

# Temeljenje mosta preko potoka Vuger

---

Ćorić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:266143>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Ćorić

**TEMELJENJE MOSTA  
PREKO POTOKA VUGER**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Ćorić

**TEMELJENJE MOSTA  
PREKO POTOKA VUGER**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan Ćorić

**FOUNDATION OF A BRIDGE  
OVER THE VUGER CREEK**

MASTER THESIS

Zagreb, 2024.





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan Ćorić

**TEMELJENJE MOSTA  
PREKO POTOKA VUGER**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan Ćorić

**FOUNDATION OF A BRIDGE  
OVER THE VUGER CREEK**

MASTER THESIS

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sc. Mario Bačić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Ivan Ćorić	0082059168
(Ime i prezime)	(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

**Temeljenje mosta preko potoka Vuger**  
(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

**Foundation of a bridge over the Vuger creek**  
(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-  
(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-  
(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum: 17.09.2024

Mentor: izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 4

IZVJEŠĆE MENTORA O PROVEDENOJ PROVJERI IZVORNOSTI  
PISANOG DIJELA DIPLOMSKOGA RADA



Ime i prezime studenta:

Ivan Ćorić

JMBAG:

0082059168

Naslov teme diplomskog rada (HR):

Temeljenje mosta preko potoka Vuger

Ukupna podudarnost:

8%

Izvori s interneta:

5%

Publikacije:

2%

Studentski radovi:

5%

Ime i prezime mentora:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Mišljenje mentora (rad (ne)zadovoljava uvjete izvornosti) s obrazloženjem:

Rad zadovoljava uvjete izvornosti.

Datum:

17.09.2024.

Potpis mentora:



**OBRAZAC 5**

**IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Ja:

Ivan Ćorić, 0082059168

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Temeljenje mosta preko potoka Vuger

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

13.9.2024.

Potpis:



**OBRAZAC 6**

**IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA**

Ja :

Ivan Ćorić, 42050419097

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Temeljenje mosta preko potoka Vuger

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.9.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

13.9.2024.

Potpis:

## SAŽETAK

Tema diplomskog rada je temeljenje mosta preko potoka Vuger u Sesvetama. Napravljen je proračun armiranobetonskih bušenih pilota čija svrha je temeljenje upornjaka mosta. Izbušene su dvije bušotine, a rezultati su korišteni za procjenu stratifikacije tla i njegovih fizikalno-mehaničkih karakteristika. Čitav profil tla na području ispod mosta čine gline, koje su bliže površini niskoplastične te im se plastičnost povećava s dubinom. Most je temeljen na devet pilota, šest ispod jednog upornjaka te tri ispod drugog. Opisan je postupak temeljenja na pilotima te istražni radovi koji se pritom koriste. Provedeni su analitički i računalni proračuni nosivosti pilota, a računalno su provjereni i horizontalni i vertikalni pomaci te rezne sile. Za proračun su korišteni analitički izrazi te numerička analiza primjenom programa RS Pile.

**Ključne riječi:** bušeni armiranobetonski pilot, temeljenje mosta, analiza nosivosti, slijeganje pilota, grupa pilota

## SUMMARY

The topic of the thesis is the foundation of a bridge over the Vuger creek in Sesvete. A calculation of reinforced concrete bored piles was made, the purpose of which is the foundation of the bridge abutments. Two boreholes were drilled, while the results were used to estimate soil stratification and its physical - mechanical characteristics. The entire soil profile in the area under the bridge is made up of clays, which are low-plastic closer to the surface and their plasticity increases with depth. The bridge is based on nine piles, six under one abutment and three under the other. The procedure based on pilots and the investigative works used are described. Analytical and computer calculations of the bearing capacity of the piles were carried out, while horizontal and vertical displacements and cutting forces were also computer checked. Analytical expressions and numerical analysis using the RS Pile program were used for the calculation.

**Key words:** drilled reinforced concrete pile, bridge foundation, piles bearing capacity, piles settlement, group of piles



**POPIS KRATICA**

<i>PP2-B</i>	proračunski pristup 2-B
<i>HOK</i>	Hrvatska osnovna karta
<i>SPT</i>	standardni penetracijski test
<i>CL</i>	low plasticity clay (glina niske plastičnosti)
<i>CH</i>	high plasticity clay (glina visoke plastičnosti)
<i>GSU</i>	granično stanje uporabivosti
<i>GSN</i>	granično stanje nosivosti
<i>RLT</i>	rapid load testing (test brzog opterećenja)
<i>PIT</i>	pile integrity test (ispitivanje cjelovitosti pilota)

---

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ii</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>iii</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METODE I TEHNIKE RADA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. TEMELJENJE NA PILOTIMA</b> .....	<b>3</b>
3.1. Primjena pilota .....	3
3.2. Vrste pilota .....	5
3.2.1. Podjela prema vrsti materijala .....	5
3.2.2. Podjela prema načinu prijenosa sile .....	8
3.2.3. Podjela prema stupnju razmicanja tla .....	9
<b>4. ISTRAŽNI RADOVI I ODABIR GEOTEHNIČKOG PROFILA TLA</b> .....	<b>10</b>
4.1. Istražni radovi .....	10
4.1.1. Inženjerskogeološka istraživanja .....	10
4.1.2. Geotehnička istražna bušenja .....	12
4.1.3. Laboratorijska ispitivanja .....	13
4.2. Odabir geotehničkog profila tla .....	14
4.2.1. Nedrenirana posmična čvrstoća prvog sloja .....	21
4.2.2. Nedrenirana posmična čvrstoća drugog sloja .....	22
4.2.3. Nedrenirana posmična čvrstoća trećeg sloja .....	23
4.2.4. Geotehnički profil tla .....	24
<b>5. PRORAČUN PILOTA</b> .....	<b>25</b>
5.1. Temeljenje mosta .....	25
5.2. Nosivost jednog pilota .....	26
5.2.1. Otpor na bazi pilota .....	26
5.2.2. Otpor na plaštu pilota .....	27
5.2.3. Ukupni otpor pilota .....	29
5.3. Nosivost grupe pilota .....	31
5.3.1. Nosivost prve grupe pilota .....	32
5.3.2. Nosivost druge grupe pilota .....	33

---

5.4.	Proračun u programu RS Pile.....	34
5.4.1.	Provjera nosivosti pilota.....	35
5.4.2.	Granično stanje uporabivosti.....	37
5.4.3.	Granično stanje nosivosti.....	43
5.5.	Armiranje pilota.....	51
<b>6.</b>	<b>TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE I PROGRAM KONTROLE KVALITETE .....</b>	<b>54</b>
6.1.	Tehnički uvjeti izvedbe.....	54
6.2.	Program kontrole kvalitete.....	56
6.2.1.	Ispitivanje cjelovitosti pilota.....	56
6.2.2.	Statički test nosivosti pilota.....	59
6.2.3.	Dinamički test nosivosti pilota.....	60
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>62</b>
	<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>63</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>66</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>69</b>

## 1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je temeljenje mosta preko potoka Vuger u Sesvetama. Problematika je zanimljiva s geotehničkog gledišta zbog nepovoljnog sastava tla na području mosta te potrebe za temeljenjem mosta na dubokim temeljima, u ovom slučaju pilotima. Tlo na lokaciji je glina sa povremenim udjelima pjeskovite frakcije. Premda relativno malog raspona, ovaj most je od velikog prometnog značaja za naselje, s obzirom da se nalazi na vrlo prometnoj mikrolokaciji odmah pokraj ulice Ljudevita Posavskog, jedne od najfrekventnijih ulica u Sesvetama. Dva prometna traka na novom mostu omogućit će bolju povezanost automobilskeg prometa, a neposredno prije mosta predviđen je i obostrani nogostup za pješake. Osim proširenja, u planu je i potpuna rekonstrukcija mosta zbog njegove dotrajalosti. Kao podloga za izvedbu radova temeljenja dostupno je više vrsta provedenih istraživačkih radova koji uključuju inženjerskogeološka istraživanja, geotehnička istražna bušenja te laboratorijska istraživanja. Osim istraživanja, dostupni su i proračuni konstrukcije koji u obzir uzimaju vlastitu težinu, dodatna stalna opterećenja, opterećenja od tla, promet, potresno opterećenje te promjenu temperature. Bitno je napraviti proračune za pojedinačne pilote, kao i za grupe pilota kako bi se provjerile nosivosti, slijeganja te horizontalni pomaci. Provedene su provjere graničnog stanja nosivosti i uporabivosti sukladno Eurokodu 7, koji se odnosi na geotehničko projektiranje, a sve prema proračunskom pristupu 2 koji se koristi za proračune pilota. Nakon izvedbe, potrebno je definirati i redovito provoditi program kontrole kvalitete kako bi se izbjegli eventualni dodatni problemi i troškovi.

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

Pri razradi teme temeljenja mosta preko potoka Vuger u Sesvetama korišteni su podaci iz ranije obavljenih terenskih i laboratorijskih istraživanja. Ta ispitivanja odnose se na dvije geotehničke bušotine iz kojih su dobivene informacije o tlu putem uzorkovanja, standardnog penetracijskog testa te raznih laboratorijskih pokusa. Budući da je ustanovljeno da su svi slojevi tla koherentni, bilo je bitno procijeniti nedreniranu posmičnu čvrstoću svakog sloja kao relevantan ulazni parametar za proračun pilota. Nakon odabira geotehničkog profila tla obavljeni su analitički proračuni vezani za osnu nosivost pilota i grupa pilota. Konačne vrijednosti umanjene su odgovarajućim parcijalnim koeficijentima sukladno PP2 – B. Korišteni su empirijski izrazi koji se odnose na otpornost pilota na plaštu i na stopi. Proračun za slijeganje i poprečne pomake izvršen je pomoću programa RS Pile, kojim je također potvrđena ručno izračunata nosivost pilota. Naposljetku, načelno su opisani tehnički uvjeti izvedbe i program kontrole kvalitete prikladan za predmetni most. Faze diplomskog rada uključuju pregled literature u području mostova i temeljenja na pilotima, korištenje podloga za odabir geotehničkog profila tla na području mosta, analitički proračun nosivosti pilota te provođenje računalnog proračuna u svrhu dobivanja izlaznih podataka. Konačni izlazni podaci daju informacije o nosivosti pilota i grupe pilota, slijeganjima i poprečnim pomacima pilota te reznim silama.

### 3. TEMELJENJE NA PILOTIMA

Temeljenje na pilotima predstavlja jedan od najpopularnijih te najzastupljenijih načina dubokog temeljenja. Pilot se kao vrsta temelja koristi primarno u situacijama kada temeljno tlo na manjim dubinama nije dovoljno otporno ili kruto da sigurno preuzme djelovanje gornje konstrukcije [1]. Piloti su se pokazali korisnima i u uvjetima likvefakcije te u praksi postoji mnogo primjera gdje su piloti dobro reagirali prilikom potresa koji je izazvao likvefakciju [2].

Kroz svoju dugotrajnu primjenu pokazali su se korisnima kod građevina sa velikim koncentriranim opterećenjima kako bi pospješili prijenos horizontalnih i vertikalnih sila u bolje tlo koje se nalazi na nedosežnim dubinama za plitke temelje [3].

