz sitnih čestica iz okolnog tla.

Ove drenove karakterizira:

- vrlo malo poremećenje okolnog tla prilikom ugradnje
- sigurno otpuštanje vode iz drena - mogućnost prilagodbe jezgre i filtera uvjetima u tlu
- brza instalacija (4000-30000 m³/dan)
- prilagodljiv razmak drenova
- mogućnost ugradnje do velikih dubina (i do 65 m)
- nije potrebna upotreba drugih građevinskih materijala
- lagana kontrola ugradnje.

5.2.2.3. Zahtjevi za drenove i kontrola kvalitete proizvoda

U smislu osiguranja kvalitete trebaju se od strane ovlaštenog tijela provoditi slijedeća (ili ekvivalentna) ispitivanja sredine (*iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.*):

- maksimalna vlačna sila drena (kN), prema EN/ISO 10319
- otpor dinamičkom utiskivanju drena, prema EN 918
- indeks propusnosti filtera drena (vh50) (mm/s), prema EN/ISO 11058
- djelotvorna veličina otvora drena (O90) (μm), prema EN/ISO 12956
- ravninski kapacitet protoka (l/ms), prema EN/ISO 12958
- trajnost (godina), prema EN 13252.

Prefabricirani vertikalni drenovi se svrstavaju u sustav potvrđivanja kvalitete 2+. Prilaže se tehnički list s navedenim svojstvima, a osim toga treba dodati i podatke o:

- proizvodu
- proizvođaču/prodavaču
- postupku proizvodnje i sirovinama

- količini i datumu isporuke.

5.2.2.4. Način ugradnje drenova

Drenovi se ugrađuju u tlo uz pomoć čelične ovojnice (mandrela) za ugradnju. Ova ovojnica je malih dimenzija, neznatno većih od samog drena, zbog lakšeg prodiranja u tlo i da bi se što manje poremetilo tlo oko drena. Drenovi se ugrađuju statičkim utiskivanjem ovojnice s drenom u tlo. Ugradnja ovojnice vibriranjem nije dopuštena zbog mogućnosti oštećenja drena prilikom ugradnje. Treba izbjegavati naknadni iskop ispod kote s koje se izvode drenovi. Iskustva pokazuju da se ovim postupkom oštećuje i čupa veliki broj drenova (preko 30 %).

5.2.3. Redoslijed izrade zahvata poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

Radovi na poboljšanju tla i ubrzanju konsolidacije se sastoje od sljedećih faza sredine (*iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.*):

1. Skidanje površinskih oko 30 cm vegetacijskog pokrova i humusa. U zonama zamočvarenja s površinskim slojevima nenosivog tla (organskog mulja s raslinjem) treba provesti zamjenu tla kamenim materijalom. Granulacija zamjene je 32-63 mm (drenažni sloj).
2. Postavljanje netkanog geotekstila. Geotekstil služi za razdvajanje zemljanog i kamenog materijala. Osobine geotekstila dane su u tablici 2-08.4-2 OTU-a za tip tla U1 i prometno opterećenje LKL V.
3. Postavljanje sloja nasipa od drobljenog drenažnog kamenog materijala (granulacije 32-63 mm) debljine 80 cm uz zbijanje završnog sloja na modul stišljivosti $M_s \approx 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
4. Izvedba šljunčanih pilota promjera $\Phi 100$ cm, duljine 10,0 m u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 3,0 m. Imaju dvojni ulogu poboljšanja tla i dreniranja. Izvedba metodom vibracijskog zbijanja (vibro compaction).

5. Ugradnja prefabriciranih geosintetičkih vertikalnih drenova od polipropilena tipa COFRA MD7007 ili ekv. do dubine 22,0 m između šljunčanih pilota u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,25 m.
6. Planiranje izdignute površine nakon izvođenja pilota i drenova i zbijanje na modul stišljivosti $M_s \geq 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
7. Izvedba prvog sloja nasipa od kamenog materijala do donje kote temeljne ploče tj. do kote $-1,25 \text{ m} = -1,95 \text{ m n.m}$ u svemu prema OTU točka 2-09.3.
8. Predopterećenje tla nasipom visine 3,5 m, tj. 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja ispod temeljne ploče. Visina predopterećenja je $H=(50/18)*1,3 \approx 3,5$ m. S obzirom na očekivano slijeganje od 65 cm uzrokovano nasipom visine 3,5 m treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja.
9. Skidanje predopterećenja, planiranje na donju kotu temeljne ploče uz zbijanje do modula stišljivosti $M_s \geq 60$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
10. Izvedba temeljne ploče i objekta.

Ukupno šljunčanih pilota $\Phi 100$ cm, $L=10,0$ m: $N=361$ kom = 3610 m'

Ukupno polipropilenskih drenova $L=22,0$ m: $N=2860$ kom = 62920 m

Predopterećenje

Kako bi se omogućila primarna i djelomična sekundarna konsolidacija tla prije izgradnje zgrade, i time ukupna i diferencijalna slijeganja zgrade smanjila na prihvatljivu mjeru s aspekta uporabivosti, potrebno je nakon ugradnje navedenih drenova tlo predopteretiti nasipom visine 3,5 m tj. minimalno 30% većeg intenziteta opterećenja od konačnog opterećenja ispod temeljne ploče. Ove slojeve nije potrebno posebno uređivati. Dovoljno je nekoliko prolaza vibrovaljkom do $M_s \geq 20$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm. Ukoliko se predopterećenje izvodi pomoću nekog drugog tereta treba voditi računa o tome da je potrebno cijelo područje opteretiti jednakim opterećenjem $\pm 10\%$ koje treba ostati nepromijenjeno tijekom procesa konsolidacije. S obzirom na očekivana veća slijeganja (> 65 cm) uzrokovano nasipom visine 3,5 m treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja. Planirano vrijeme predopterećenja

je minimalno 4 mjeseca, a odluka o uklanjanju nasipa i početku gradnje će se donijeti na osnovi rezultata mjerenja slijeganja tla.

5.2.4. Opažanje slijeganja

Kako bi se moglo kontrolirati ostvareno slijeganje od predopterećenja i prognozirati daljnja slijeganja, predviđena je ugradnja mjernih repera. Mjerenja je potrebno provoditi u vremenskim intervalima od oko 15 dana u periodu od minimalno 4 mjeseca tj. do smirivanja slijeganja. Geodetska mjerenja se sastoje od opažanja visinskog položaja mjernih repera za vrijeme trajanja predopterećenja i opažanja slijeganja zgrade u eksploataciji. Opažanja je potrebno vršiti pomoću preciznog geodetskog nivelmana.

Napomena:

Predviđena mjerenja su nužna kako bi se mogao pratiti vremenski tijek slijeganja, potvrditi ispravnost odabranih zahvata, prognozirati daljnji tijek slijeganja i kontrolirati utrošene količine materijala.

5.3. Geotehnički proračuni

5.3.1. Proračuni slijeganja

Deformacijska analiza (naprezanja i pomaci) temelja i temeljnog tla modelirana je pomoću programa Plaxis 3D v2.2 (metoda konačnih elemenata, trodimenzionalni model). Software Plaxis 3D v2.2 je odabran za proračun kako bi se dobio cjelovit uvid ponašanja tla i temeljne konstrukcije. Proračunski model je razvijen na osnovi geometrije objekta te uslojenosti i karakteristika temeljnog tla, a sastavljen je od trodimenzionalne mreže konačnih elemenata. Ponašanje tla opisano je „Hardening soil“ modelom. Udaljenosti granica proračunskog modela od mjesta najvećih promjena naprezanja su oko 80 m u svim smjerovima (granice proračuna odabrane su prema uobičajenim pravilima numeričkog modeliranja).

Napomena:

U ovom diplomskom radu se neće detaljnije prikazivati proračunski model kojim je obavljena deformacijska analiza ponašanja temelja i temeljnog tla kao ni rezultati takve analize.

5.3.2. Vremenski tijek slijeganja tla uz radijalno dreniranje

Prema rezultatima terenskih i laboratorijskih ispitivanja gornjih oko 10 m čine prašinski pijesci rahle zbijenosti tj. pjeskoviti prahovi žitkog konzistentnog stanja. Ispod ovih slojeva, a do dubine oko 35 m se protežu slojevi gline do praha, pretežno niske plastičnosti žitkog do teško gnječivog konzistentnog stanja.

Kako bi se slijeganje tla ispod nasipa u većoj mjeri ostvarilo za vrijeme gradnje predviđa se ugradnja:

- šljunčanih pilota u kvadratnom rasporedu, na osnovnom razmaku 2,5 i 3,0 m, do dubine 10 m od površine terena
- prefabriciranih vertikalnih, utisnutih drenova od polipropilena, tip COFRA MD7007 ili ekvivalent u kvadratnom rasporedu, na osnovnom razmaku 1,25 m, između šljunčanih pilota, do dubine 22 m od površine terena.

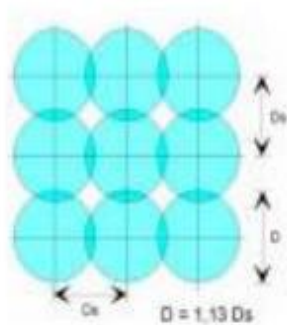
Potrebna udaljenost drenova za osiguranje traženog stupnja konsolidacije u vremenu se može dobiti preko izraza Barron-a:

$$c_h = \frac{D^2}{8t} x \left[\ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{3}{4} + \frac{1}{4} x \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right] x \ln(1 - U)^{-1}$$

, gdje je:

- t - vrijeme konsolidacije (s)
- c_h - koeficijent konsolidacije za horizontalno tečenje (m²/s)
- d - ekvivalentni promjer drena (m)
- D - promjer zone utjecaja drena (m)
- U - prosječni stupanj konsolidacije

Gornja formula pretpostavlja da je otpor otpuštanju vode unutar drena jednak nuli.



Za pravokutni raspored drenova $D=1,13 \cdot D_s$, gdje je D_s - osni razmak drenova

U gornjoj formuli se pretpostavlja da dren ima kružni poprečni presjek pa je potrebno odrediti ekvivalentni promjer drena. Ovim projektom su predviđeni drenovi tipa COFRA MD7007, ili ekvivalent, koji imaju dimenzije 100 x 3 mm.