#### 3.1. Primjena pilota

Piloti su temelji koji se koriste tisućama godina, uz razne adaptacije i promjene u materijalima i načinu ugradnje. U svojim začecima, temeljenje na pilotima korišteno je kako bi se ojačalo nepogodno tlo u blizinama rijeka, gdje su se ljudi zbog potrebe za vodom najčešće naseljavali. U to vrijeme piloti su bili drveni, a u tlo su se zabijali ručno ili ubacivali u ranije iskopane rupe popunjene šljunkom i pijeskom. Neki od poznatih primjera primjene pilota sežu u 10. stoljeće prije Krista, i to na prostor današnje Švicarske gdje su drveni piloti zabijani u plitka jezera te su na njima građene kuće [4].

Prilikom odabira načina temeljenja, jedno od prvih pitanja koje traži odgovor je postoji li potreba za dubokim temeljenjem te odabirom pilota ili se prijenos sila i podupiranje konstrukcije može jednostavnije riješiti plitkim temeljima. Ukoliko ostale vrste temeljenja nisu isplative, često se pribjegava temeljenju pilotima.

Razlozi za odabir metode temeljenja pilotima mogu biti brojni, a jedan od glavnih koji valja spomenuti je visoka razina podzemne vode. Piloti su općenito pogodni za temeljenje u blizinama kanala i vodovoda te su otporniji na nepredvidive uvjete uzrokovane vodom. To je jedan od razloga zašto su mostovi često temeljeni na pilotima. Primjer uporabe pilota u vodnim uvjetima vidljiv je na slici 1, dok slika 2 prikazuje primjer upornjaka mosta temeljenih na grupama pilota, kao što je slučaj i u ovom radu. Osim toga, koristi ih se i u uvjetima velikih ili nejednolikih opterećenja, kao i u slučajevima kada je tlo u blizini površine stišljivo [5, 6, 7].



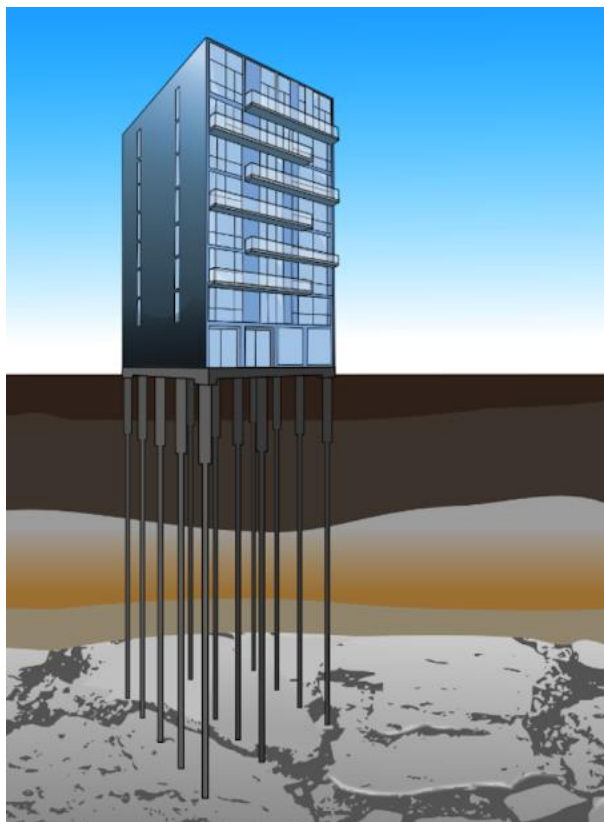
**Slika 1.:** Uporaba pilota u blizini rijeke (Izvor: [6])



**Slika 2.:** Temeljenje upornjaka mosta na pilotima (Izvor: [7])

Slika 3 zorno prikazuje ranije spomenutu primjenu pilota pri prijenosu sila u kvalitetnije tlo. Prikazana zgrada nalazi se na nepogodnom mekom tlu u kojem bi uporaba plitkih temelja izazvala slijeganja konstrukcije koja bi izazvala prekoračenje graničnog stanja uporabivosti. Piloti su u ovom slučaju projektirani dovoljne duljine da dođu do stijene koja se nalazi

duboko ispod površine. Ta stijena preuzet će sile od konstrukcije te na taj način neće doći do propadanja temelja u tlo [8].



Slika 3.: Piloti prenose sile u stijenu (Izvor: [8])

## 3.2. Vrste pilota

Postoje razne podjele pilota, no najčešće se dijele prema materijalu i načinu prijenosa sile u tlo. Vrijedne spomena su i neke druge podjele koje uzimaju u obzir način ugradnje pilota i koliko će tlo biti razmaknuto prilikom ugradnje.

### 3.2.1. Podjela prema vrsti materijala

Prva i najstarija vrsta pilota su drveni piloti. Danas se rijetko koriste u Europi, no u SAD-u su i dalje frekventno u uporabi. Primjeri drvenih pilota u Europi najčešće su vidljivi u sjevernim krajevima. Glavna mana im je mogućnost truleži [9].





Slika 4.: Drveni piloti (Izvor: [10])

Čelični piloti češće su rješenje od drvenih, no pri ugradnji je nužna izvedba antikorozivne zaštite u vidu premaza ili katodne zaštite, kako bi se izbjeglo hrđanje. Najveća prednost ovakvih pilota leži u njihovoj nosivosti te se često koriste ispod velikih građevina. Mogu penetrirati kroz krute slojeve te volumen razmaknutog tla prilikom ugradnje nije velik. S druge strane, poprilično su skupi u usporedbi sa ostalim vrstama pilota, tako da je pri odabiru vrste pilota potrebno oprezno napraviti procjenu isplativosti čeličnih pilota. Zbog rizika od korozije, ne preporuča se ugradnja čeličnih pilota u agresivnim sredinama. Mogu biti cjevastog oblika, a često se izvode i kao I ili H-profilu [9, 11].



Slika 5.: Čelični piloti u obliku H-profila (Izvor: [12])

Treća bitna skupina pilota su betonski piloti, koji se ipak najčešće armiraju tako da je riječ o armiranobetonskim pilotima. Armiranobetonski piloti mogu biti predgotovljeni, prednapeti ili izvedeni na licu mjesta. Ova vrsta pilota s vremenom je zamijenila drvene te su trenutno najčešće korišteni piloti od navedene tri skupine [9, 12].



Slika 6.: Betonski piloti kružnog presjeka (Izvor: [13])

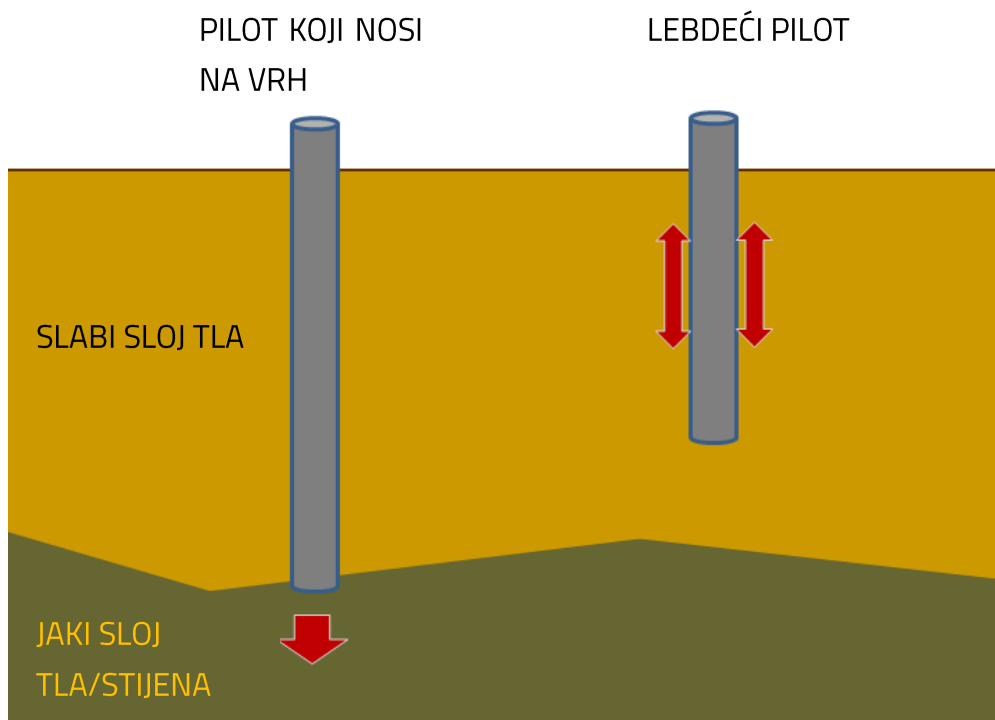
### 3.2.2. Podjela prema načinu prijenosa sile

Prema načinu prijenosa sile pilote je moguće podijeliti na pilote koji nose na vrh, pilote koji nose trenjem po plaštu te pilote koji nose na vrh i trenjem po plaštu [9].

Piloti koji prenose silu preko vrha obično su svojim donjim vrhom zabijeni u čvrsto tlo ili stijenu. Iz tog razloga preporučljivo ih je koristiti u slučaju kada je donji sloj jačeg tla ili stijene unutar razumnog raspona. Praksa je pokazala da značajno trenje po plaštu ipak postoji i kod pilota koji nose samo na vrh [9, 14].

Piloti koji silu prenose trenjem po plaštu, odnosno tzv. "lebdeći piloti" koriste se ako je kruti sloj tla na prevelikoj dubini te bi korištenje pilota koji nose na vrh bilo neekonomično. Svi piloti nose na trenje, više ili manje [9].

Kombinirana vrsta pilota nosi značajno i na vrh i na trenje. U tom slučaju prvo je potrebno potpuno mobilizirati trenje na plaštu, a tek onda pilot može nositi na vrh [9].



Slika 7.: Pilot koji nosi na vrh i pilot koji nosi na trenje (Izvor: [15])

### 3.2.3. Podjela prema stupnju razmicanja tla

Treća i najobuhvatnija podjela pilota odnosi se na stupanj razmicanja tla. Piloti se prema tome dijele na tri skupine: piloti koji jako razmiču tlo, piloti koji malo razmiču tlo te piloti koji ne mijenjaju gustoću okolnog tla. Piloti koji jako razmiču tlo obično su zabijani piloti koji sami po sebi imaju značajnu zapremninu. S druge strane, piloti koji malo razmiču tlo odnose se na pilote manje zapremnine koji zahtijevaju manje prostora u tlu. Piloti koji ne mijenjaju gustoću okolnog tla podrazumijevaju pilote koji se izvode iskopom tla te ugradnjom gradiva u iskopani prostor. Ovdje spadaju bušeni piloti. U nastavku su nabrojane neke prednosti i mane svake navedene vrste pilota [9, 15].