Ekvivalentni dijametar se određuje kao:

$d = \text{opseg drena} / \pi = (2 \cdot 3 + 2 \cdot 100) / \pi = 65 \text{ mm}$ – za proračun je usvojeno 50 mm zbog pretpostavke poremećenja tla oko drena koje će umanjiti kapacitet dreniranja.

Odnos horizontalnog i vertikalnog koeficijenta propusnosti u tlu, prema objavljenim iskustvima u stručnoj literaturi, kreće se u vrlo širokim granicama $k_h = (1 \text{ do } 4) \cdot k_v$.

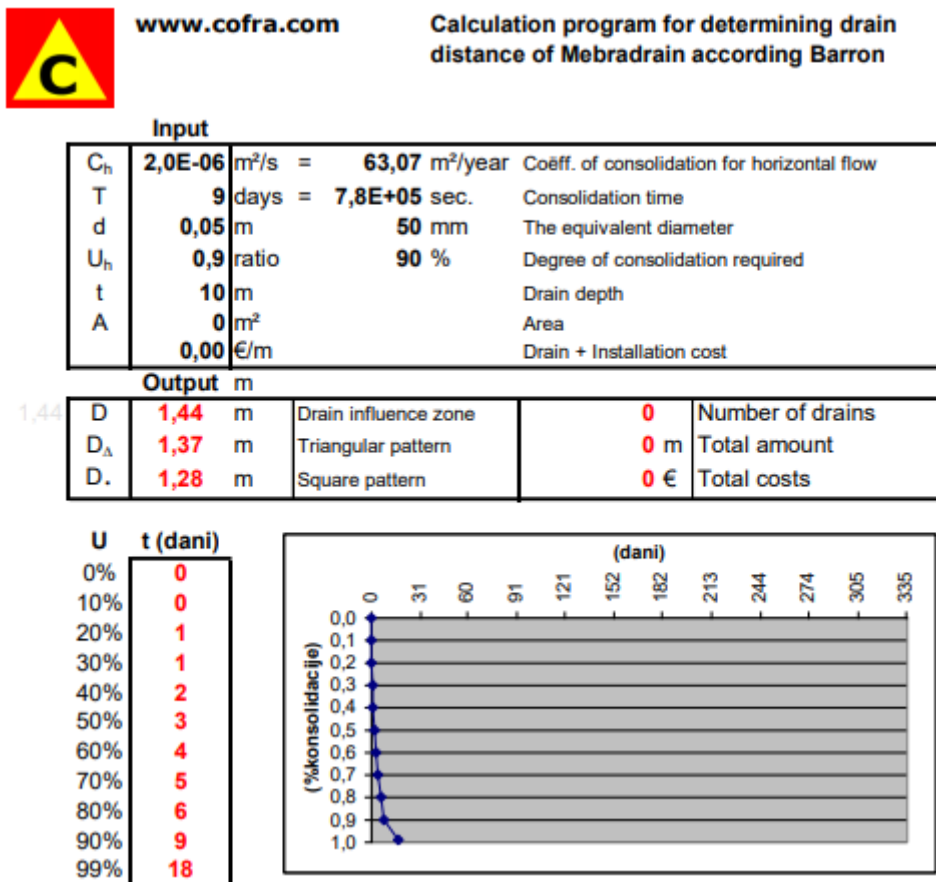
Koeficijent konsolidacije se može odrediti kao:

$$C_v = \frac{k_v \times M}{\gamma_w}, \text{ gdje je:}$$

- k_v – koeficijent propusnosti u vertikalnom smjeru
- M – modul stišljivosti materijala
- γ_w – zapreminska težina vode

Područje gornjih 10 m tla :

Na temelju rezultata geotehničkih istražnih radova koji su uključivali provedbu penetracija statičkim piezo-penetrometrom (CPTU) u kojima su obavljene pokusi disipacije pornog tlaka, za gornje slojeve tla do dubine 10 m od površine terena, procijenjena je vrijednost prosječnog horizontalnog (radijalnog) koeficijenta vodopropusnosti $k_h = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s, te vrijednost prosječnog horizontalnog (radijalnog) koeficijenta konsolidacije $c_h = 2 \cdot 10^{-6}$ m² /s sredine (iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.).