Piloti koji jako razmiču tlo relativno su jeftini, neovisni o razini podzemne vode te se prilikom njihove ugradnje zbija nekoherentno tlo čime se poboljšavaju nosivost i krutost. Problemi koji se javljaju kod ovakvih pilota većinom su isti kao problemi zabijanih pilota. Izvedba je vrlo bučna, moguća su oštećenja, nema mogućnosti provjere parametara tla, pomaci tla mogu oštetiti objekte u okolini kao što su drugi piloti, podzemne instalacije ili susjedne građevine, a prilikom ugradnje bitno je i da prostor u kojem se radi nije visinski ograničen [9].

Piloti koji malo razmiču tlo a izvode se bez ranijeg iskopa tla dijele neke prednosti i mane s pilotima koji jako razmiču tlo, no samim time što manje razmiču tlo zbog manje vlastite težine izazivaju i manje vibracije pri ugradnji što smanjuje negativan učinak na okolne konstrukcije [9].

Od prve dvije skupine značajno se razlikuju piloti koji se umeću u ranije izveden strojni iskop tla. U ovom slučaju nema opasnosti od razmicanja tla, dužina pilota može se mijenjati, moguć je uvid u uvjete u tlu i usporedba s ranije obavljenim istražnim radovima, nosivost ne ovisi o uvjetima izvedbe te se stvara manja buka u usporedbi s prve dvije skupine pilota. Ipak, i ova skupina ima određene mane koje se odnose na osjetljivost betona na podzemnu vodu i onečišćenje, potrebu odlaganja iskopanog materijala kojom se akumulira trošak te najvažnije, rizik od gubitka nekoherentnog tla prilikom iskopa što može rezultirati smanjenjem nosivosti i neželjenim slijeganjem okolnog tla [9, 15].



## 4. ISTRAŽNI RADOVI I ODABIR GEOTEHNIČKOG PROFILA TLA

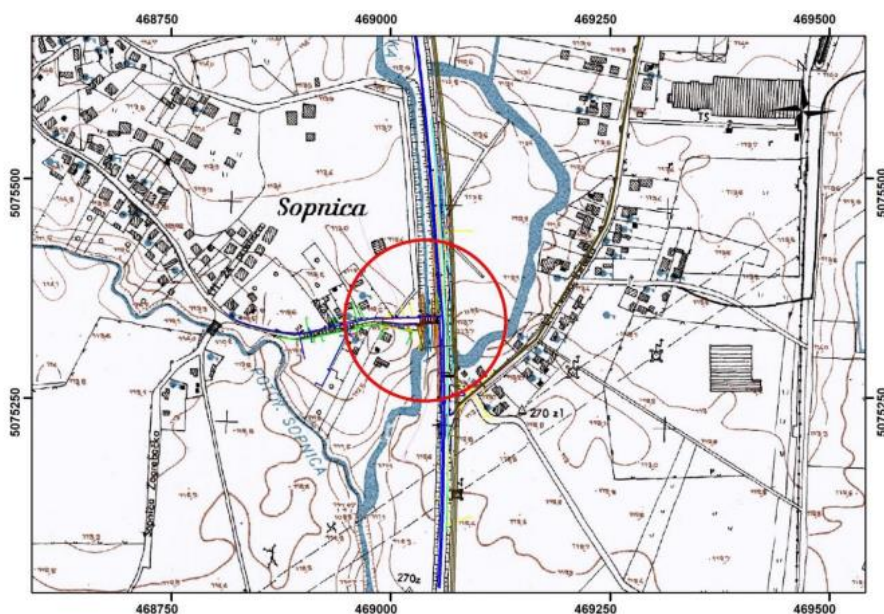
### 4.1. Istražni radovi

Za potrebe rekonstrukcije mosta preko potoka Vuger u Sesvetama korištene su tri vrste istražnih radova: inženjerskogeološka istraživanja, geotehnička istražna bušenja te laboratorijska ispitivanja. Detaljan opis svake pojedine vrste radova te rezultati dani su u geotehničkom elaboratu izrađenom od strane Centra Građevinskog Fakulteta [16].

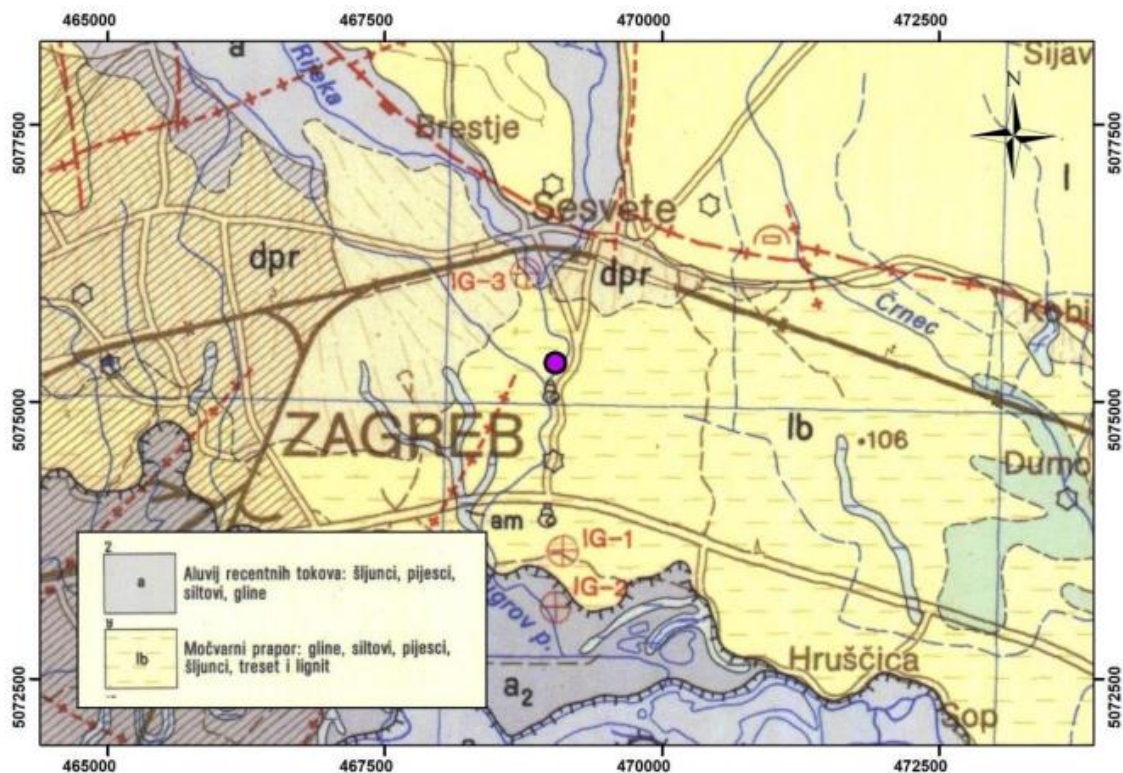
#### 4.1.1. Inženjerskogeološka istraživanja

Inženjerskogeološka istraživanja fokusirana su na određivanje morfoloških, geoloških te inženjerskogeoloških značajki lokacija. Važan rezultat ovog koraka istraživanja je određivanje točnih lokacija na kojima će se raditi istražna bušenja [16].

Lokacija mosta obilježena je na Hrvatskoj osnovnoj karti (HOK) te na Osnovnoj geološkoj karti čime su dobiveni podaci o okruženju mosta, kao i materijalima u tom području. Postojeće stanje mosta fotografirano je s južne i sjeverne strane [16, 17].



Slika 8.: Lokacija mosta preko potoka Vuger na podlozi HOK 1:5000 (Izvor: [16])



Slika 9.: Lokacija mosta preko potoka Vuger na Osnovnoj geološkoj karti, list Ivanić grad (Izvor: [16])



Slika 10.: Mikrolokacija postojećeg mosta (Izvor: [16])

Most se nalazi na nadmorskoj visini između 113 i 114 metara. Sa sjeverne strane mosta u dnu korita nalaze se aluvijalni sedimenti, dok je južna strana zabetonirana. Sjevernom stranom također prolazi vodovodna infrastruktura [16].

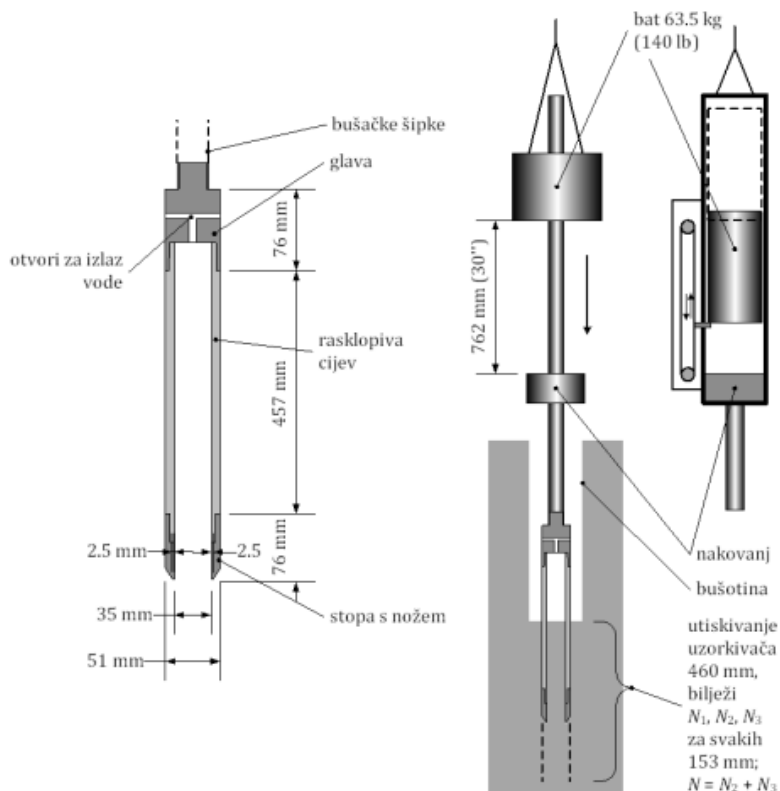
Prema Hrvatskoj geološkoj karti, list Ivanić Grad [18], na području istraživanja nalaze se pleistocenske naslage prekrivene aluvijalnim sedimentima potočnih tokova.

Očekivani slojevi u istražnom bušenju trebali bi biti pretežno sitnozrni, glinoviti ili pjeskoviti siltovi. Ovakva tla karakterizira slaba vodopropusnost. Kasnije bušenje potvrdilo je sadržaj geoloških karata, s obzirom da se na lokaciji nalaze gline niske i visoke plastičnosti [16].

#### **4.1.2. Geotehnička istražna bušenja**

Drugi korak nakon inženjerskogeoloških istraživanja je bušenje istražnih bušotina sa kontinuiranim jezgrovanjem, uzimanjem uzoraka te uporaba standardnog penetracijskog testa. Bušenje se radi kako bi se dobio uvid u uslojenost tla te razinu podzemne vode. Riječ je o postupku u kojem se u tlo ili stijenu prodire odgovarajućim bušačim priborom do zone tla u kojoj se ne očekuju znatnije naponsko-deformacijske promjene [19].

Prilikom bušenja izveden je i standardni penetracijski test. Riječ je o najraširenijem i najjednostavnijem "in situ" pokusu za ispitivanje gustoće, čvrstoće i krutosti tla i stijena [17]. Cilj je dobivanje uvida u fizikalno-mehaničke karakteristike temeljnog tla, a sve sukladno relevantnom standardu HRN EN 1997-2:2012 Eurokod 7. Pokus se izvodi na način da se na niz bušačkih šipki umjesto alata za bušenje učvrsti standardni penetracijski nož promjera 50 milimetara. Bilježi se broj udaraca čekića vidljivog na slici 11 potreban za prodiranje cijevi u tlo u intervalima od 15 centimetara do ukupne dubine 45 centimetara. Čekić je težak 63.5 kilograma, a na glavu pada s visine od 76 centimetara. Bitno je naglasiti da se broj udaraca potreban za prvi interval ne uzima u obzir [17].



Slika 11.: Standardni penetracijski test (Izvor: [20])

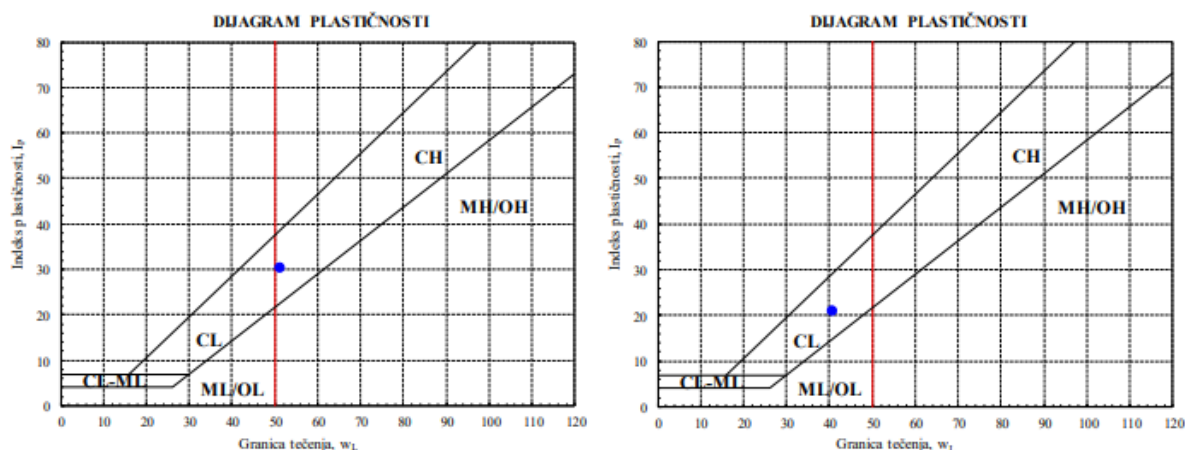
#### 4.1.3. Laboratorijska ispitivanja

Na referentnim uzorcima tla s lokacije izveden je niz laboratorijskih ispitivanja kako bi se dobio uvid u karakteristike tla. Kombinacijom vaganja i sušenja u pećnici dobivene su vrijednosti vlažnosti uzorka na dubini 4 metra i na dubini 20 metara. Vlažnost na većoj dubini bila je 34.4 %, osjetno veća od vlažnosti na 4 metra dubine, koja iznosi 26 % [16].

Kako bi se dobili podaci o granulometrijskom sastavu tla, napravljen je mokri postupak sijanja na neporemećenom uzorku tla koji se na terenu nalazio na dubini 4 metra. Sličan postupak korišten je i za tlo na dubini 20 metara od površine terena, no u ovom slučaju radilo se o poremećenom uzorku [16].

Na odabranim dubinama izvađeni su uzorci tla na kojima su se određivale granice konzistencije. Uzorci su u nekim slučajevima bili poremećeni, a u drugima neporemećeni, ovisno o dubini s koje je uzorak tla izvučen. Koristeći podatke o granicama tečenja i indeksa plastičnosti, uzorci tla smješteni su u područje niskoplastičnih glina na manjim dubinama te nisko do visokoplastičnih glina pri dnu bušotine [16].





Slike 12 a. i 12 b.: CL/CH na dubini 20 m (lijevo) i CL na dubini 4 m (desno) (Izvor: [16])

Edometarskim pokusima određene su vrijednosti modula stišljivosti za tlo. Iz modula stišljivosti lako se odredi edometarski modul. Dostupni su i podaci iz provedenih pokusa izravnog posmika, kojima je na temelju normalnih i posmičnih naprezanja procijenjena kohezija i kut trenja materijala. Obavljen je i pokus padajućeg stošca za potrebe određivanja granica tečenja materijala. Za daljnji proračun bitno je odrediti vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće, što je učinjeno pomoću poznatih podataka indeksa plastičnosti i udaraca prilikom SPT ispitivanja [16].

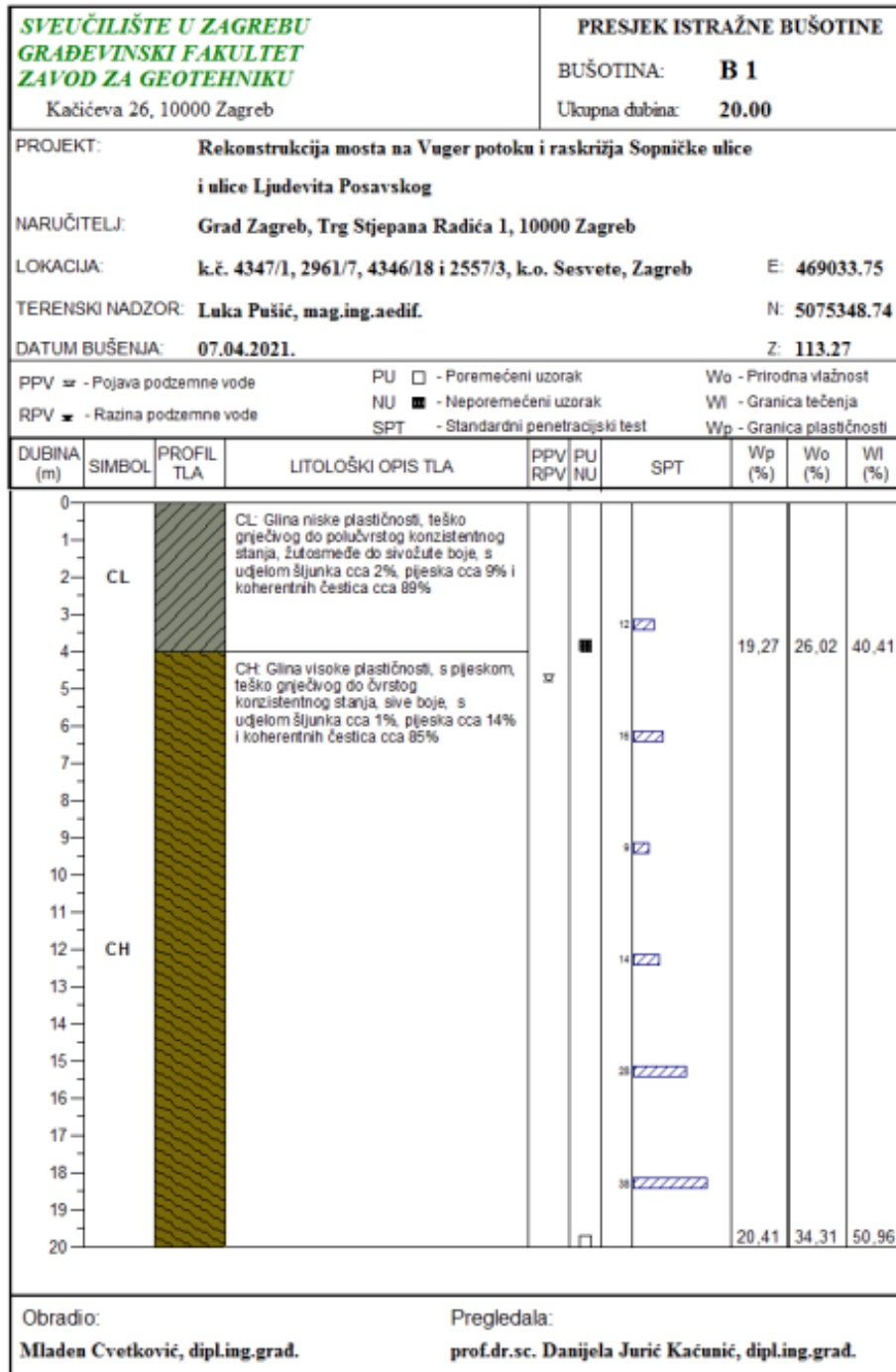
#### 4.2. Odabir geotehničkog profila tla

Rezultatima istražnog bušenja moguće je pretpostaviti geotehnički profil tla. Obje bušotine pokazuju sloj niskoplastične gline (CL) u prvih 4 do 5 metara. Iduća 3 do 4 metra pretpostavlja se sloj nisko do visokoplastične gline (CL/CH) sa pozamašnim udjelom pijeska od 46 %. Ostatak bušotine smatra se nisko do visokoplastičnom glinom (CL/CH). Podzemna voda u jednoj bušotini je na razini 4.8 metara, a u drugoj na 6.0 metara. Tablica 1 prikazuje rezultate dobivene istraživanjima [16].

Tablica 1.: Parametri materijala po bušotinama

Bušotina	Dubina	Materijal	Opis materijala	Broj udaraca SPT-a	c [kPa]	$\phi$	M <sub>k</sub> [MPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	I <sub>p</sub> [%]	I <sub>c</sub>	RPV [m]
B1	0.0 - 4.0 m	CL	Teško gnječivo do polučvrsto stanje, 2 % šljunka, 9 % pijeska	12	7.10	25.40	4.70	20	21.13	0.64 - 0.84	4.8
	4.0 - 20.0 m	CH	Teško gnječivo do čvrsto stanje, 1 % šljunka, 14 % pijeska	9 - 39	-	-	-	20	21.13	0.54	
B2	0.0 - 5.0 m	CL	Teško gnječivo do čvrsto stanje, 2 % šljunka, 22 % pijeska	8	6.90	28.50	3.10	20	18.04 - 21.90	0.64 - 0.84	6.0
	5.0 - 8.0 m	CL	Teško gnječivo do čvrsto stanje, 46 % pijeska	-	-	-	-	19	14.41	0.60 (0.11 za 7.7-8.0 m)	
	8.0 - 20.0 m	CL	Teško gnječivo do čvrsto stanje, 28 % pijeska	11 - 31	-	-	-	20	23.86	0.58	