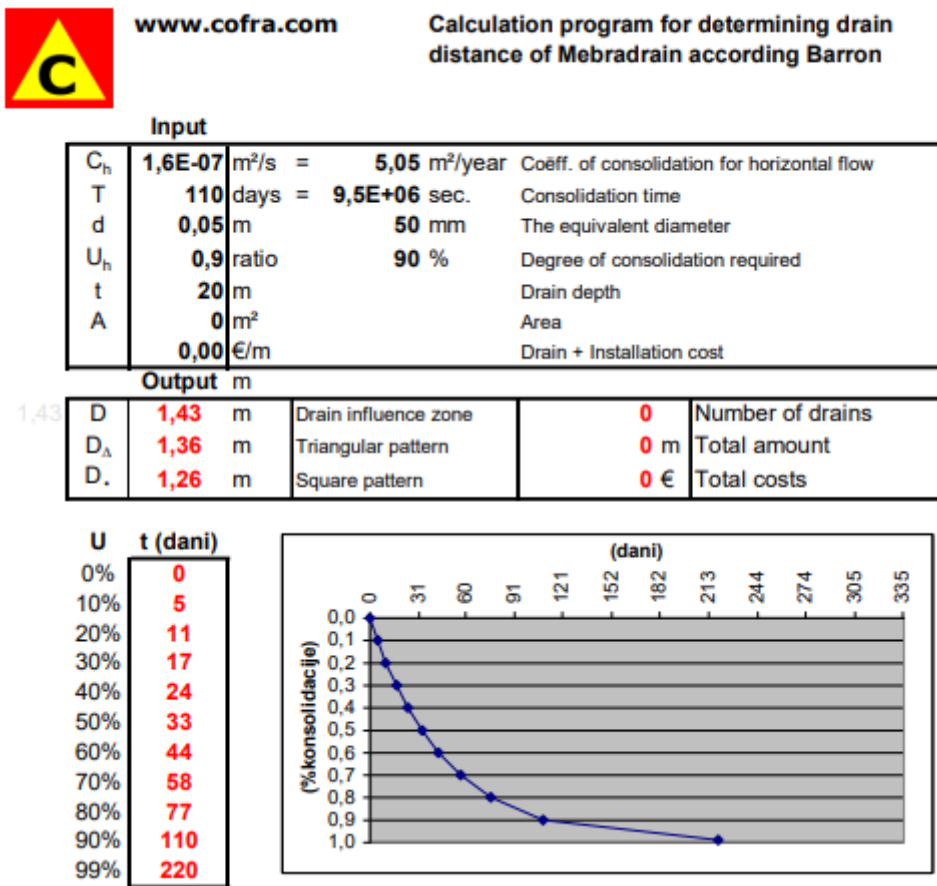
Slika 29. Proračun potrebnog razmaka između drenova

Iz proračuna se vidi da ugradnjom drenova u kvadratnom rasporedu na osnovnom razmaku 1,28 x 1,28 m, vrijeme potrebno za 90% primarne konsolidacije teoretski iznosi 9 dana, a za 100% nepunih 20 dana. Ovi drenovi imaju funkciju ubrzanja konsolidacije površinskih slojeva, što ima za posljedicu brže dreniranje i podinskih slojeva. Brzo

dreniranje gornjih slojeva će omogućiti brže dreniranje donjih, manje propusnih slojeva, u vertikalnom smjeru tj. ponovno radijalno dreniranje u zoni gornjih 10 m.

Područje ispod 10 m (do 30 m ispod razine terena):

Na temelju rezultata geotehničkih istražnih radova koji su uključivali provedbu penetracija statičkim piezo-penetrometrom (CPTU) u kojima su obavljene pokusi disipacije poreznog tlaka, za slojeve od dubine 10 m do dubine 30 m od površine terena, procijenjena je vrijednost prosječnog horizontalnog (radijalnog) koeficijenta vodopropusnosti $k_h = 8 \cdot 10^{-10}$ m/s, te vrijednost prosječnog horizontalnog (radijalnog) koeficijenta konsolidacije $c_h = 1,6 \cdot 10^{-7}$ m² /s sredine (iz projekta poboljšanja vodopropusnosti tla vertikalnim geosintetičkim drenovima, KREŠO GEO d.o.o.).



Slika 30. Proračun potrebnog razmaka između drenova

Iz proračuna se vidi da uz ugradnju drenova u kvadratnom rasporedu na osnovnom razmaku 1,25 x 1,25 m, vrijeme potrebno za 90% primarne konsolidacije teoretski iznosi 110 dana. Brzim dreniranjem gornjih 10 m će se omogućiti lakše dreniranje donjih slojeva u

vertikalnom smjeru pa se u vremenu trajanja predopterećenja (120 dana) očekuje realizacija većeg stupnja primarne konsolidacije. Preostaje sekundarna konsolidacija koju je u mekanim marinskim sedimentima teško prognozirati. Odvija se na osnovi promjene strukture tla nakon disipacije poreznih tlakova (nakon primarne konsolidacije) zbog postepene plastične deformacije samih čestica tla i viskoznih efekata u njihovim međusobnim vezama.

5.3.3. Provjera dubine utjecaja opterećenja na slijeganje tla

Kako bi se odredila potrebna dubina ugradnje drenova provjeriti će se na kojoj dubini dodatni vertikalni naponi iznose 20% geoloških (uobičajena geotehnička praksa je da se slijeganja računaju do ove dubine). Provjeriti će se slijeganje nasipa visine 0,5 m (kota dna temeljne ploče tj. $-1,25 = 1,95$ m n.m.) uz dodatak 50 kPa opterećenja od objekta što zajedno daje opterećenja nasipom visine 3,0 m i zapreminske težine $\gamma = 20$ kN/m³. Predopterećenje se ne uzima u obzir.