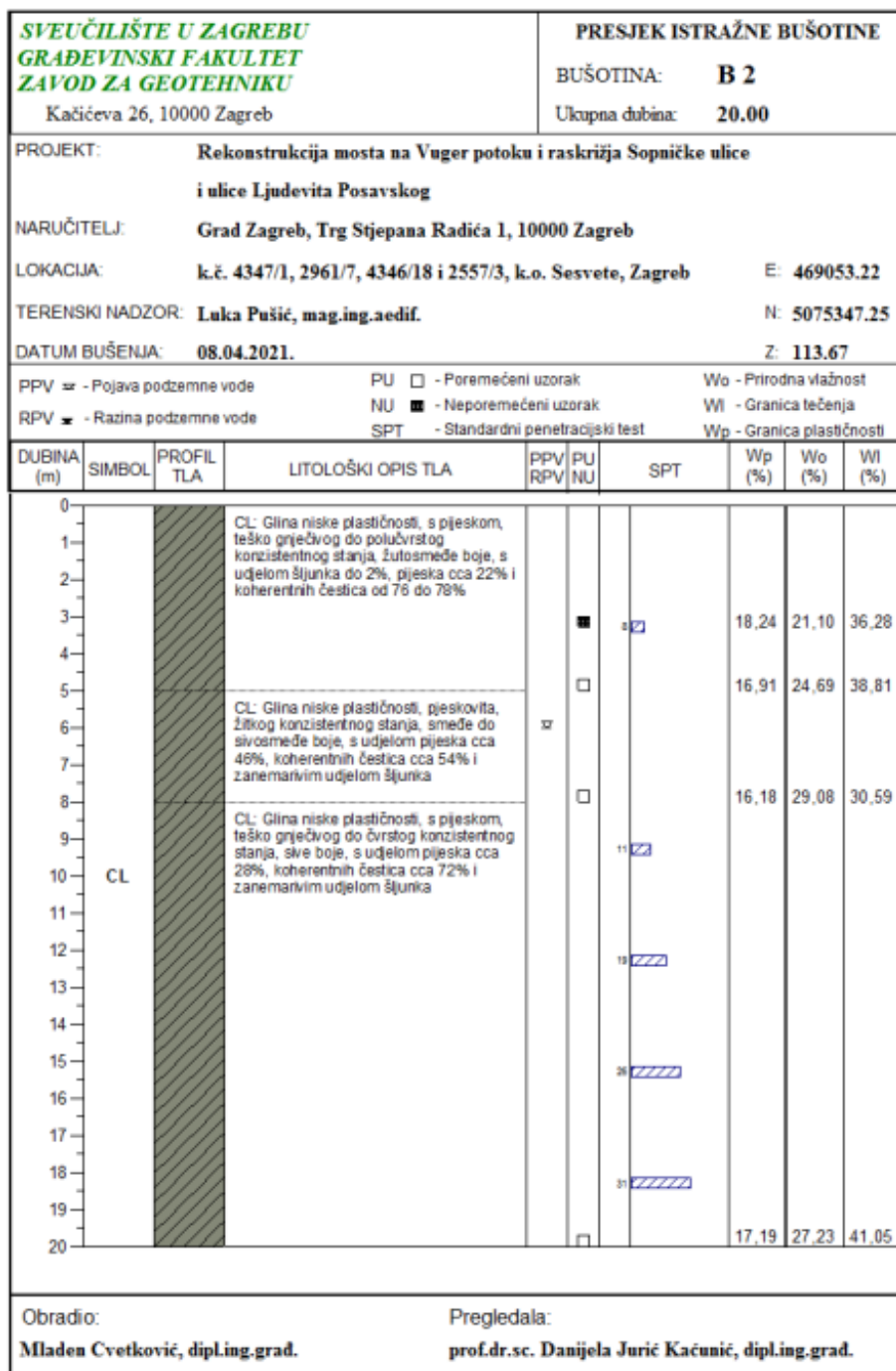
Niže su prikazani cjeloviti presjeci i fotografije obje bušotine koje pružaju slikovit uvid u stanje na terenu [16, 17].



Slika 13.: Prikaz istražne bušotine B1 (Izvor: [17])



Slika 14.: Fotografija istražne bušotine B1 (Izvor: [16])



Slika 15.: Prikaz istražne bušotine B2 (Izvor: [17])





Slika 16.: Fotografija istražne bušotine B2 (Izvor: [17])

Najrelevantniji parametar za proračune sa sitnozrnim koherentnim tlima je nedrenirana posmična čvrstoća ( $c_u$ ). Za određivanje ovog parametra korišteni su podaci iz provedenih SPT istraživanja u kombinaciji sa informacijama o plastičnosti pojedinih slojeva tla [21].

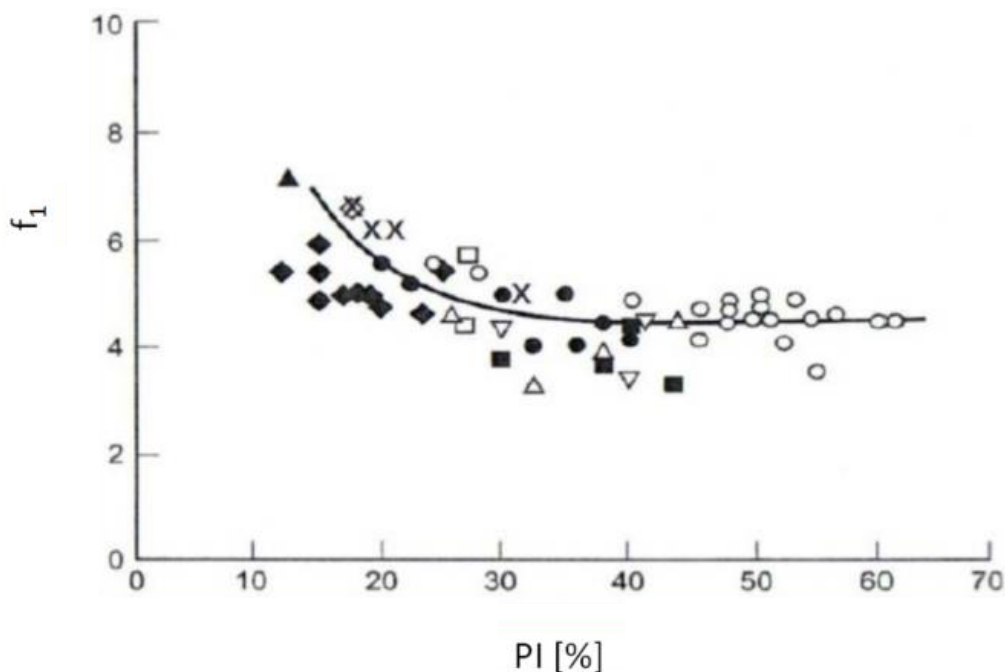
Korištene su Stroudove korelacije te su se korištenjem koeficijenta  $f_1$ , koji ovisi o indeksu plastičnosti materijala odredile veličine nedrenirane posmične čvrstoće tla [21].

Kombinacijom poznatih udaraca potrebnih za probijanje do određene dubine prilikom SPT ispitivanja i pretpostavljenih efektivnih vertikalnih napreznja izazvanih težinom tla iznad te dubine moguće je dobiti parametar  $(N_1)_{60}$ . Izraz za određivanje spomenutog parametra glasi [21]:

$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma'_v}}$$

Parametar  $(N_1)_{60}$  u pravilu se povećava s dubinom, no u obzir je bitno uzeti faktore kao što su razina podzemne vode u tlu i zapreminska težina pojedinih slojeva.

Drugi bitan koeficijent prilikom računanja nedrenirane posmične čvrstoće je  $f_1$ , bezdimenzionalni parametar koji u obzir uzima podatke o plastičnosti materijala, koji su izraženi preko indeksa plastičnosti  $I_p$ , a dobivene laboratorijskim pokusima za određivanje granica konzistencije materijala. Vrijednosti koeficijenta  $f_1$  određene su preko grafa vidljivog na slici 17 [21].



Slika 17.: Korelacija parametra  $f_1$  sa indeksom plastičnosti  $I_p$

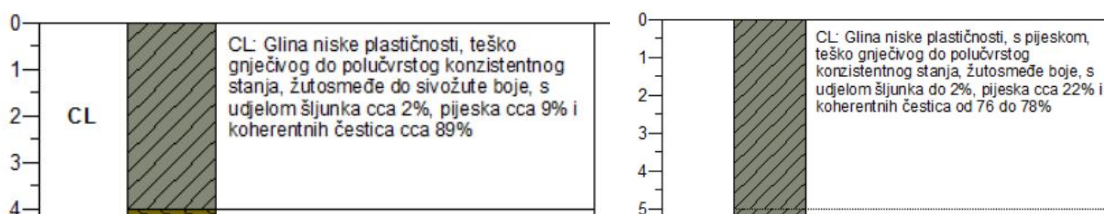
Konačnu vrijednost procijenjene nedrenirane posmične čvrstoće materijala moguće je dobiti množenjem dvaju ranije navedenih parametara. Tako izraz za  $c_u$  prema Stroudu [21] glasi:

$$c_u [kPa] = f_1 \cdot (N_1)_{60}$$

Geotehnički profil tla ispod mosta u Sopničkoj ulici u Sesvetama podijeljen je na tri sloja s različitim nedreniranim čvrstoćama. Broj udaraca (N) prilikom standardnog penetracijskog testa postupno se povećava prvih 5 metara, nakon čega dolazi do „propadanja“ standardnog penetracijskog noža zahvaljujući zalihama pijeska koje se nalaze u sljedećih nekoliko metara. Ipak, indeks plastičnosti materijala u tom dijelu primjetno je niži nego pri vrhu bušotina, što rezultira većom vrijednošću koeficijenta  $f_1$ , a samim time i nešto većom nedreniranom čvrstoćom. Drugi sloj nisko do visokoplastične gline pokazuje ponovni porast u plastičnosti te povećanje u broju udaraca SPT-a i vertikalnih naprezanja od tla iznad. Tako se faktor  $(N_1)_{60}$  povećava, a prateći izraz za posmičnu čvrstoću lako je zaključiti da dolazi i do njezinog povećanja. Detaljan raspis odabira parametara prikazan je u nastavku [16, 21].

#### 4.2.1. Nedrenirana posmična čvrstoća prvog sloja

Korištenjem podataka dobivenih SPT ispitivanjima i laboratorijskim određivanjem granica konzistencija prvi sloj je definiran do pet metara ispod površine. Broj udaraca SPT-a u prvoj bušotini, na dubini do 4 metra iznosio je 12, dok je u drugoj bušotini zabilježeno 8 udaraca na dubini od 5 metara. Riječ je o teško gnječivoj niskoplastičnoj glini [16, 17].



Slike 18 a. i 18 b.: Presjek istražne bušotine B1 (lijevo) i B2 (desno) (Izvor: [17])

Za reprezentativan broj udaraca SPT-a odabrana je vrijednost  $N = 10$ , a efektivna vertikalna naprezanja u prvom sloju iznose 90 kPa. Indeks plastičnosti približno je isti u obe bušotine te iznosi  $I_p = 21 \%$  [17].



Pomoću dijagrama sa slike 17 za vrijednost indeksa plastičnosti od 21 % odabran je koeficijent  $f_1 = 5.5$ . Vrijednost drugog relevantnog parametra  $(N_1)_{60}$  određuje se pomoću izraza:

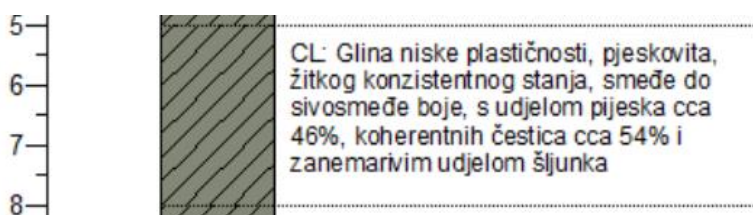
$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma'_v}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{96}{90}} = 10$$

Konačno, korištenjem sljedećeg izraza dobivena je vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće:

$$c_U [kPa] = f_1 \cdot (N_1)_{60} = 5.5 \cdot 10 = 55 \text{ kPa}$$

#### 4.2.2. Nedrenirana posmična čvrstoća drugog sloja

Za odabir drugog sloja poglavito su korišteni podaci iz bušotine B2 koja pokazuje pozamašan udio pijeska u glini. Sloj je definiran kao CL/CH, odnosno nisko do visokoplastična glina. Broj udaraca SPT-a kreće se u vrijednostima između 8 i 11, dok je indeks plastičnosti osjetno niži nego u prvom sloju, a iznosi  $I_p = 14.41\%$ . Efektivna vertikalna naprezanja pri vrhu sloja iznose 100 kPa nakon čega linearno rastu iduća tri metra [16, 17].



Slika 19.: Presjek istražne bušotine B2 (Izvor: [17])

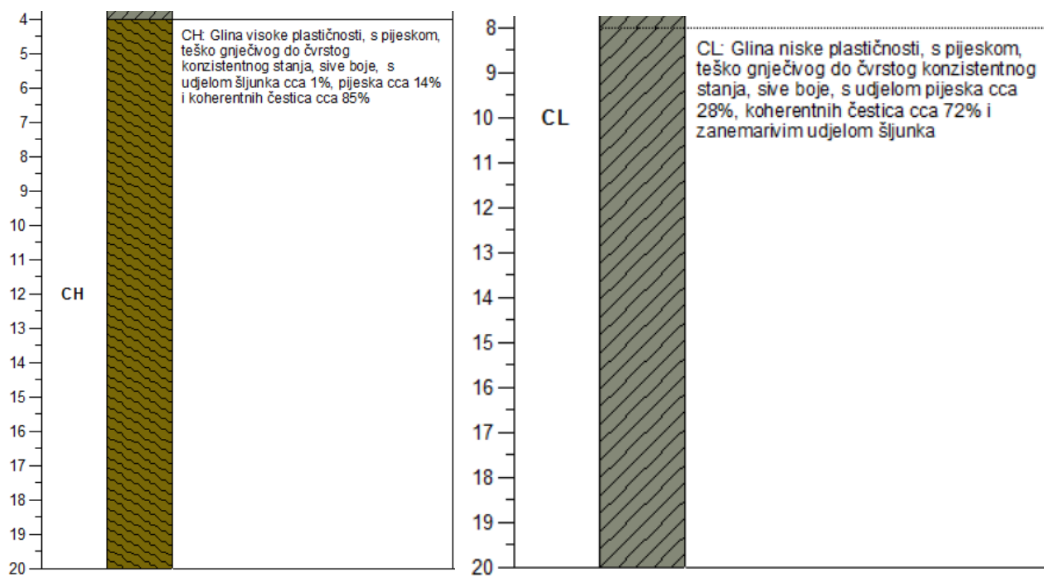
Za reprezentativan broj udaraca SPT-a odabrana je vrijednost  $N = 9$ , a efektivna vertikalna naprezanja iznose 119 kPa. Indeks plastičnosti iznosi  $I_p = 14.41\%$ , što će rezultirati većom vrijednošću koeficijenta  $f_1$ , koja je u ovom slučaju 7 [17].

$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma'_V}} = 9 \cdot \sqrt{\frac{96}{119}} = 9$$

$$c_U [kPa] = f_1 \cdot (N_1)_{60} = 7 \cdot 9 = 63 kPa$$

#### 4.2.3. Nedrenirana posmična čvrstoća trećeg sloja

Za odabir trećeg, najdebljeg sloja korišteni su podaci iz obe bušotine. Bušotina B1 dala je isti materijal na dubinama od 4. do 20. metra, dok je u bušotini B2 prepoznata nisko do visokoplastična glina na dubinama većim od 8 metara. Za potrebe geotehničkog profila tla pretpostavljen je jedan materijal na dubini većoj od 8 metara, pri čemu su uzimane srednje vrijednosti iz obe bušotine [16, 17].



Slike 20 a. i 20 b.: Presjek istražne bušotine B1 (lijevo) i B2 (desno) (Izvor: [17])

U bušotini B1 broj udaraca SPT-a kreće se između 9 i 39 na dubinama između 4 i 20 metara. Bušotina B2 daje vrijednosti između 11 i 31 za dubine između 8. i 20. metra. Indeks plastičnosti nešto je veći u bušotini B2 [17].

Kao reprezentativan broj udaraca SPT-a odabrana je vrijednost  $N = 22$ , a prosječna vrijednost indeksa plastičnosti zaokružena je na  $I_p = 22\%$ . Efektivna vertikalna naprezanja u velikom su rasponu, s obzirom na debljinu sloja od 12 metara, a kao prosječna vrijednost

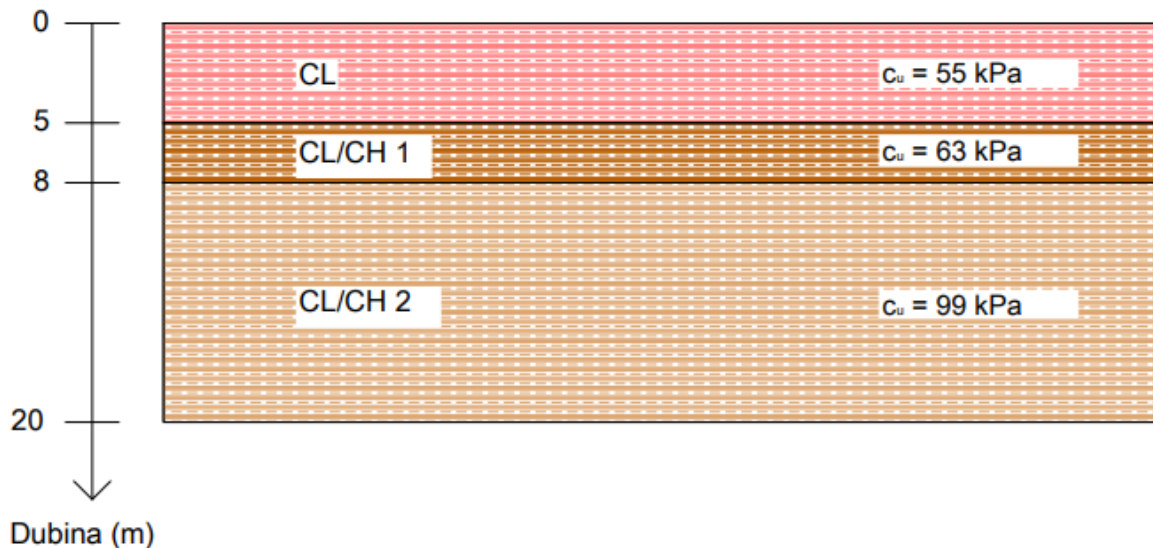
odabrano je  $\sigma'_v = 180$  kPa. Koeficijent  $f_1$ , s obzirom na sličnu plastičnost kao u prvom sloju, opet iznosi  $f_1 = 5.5$  [17].

$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma'_v}} = 22 \cdot \sqrt{\frac{96}{180}} = 18$$

$$c_u [kPa] = f_1 \cdot (N_1)_{60} = 5.5 \cdot 18 = 99 \text{ kPa}$$

#### 4.2.4. Geotehnički profil tla

S obzirom da su u drugoj bušotini granulometrijska istraživanja dala informaciju da se između petog i osmog metra nalazi glina sa 46 % pijeska, konzervativno je odlučeno da se velik udio pijeska nalazi na sličnoj dubini i u prvoj bušotini, što opravdava manji broj udaraca prilikom izvođenja standardnog penetracijskog testa. Slika 21 prikazuje procjenu geotehničkog profila tla na temelju geotehničkog elaborata i projekta temeljenja konstrukcije [16, 17].



Slika 21.: Geotehnički profil tla

## 5. PRORAČUN PILOTA

Proračun nosivosti pilota napravljen je ručno i putem programa RS Pile. U istom programu napravljeni su i proračuni slijeganja, poprečnih pomaka i reznih sila na temelju kojih je provedeno dimenzioniranje. Korišteni podaci derivirani su iz glavnih podloga dostupnih za ovaj diplomski rad, koje uključuju geotehnički elaborat, projekt temeljenja i projekt konstrukcije mosta [16, 17, 22].

### 5.1. Temeljenje mosta

Armirano betonski most na križanju Sopničke ulice i ulice Ljudevita Posavskog u Sesvetama nalazi se na dva duboko temeljena upornjaka. Temeljenje je napravljeno na devet pilota podijeljenih u dvije grupe. Niveleta na objektu u potpunosti je u vertikalnom padu od 0.75 %, a ukupna duljina objekta iznosi 14.9 metara [17].

Materijali za izvedbu pilota su beton klase C30/37 i armatura B500B, a piloti su bušeni armiranobetonski. Svih devet pilota istog su promjera i duljine, promjer im je 1200 milimetara a duljina 20 metara [17].



Slika 22.: Postojeći most preko potoka Vuger (Izvor: [17])

Prva grupa broji šest pilota te se nalazi ispod prvog upornjaka, na istočnoj strani mosta. Piloti se nalaze na međusobnom osnom razmaku od 4.1 metra, a povezuje ih naglavna greda dimenzija 28x1.5 m. Druga grupa pilota duplo je manja po broju pilota, pa samim time i po duljini naglavne grede. Između tri pilota koji čine grupu pilota drugog upornjaka također je osni razmak od 4.1 metra, a dimenzije naglavne grede su 13.9x1.5 m [17].