SLIJEGANJE ISPOD ILI IZVAN NASIPA U TOČKAMA T₃, T₄, T₅ I T₆

ULAZNI PODACI
GEOMETRIJA NASIPA

Duljina nasipa u kruni	L _n >	50.00 m
Širina nasipa u kruni	B _n =	40.00 m
Visina nasipa	h =	3.00 m
Nagib pokosa 1:n	n =	1.50
Zapr. težina nasipa	γ =	20.00 kN/m ³

KOORDINATE TOČKA:

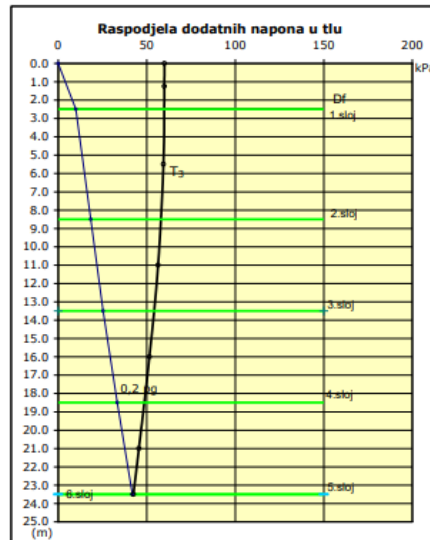
Točke	ISPOD I IZVAN NASIPA			
	T ₃ (u osi)	T ₄	T ₅	T ₆
x _i (m)	20.00	20.00	20.00	20.00
y _i (m)	0.00	8.00	17.00	25.00

DODATNI NAPONI U TLU U TOČKI T₃

Tablica

Sloj	Z _i (m)	T ₃ (kPa)
1	1.25	59.99
2	5.50	59.46
3	11.00	56.46
4	16.00	51.54
5	21.00	45.58
6	23.51	42.54

Dijagram



Slika 31. Proračun slijeganja nasipa

Iz gornjeg dijagrama se vidi da je dubina na kojoj je $\sigma_v = 20\% \sigma_g$ na dubini od 24 m tj. nešto iznad dubine ugradnje drenova (22 m ispod površine terena).

5.4. Rezultati opažanja slijeganja i ocjena poboljšanja tla

U skladu sa rješenjima iz glavnih i izvedbenih geotehničkih projekata u tlo su ugrađeni vertikalni polipropilenski drenovi i šljunčani piloti, kako bi se u kratkom vremenu ostvarila većina slijeganja.

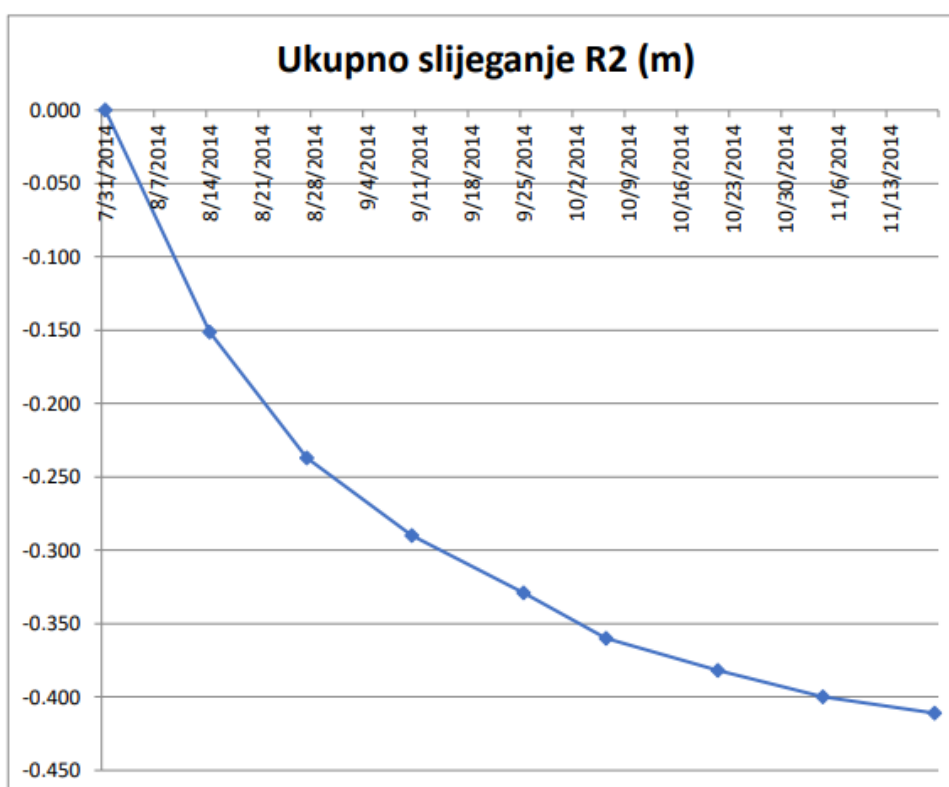
Na tlo je ugrađeno predopterećenje (nasipni kameni materijal) kojim je ostvareno veće opterećenje od konačnog (stalno i korisno opterećenje zgrade) opterećenja koje će vladati nakon uklanjanja privremenog kamenog nasipa i izgradnje građevina.

Predopterećenje je ugrađivano sukcesivno od svibnja do sredine kolovoza 2014. Planirano vrijeme predopterećenja je oko 4 mjeseca. Lokacija je opterećivana odnosno nasipana u dvije faze. U prvoj fazi je cijela površina nasipana do kote 3,7 m n.m., a radovi nasipanja su završeni 31. srpnja 2014. U drugoj fazi je dodatno nasipan dio uz terena uz Poslovnu zgradu do kote 4,7 m n.m., a radovi su završeni 13. kolovoza 2014.