## 5.2. Nosivost jednog pilota

### 5.2.1. Otpor na bazi pilota

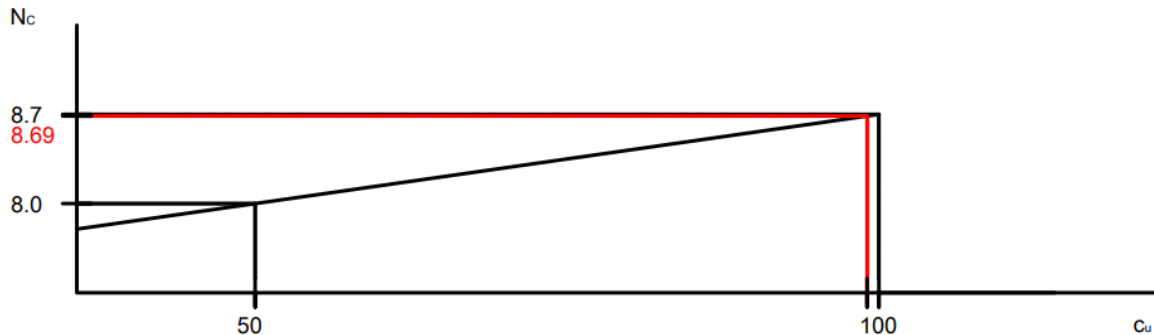
Reese i dr. [23] za proračun uzdužne nosivosti na bazi pilota definirali su odnos nedrenirane posmične čvrstoće i faktora nosivosti, kao što je vidljivo na slici 23 [24]. Tablica daje jasne empirijske izraze za jediničnu otpornost na stopi i na plaštu pojedinačnog pilota.

bušeni (Rees i dr. 2006)	$q_b = \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{1}{6} \frac{d}{b} \right) c_u N_c$ za $\frac{d}{b} < 3$ $q_b = c_u N_c$ za $\frac{d}{b} \geq 3$	$q_b = 60 N_{60} \frac{d}{10b}$ za $\frac{d}{b} \leq 10$ $q_b = 60 N_{60}$ za $\frac{d}{b} > 10$ $\max q_b = 3.0 \text{ MPa}$									
	<table> <tbody> <tr> <td><math>c_u</math> (MPa)</td> <td><math>N_c</math></td> </tr> <tr> <td>0.025</td> <td>6.5</td> </tr> <tr> <td>0.050</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>0.100</td> <td>8.7</td> </tr> <tr> <td>0.200</td> <td>9.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>(za <math>c_u &gt; 0.2 \text{ MPa}</math> tretiraj tlo kao stijenu)</p> <p><math>q_s = \alpha c_u</math>  <math>\alpha = 0.55</math> za <math>\frac{c_u}{p_a} \leq 1.5</math>  <math>\alpha = 0.55 - 0.1 \left( \frac{c_u}{p_a} - 1.5 \right)</math> za <math>1.5 \leq \frac{c_u}{p_a} \leq 2.5</math>  za <math>\frac{c_u}{p_a} &gt; 2.5</math> tretiraj tlo kao stijenu;  <math>p_a = 0.1 \text{ MPa}</math>  zanemari gornjih 1.5 m ispod površine terena i donjih <math>b</math> m u sitnozrnom tlu</p>	$c_u$ (MPa)	$N_c$	0.025	6.5	0.050	8.0	0.100	8.7	0.200	9.0
$c_u$ (MPa)	$N_c$										
0.025	6.5										
0.050	8.0										
0.100	8.7										
0.200	9.0										

Slika 23.: Empirijski izrazi za otpornost na stopi i plaštu pojedinog pilota (Izvor: [24])

Uzimajući u obzir činjenicu da se baza pilota u ovom slučaju nalazi u trećem pretpostavljenom sloju tla, ranije definiranom kao CL/CH 2, očitavat će se faktor nosivosti  $N_c$  samo za nedreniranu čvrstoću tog sloja.

S obzirom na poznatu vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće za treći sloj tla, interpolacijom je pronađena vrijednost  $N_C$  za nedreniranu čvrstoću trećeg sloja, a iznosi  $N_C = 8.69$ . Interpolacija je prikazana na slici 24.



Slika 24.: Interpolacija vrijednosti faktora nosivosti

Određivanjem faktora nosivosti dobivene su sve potrebne vrijednosti kako bi se prema Reeseu i dr. [23] odredila jedinična otpornost na stopi pilota. Koristi se izraz koji množi vrijednost nedrenirane posmične čvrstoće i faktora nosivosti.

$$q_b = c_u \cdot N_C = 99 \cdot 8.69 = 860.31 \text{ kPa}$$

Vrijednost  $q_b$  predstavlja jediničnu otpornost na stopi pilota. Množenjem spomenute vrijednosti sa površinom poprečnog presjeka pilota dobiva se vrijednost ukupne nosivosti na bazi pilota. Pritom se u obzir uzima promjer pilota koji iznosi 1200 milimetara [16, 24].

$$A_b = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{1.2^2 \pi}{4} = 1.13 \text{ m}^2$$

$$R_b = q_b \cdot A_b = 860.31 \cdot 1.13 = 972.99 \text{ kN}$$

### 5.2.2. Otpor na plaštu pilota

Vrijednost  $R_b$  predstavlja ukupnu otpornost na stopi pilota. Potrebno je izračunati jediničnu i ukupnu otpornost na plaštu pilota kako bi se zbrojem tih dvaju vrijednosti dobila ukupna nosivost pilota  $R$ . S obzirom na činjenicu da pilot prolazi kroz tri sloja tla, računat će se tri

različita otpora na plaštu sa tri različite vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće. Pritom je korišten takozvani "alfa" postupak u kojem se bezdimenzijski faktor  $\alpha$  množi sa vrijednostima nedreniranih posmičnih čvrstoća [23, 24].

$$\begin{aligned}
 q_s &= \alpha c_u \\
 \alpha &= 0,55 \text{ za } \frac{c_u}{p_a} \leq 1,5 \\
 \alpha &= 0,55 - 0,1 \left( \frac{c_u}{p_a} - 1,5 \right) \\
 &\text{za } 1,5 \leq \frac{c_u}{p_a} \leq 2,5 \\
 &\text{za } \frac{c_u}{p_a} > 2,5 \text{ tretiraj} \\
 &\text{tlo kao stijenu;} \\
 p_a &= 0,1 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Slika 25.: „Alfa“ postupak određivanja nosivosti na plaštu (Izvor: [23])

$$\frac{c_u}{p_{atm}} = \frac{55}{100} = 0,55 \rightarrow \alpha = 0,55 \rightarrow \text{CL}$$

$$\frac{c_u}{p_{atm}} = \frac{63}{100} = 0,63 \rightarrow \alpha = 0,55 \rightarrow \text{CL/CH 1}$$

$$\frac{c_u}{p_{atm}} = \frac{99}{100} = 0,99 \rightarrow \alpha = 0,55 \rightarrow \text{CL/CH 2}$$

Vrijednosti omjera nedrenirane čvrstoće i atmosferskog tlaka za sva tri sloja manje su od 1,5, što daje istu vrijednost koeficijenta  $\alpha = 0,55$ . Množenjem koeficijenta  $\alpha$  s vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobiva se jedinična otpornost na plaštu za svaki sloj [23].

$$q_{s1} = \alpha \cdot c_{u1} = 0,55 \cdot 55 = 30,25 \text{ kPa}$$

$$q_{s2} = \alpha \cdot c_{u2} = 0,55 \cdot 63 = 34,65 \text{ kPa}$$

$$q_{s3} = \alpha \cdot c_{u3} = 0,55 \cdot 99 = 54,45 \text{ kPa}$$

Slično kao kod računanja otpora na bazi pilota, iz jedinične otpornosti moguće je dobiti ukupnu otpornost na plaštu. Potrebno je izračunati oplošje pilota  $C$ , koje pomnoženo s jediničnom otpornošću na plaštu i debljinom pojedinog sloja daje ukupnu otpornost na plaštu za taj sloj. Kasnije je zbrajanjem vrijednosti ukupne otpornosti svakog sloja moguće dobiti ukupnu otpornost na plaštu za cijeli pilot [23, 24].

$$C = 2 \cdot R \cdot \pi = 3.77 \text{ m}$$

$$R_{S1} = q_{s1} \cdot C \cdot 5 = 30.25 \cdot 3.77 \cdot 5 = 570.21 \text{ kN}$$

$$R_{S2} = q_{s2} \cdot C \cdot 3 = 34.65 \cdot 3.77 \cdot 3 = 391.89 \text{ kN}$$

$$R_{S3} = q_{s3} \cdot C \cdot 12 = 54.45 \cdot 3.77 \cdot 12 = 2463.32 \text{ kN}$$

$$R_S = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} = 570.21 + 391.89 + 2463.32 = 3425.34 \text{ kN}$$

### 5.2.3. Ukupni otpor pilota

Zbrajanjem ukupne otpornosti na bazi i plaštu pilota moguće je dobiti ukupnu otpornost pilota. Dobivena vrijednost predstavlja karakterističnu vrijednost nosivosti pilota te ju je potrebno podijeliti s odgovarajućim parcijalnim faktorom kako bi se dobila proračunska vrijednost. Kao što tablica 2 prikazuje, u ovom slučaju korišten je PP2-B proračunski pristup kojim se karakteristične vrijednosti dijele s parcijalnim faktorom 1.8 za sitnozrna tla [23, 24].

**Tablica 2:** Parcijalni faktori prema Eurocode 7 (Izvor: [25])

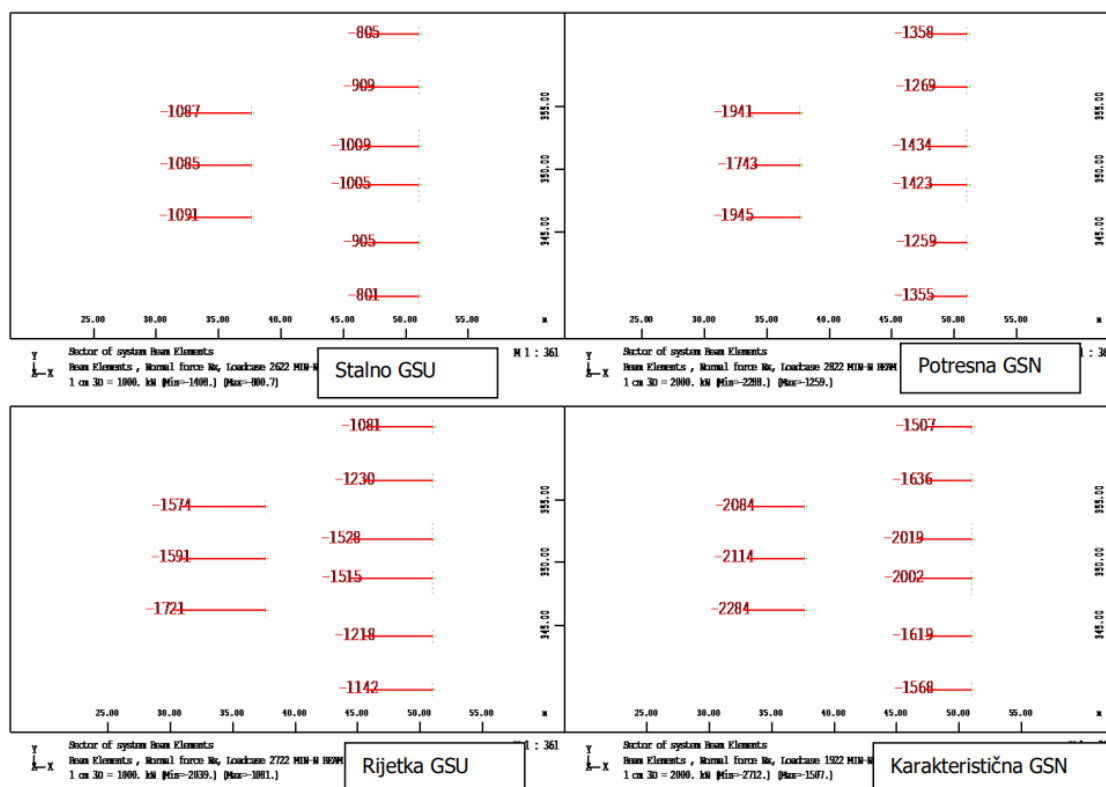
Otpornost		Simbol	PP2	
Stopa, plašt, ukupno	Krupnozrno	$\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t, \gamma_{s;t}$	A	1.2
	Sitnozrno		B	1.8



$$R_K = R_B + R_S = 972.99 + 3425.34 = 4398.33 \text{ kN}$$

$$R_D = \frac{R_K}{\gamma} = \frac{4398.33}{1.8} = 2443.52 \text{ kN}$$

$R_D$  predstavlja ukupnu proračunsku nosivost jednog pilota na lokaciji. Vrijednost  $R_D$  uspoređuje se sa najvećom silom na pojedinačnom pilotu. Projekt konstrukcije [22] daje podatke o najvećoj reznoj sili na svakom pilotu za potresnu i karakterističnu kombinaciju. Sile su prikazane na slici 26.