Prosječno slijeganje repera u posljednja 2 tjedna opažanja, od 04.11. do 19.11.2014., bilo je nešto manje od 2 cm s tendencijom smirivanja. S obzirom na rezultate opažanja slijeganja i činjenicu da je lokacija bila značajno predopterećena u odnosu na trajno opterećenje građevinom, projektant je dao odobrenje za uklanjanje nasipa i početak radova na izgradnji građevina prije potpunog smirivanja slijeganja.

Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R2

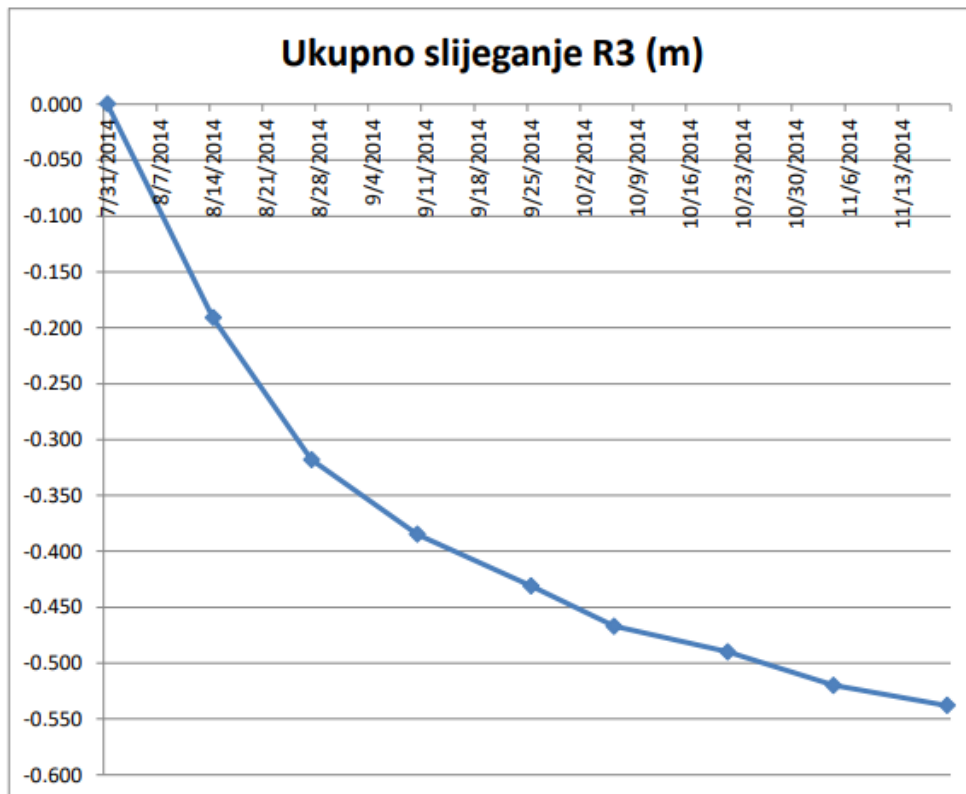
Datum mjerenja	REPER R2 (m.n.m.)	R2 - ukupno slijeganje (m)	Inkementalni pomaci (m)
31.7.2014	5,620	0,000	
14.8.2014	5,469	-0,151	-0,151
27.8.2014	5,383	-0,237	-0,086
10.9.2014	5,330	-0,290	-0,053
25.9.2014	5,291	-0,329	-0,039
6.10.2014	5,26	-0,360	-0,031
21.10.2014	5,238	-0,382	-0,022
4.11.2014	5,22	-0,4	-0,018
19.11.2014	5,209	-0,411	-0,011



Slika 32. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R2

Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R3

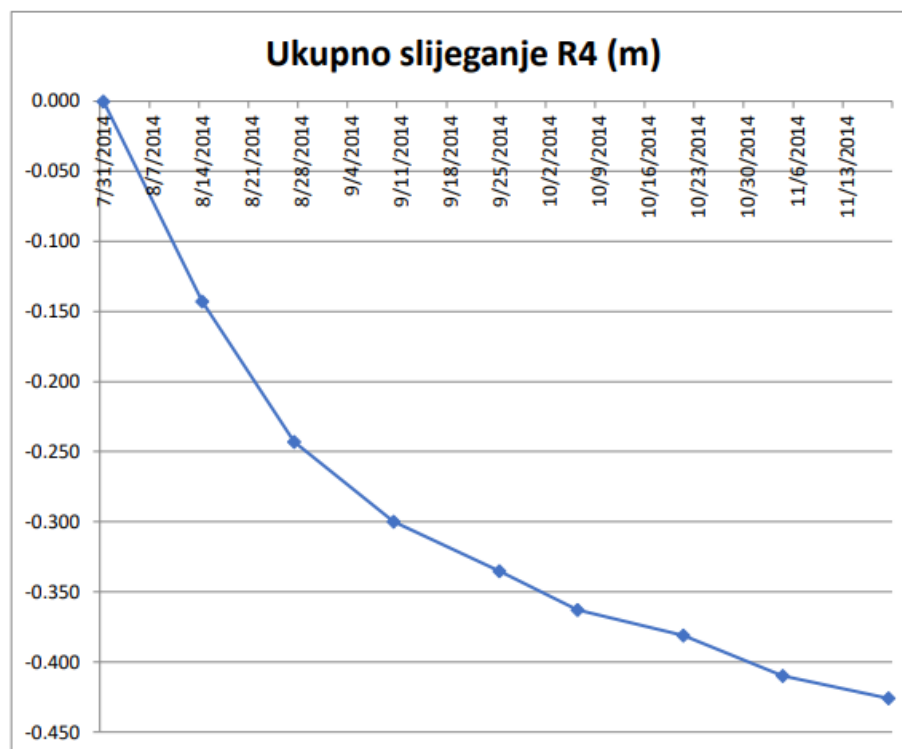
Datum mjerenja	REPER R3 (m.n.m.)	R3 - ukupno slijeganje (m)	Inkementalni pomaci (m)
31.7.2014	6,636	0,000	
14.8.2014	6,445	-0,191	-0,191
27.8.2014	6,318	-0,318	-0,127
10.9.2014	6,251	-0,385	-0,067
25.9.2014	6,205	-0,431	-0,046
6.10.2014	6,169	-0,467	-0,036
21.10.2014	6,146	-0,49	-0,023
4.11.2014	6,116	-0,52	-0,030
19.11.2014	6,098	-0,538	-0,018



Slika 33. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R3

Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R4

Datum mjerenja	REPER R4 (m.n.m.)	R4 - ukupno slijeganje (m)	Inkementalni pomaci (m)
31.7.2014	5,114	0,000	
14.8.2014	4,971	-0,143	-0,143
27.8.2014	4,871	-0,243	-0,100
10.9.2014	4,814	-0,300	-0,057
25.9.2014	4,779	-0,335	-0,035
6.10.2014	4,751	-0,363	-0,028
21.10.2014	4,733	-0,381	-0,018
4.11.2014	4,704	-0,41	-0,029
19.11.2014	4,688	-0,426	-0,016



Slika 34. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R4

6. ZAKLJUČAK

Prefabricirani vertikalni drenovi uspješno se koriste za ubrzanje konsolidacije stišljivih tala zasićenih vodom kod kojih prilikom opterećenja nasipom ili temeljem objekta dolazi do dugotrajnih slijeganja temeljnog tla. Ovakvom se metodom poboljšanja tla omogućava pornoj vodi da teče vodoravno prema najbližem drenu pri čemu dolazi do bržeg slijeganja. Dreniranjem se smanjuju porni tlakovi u tlu, a time tlo dolazi u drenirano stanje što pozitivno djeluje na stabilnost buduće konstrukcije. Iako je provedba ove metode vrlo jednostavna, određivanje konsolidacijskih parametara tla predstavlja najzahtjevniji segment. Stoga je za inženjere geotehnike vrlo važno imati stručno znanje i iskustvo prilikom poboljšanja tla ovakvim postupkom ubrzanja konsolidacije.

U prikazanom se projektu primjena prefabriciranih vertikalnih drenova, kombinirana sa ugradnjom šljunčanih pilota i izvedbom nasipa za predopterećenje, pokazala kao optimalno rješenje poboljšanja mekanog tla zasićenog vodom. Ključni inženjerski problem ovog projekta predstavlja određivanje konsolidacijskih parametara tla. Koeficijenti horizontalne konsolidacije ovdje su procijenjeni na osnovi rezultata pokusa disipacije pornog tlaka dobivenih CPTU ispitivanjem u fazi istražnih radova. Temeljem toga procijenjeno je vrijeme potrebno za realizaciju 90% primarne konsolidacije tijekom faze predopterećenja. Zbog ugradnje vertikalnih drenova vremenski proces konsolidacije tla se smanjio na nekoliko mjeseci, umjesto da traje godinama korištenjem samog predopterećenja.

Brzim i jednostavnim načinom ugradnje ukupno je izvedeno 2860 drenova do dubine 22 m. Drenovi su ugrađeni između šljunčanih pilota koji su izvedeni do 10 m. Nakon izvedbe vertikalnih drenova i pilota tlo je predopterećeno nasipom visine 3,5 m. Na osnovi mjerenja slijeganja u fazi predopterećenja donijeta je odluka o uklanjanju nasipa za predopterećenje nakon što je prirast vertikalne deformacije tla postao relativno mali (2 cm u posljednja dva tjedna opažanja), te su započeli radovi na izgradnji građevina. Bolji pokazatelj stupnja izvršenja konsolidacije tla dobio bi se praćenjem stanja pornih tlakova, ali piezometri zatvorenog tipa nažalost nisu ugrađeni u tlo.

7. POPIS LITERATURE

- Chu, J. i Raju, V. (2013): Prefabricated vertical drains. U: Kirsch, K. i Bell, A. Ground Improvement, 3rd edition. CRC press, Taylor and Francis group.
- Chu, J., Bo, M., & Choa, V. (2006): Improvement of ultra-soft soil using prefabricated vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(6), 339–348.
- Gotić, R. i Gotić, I. (2000): Temeljenje građevina na poboljšanom tlu. Stručni rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.
- Hansbo, S. (1993): Band drains. U: Moseley M.P. Ground Improvement. Blackie academic and professional, CRC press, Inc.
- Holtz, R. D. (1987): Preloading with prefabricated vertical strip drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 6(1-3), 109–131.
- Indraratna, B., Bamunawita, C., Redana, I. W., & McIntosh, G. (2003): Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 7(3), 127–137
- Kavur, B. (2018): Poboljšanje tla i stijena. Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.
- Liu, H.-L., Chu, J., & Ren, Z. (2009): New methods for measuring the installation depth of prefabricated vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 493–496.
- Liu, H., & Chu, J. (2009): A new type of prefabricated vertical drain with improved properties. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 152–155.
- Nonveiller, E. (1979): *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Zagreb. Školska knjiga.
- Sakleshpur, V., Prezzi, M., Salgado, R. (2018): Ground Engineering using Prefabricated Vertical Drains: A Review. *Geotechnical Engineering* 49(1), 45-64.
- Scorza J., Fox, G. (2014): Prefabricated vertical drains. *Geoengineer*. Dostupno na: <https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-542-soil-site-improve-winter-2014/assignments/prefabricated-vertical-drains>. Datum preuzimanja: 14.04.2021.

Sanyal, T. (2016): Consolidation of Soft Soil with Prefabricated Vertical Jute Drain. *Jute Geotextiles and Their Applications in Civil Engineering*, 117–125.

Vitković, V. (2016): Ubrzanje vremenskog toka slijeganja tla korištenjem šljunčanih pilota. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin.

8. POPIS SLIKA

Slika 1. Tipične krivulje vremenskog slijeganja tla za različite situacije (prema Sakleshpur i sur. 2018)	4
Slika 2. Radijalno dreniranje tla vertikalnim drenovima tijekom predopterećenja (prema Sakleshpur i sur. 2018)	4
Slika 3. Odnos između prosječnog stupnja konsolidacije U_v i vremenskog faktora T_v izveden na temelju rješenja jednadžbe (1) (prema Bo i sur. 2003).....	7
Slika 4. Karakteristične dimenzije trakastog PVD-a (Chu i Raju, 2013)	8
Slika 5. Odnos između stupnja postignute konsolidacije (U_h ili U_v) i vremenskog faktora (T_h ili T_v) za različite vrijednosti geometrijskog parametra n (Bo i sur. 2003) ..	9
Slika 6. Kvadratni i trokutni raspored drenova i karakterističan promjer stupca tla d_e (Hansbo, 1993).....	10
Slika 7. Model poremećene i neporemećene zone oko verikalnog drena (Chu i Raju, 2013).....	12
Slika 8. Uobičajene vrste PVD-a (Chu i Raju, 2013)	17
Slika 9. Integrirani PVD (Liu i Chu, 2009)	18
Slika 10. Dren kružnog poprečnog presjeka (Chu i Raju, 2013).....	19
Slika 11. Ovisnost traženog kapaciteta odvodnje o duljini PVD-a i propusnosti tla (Chu i Raju, 2013)	21
Slika 12. PVD sa ispisanom mjernom skalom (Liu i sur. 2009)	25
Slika 13. PVD s dvije žice, metoda mjerenja dubine (Liu i sur. 2009)	26
Slika 14. Uređaj za mjerenje električnog otpora žica u PVD-u (Liu i sur. 2009).....	27
Slika 15. PVD s jednom žicom, metoda mjerenja dubine (Liu i sur. 2009).....	28
Slika 16. Stroj za statičko utiskivanje drenova (Liu i sur. 2009).....	29
Slika 17. Teglenica opremljena za ugradnju PVD-a (Chu i sur. 2009)	29
Slika 18. Ugradnja PVD-a strojnim utiskivanjem (Scorza i Fox, 2014)	30
Slika 19. Romboidni i pravokutni poprečni presjek mandrele (Chu i Raju, 2013)	31
Slika 20. Karakteristične dimenzije sidrene pločice i sidrene šipke (Chu i Raju, 2013)	31
Slika 21. Ugradnja piezometra unutar PVD-a (Chu i Raju, 2003)	32
Slika 22. Praćenje učinaka poboljšanja tla PVD-ovima (prema Sanyal, 2016).....	33
Slika 23. Prikaz fizikalnih karakteristika materijala, bušotina ULPB-7.....	38
Slika 24. Usporedni dijagram dobivenih vrijednosti iz CPTU-i edometra [c_u , q_t , M_k] ..	39

Slika 25. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{ksz}/M_{kkz}] za sondu ULPC-9.....	39
Slika 26. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{ksz}/M_{kkz}] za sondu ULPC-10.....	40
Slika 27. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{ksz}/M_{kkz}] za sondu ULPC-11.....	40
Slika 28. Prikaz dijagrama dobivenih vrijednosti iz CPTU-a [c_u , q_t i M_{ksz}/M_{kkz}] za sondu ULPC-12.....	41
Slika 29. Proračun potrebnog razmaka između drenova	50
Slika 30. Proračun potrebnog razmaka između drenova	51
Slika 31. Proračun slijeganja nasipa	53
Slika 32. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R2	55
Slika 33. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R3	56
Slika 34. Podaci mjerenja i dijagram slijeganja repera R4	57

9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste laboratorijskih i in situ ispitivanja prikladne za određivanje parametara konsolidacije (prema Chu i Raju, 2013)	16
Tablica 2. Tipični poprečni presjeci jezgri trakastih drenova (prema Chu i Raju, 2013)	18
Tablica 3. Preporučene vrijednosti za mehaničke parametre geotekstila filtra (prema Holtz, 1987)	23