Slika 26.: Rezne sile za pojedinačne pilote ispod upornjaka za granično stanje uporabivosti i nosivosti

Najveća identificirana sila javlja se na rubnom pilotu ispod drugog upornjaka, a iznosi 2284 kN. Navedena vrijednost manja je od proračunske vrijednosti otpornosti pilota:

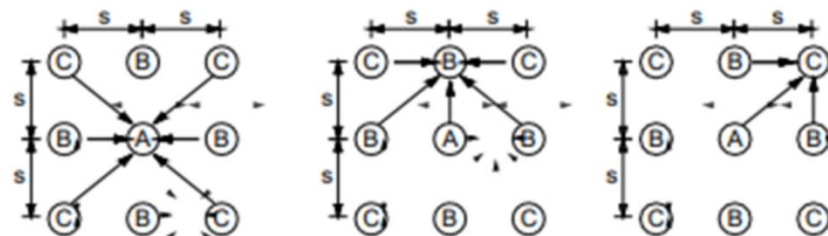
$$R_D = 2443 \text{ kN} > E_D = 2284 \text{ kN}$$

Budući da su piloti postavljeni u grupe, sljedeći korak proračuna odnosi se na nosivost grupe pilota.

### 5.3. Nosivost grupe pilota

Kao što je ranije navedeno, most u Sopničkoj ulici u Sesvetama temeljen je na devet pilota podijeljenih u dvije grupe [17]. Budući da su dvije grupe pilota na poprilično velikoj međusobnoj udaljenosti, zaključeno je kako neće utjecati jedna na drugu. Napravljen je proračun svake grupe pilota zasebno pomoću Feldovog postupka.

Feldovo pravilo poznato je kao najjednostavniji način za određivanje učinkovitosti grupe pilota. Feld je 1943. godine zaključio da je nosivost svakog pilota smanjena za jednu šesnaestinu zahvaljujući susjednom pilotu [26]. Iako Feldovo pravilo u obzir ne uzima razmak i duljinu pilota, rezultati su se u praksi pokazali zadovoljavajućima. Slika 27 grafički prikazuje primjer korištenja Feldovog pravila u slučaju grupe od devet pilota. Ideja je u izračunu faktora redukcije koji se zatim množi sa brojem pilota i ranije izračunatom proračunskom nosivošću jednog pilota, a krajnji rezultat je nosivost grupe pilota [27].



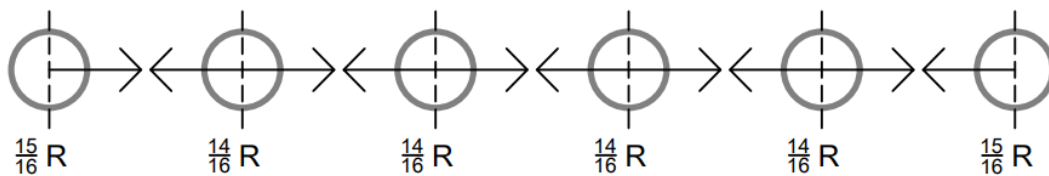
Vrsta pilota	Broj pilota $n_p$	Broj susjednih pilota $n_{ad}$	Faktor redukcije svakog pilota	Ukupna nosivost
A	1	8	$1 - \frac{n_{ad}}{16} = 1 - \frac{8}{16}$	$0.5Q_u$
B	4	5	$1 - \frac{n_{ad}}{16} = 1 - \frac{5}{16}$	$2.75Q_u$
C	4	3	$1 - \frac{n_{ad}}{16} = 1 - \frac{3}{16}$	$3.25Q_u$
$Q_{g(u)} = \sum 6.5Q_u$				

Slika 27.: Feldova metoda za procjenu grupne nosivosti pilota (Izvor: [26])

### 5.3.1. Nosivost prve grupe pilota

Upornjak U1 temelji se na šest pilota u jednom redu, na međusobnom razmaku od 4.1 m. Piloti su povezani naglavnom gredom 28x1.5 m [17].

Svih šest pilota nalaze se u jednome redu te je potrebno odrediti koliko svaki pilot ima susjednih pilota koji mu smanjuju nosivost. Slika 28 pokazuje međusobne utjecaje pilota u prvoj grupi.



Slika 28.: Grupa pilota ispod upornjaka U1

$$\eta = \frac{2 \cdot \frac{15}{16} + 4 \cdot \frac{14}{16}}{6 \cdot 1} = 0.896$$

$$R_{GRUPA 1} = 6 \cdot 1 \cdot 0.896 \cdot R_D = 5.376 R_D = 13136.36 \text{ kN}$$

$R_{GRUPA 1}$  predstavlja nosivost grupe pilota ispod upornjaka U1. Ta vrijednost uspoređuje se sa zbrojem pojedinačnih sila ispod upornjaka U1 sa slike 25. Karakteristična kombinacija daje veće vrijednosti od potresne te se uzima kao mjerodavna.

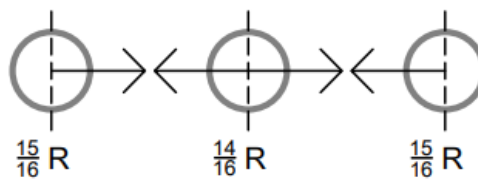
$$E_{D, GRUPA 1} = 1507 + 1636 + 2019 + 2002 + 1619 + 1568 = 10351 \text{ kN}$$

$$R_{D, GRUPA 1} = 13136.36 \text{ kN} > E_{D, GRUPA 1} = 10351 \text{ kN}$$

### 5.3.2. Nosivost druge grupe pilota

Upornjak U2 temelji se na tri pilota u jednom redu, na međusobnom razmaku od 4.1 m. Piloti su povezani naglavnom gredom 13.9x1.5 m [17].

Sva tri pilota nalaze se u jednom redu te im se lako može odrediti koeficijent redukcije po Feldovom pravilu [26]. Slika 29 prikazuje međusobne utjecaje pilota u drugoj grupi.



Slika 29.: Grupa pilota ispod upornjaka U2

$$\eta = \frac{2 \cdot \frac{15}{16} + 1 \cdot \frac{14}{16}}{3 \cdot 1} = 0.917$$

$$R_{GRUPA 2} = 3 \cdot 1 \cdot 0.917 \cdot R_D = 2.751R_D = 6722.12 \text{ kN}$$

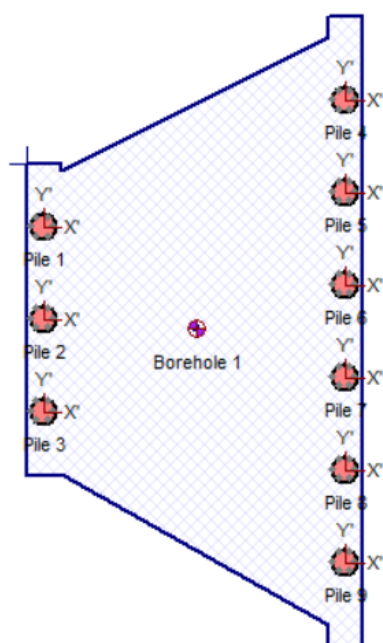
$R_{GRUPA 2}$  predstavlja nosivost grupe pilota ispod upornjaka U2. Ta vrijednost uspoređuje se sa zbrojem pojedinačnih sila ispod upornjaka U2 sa slike 26. I u ovom slučaju karakteristična kombinacija daje veće vrijednosti od potresne te se uzima kao mjerodavna.

$$E_{D, GRUPA 2} = 2084 + 2114 + 2284 = 6482 \text{ kN}$$

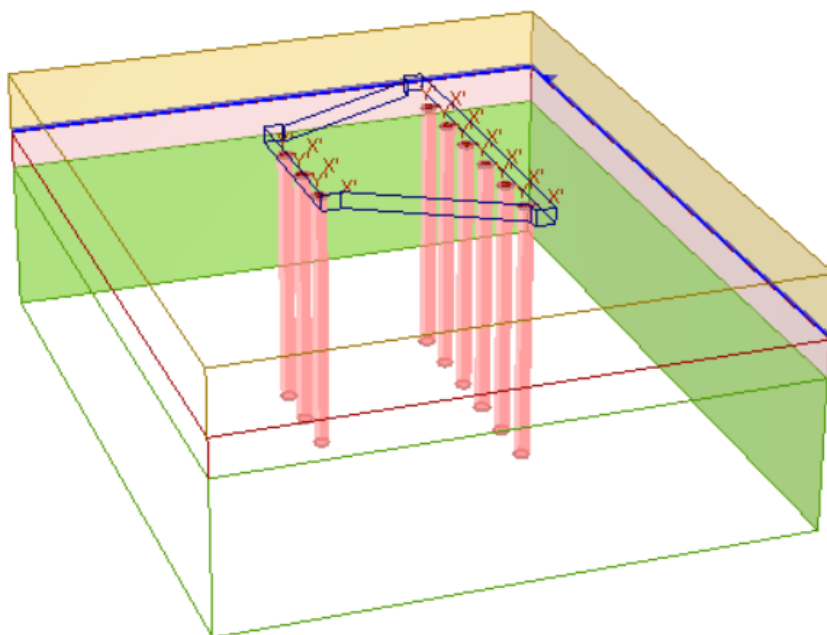
$$R_{D, GRUPA 2} = 6722 \text{ kN} > E_{D, GRUPA 2} = 6482 \text{ kN}$$

## 5.4. Proračun u programu RS Pile

Izvršena je analiza nosivosti pojedinačnog pilota čije su vrijednosti zatim uspoređene s rezultatima analitičkog proračuna. Također su odrađene provjere slijeganja, poprečnih pomaka, uzdužnih i poprečnih reznih sila i momenata te mobiliziranog trenja i sile na stopi pilota. Tlocrtni prikaz modela prikazan je na slici 30, a trodimenzionalni prikaz vidljiv je na slici 31. Tablica 3 prikazuje sile i momente koje su korištene kao opterećenja na model. Budući da se radi o spregnutom mostu, obje grupe pilota modeliraju se zajednički, a povezuje ih naglavna konstrukcija za koju su piloti kruto povezani.



Slika 30.: Tlocrtni prikaz modela



Slika 31.: Trodimenzionalni prikaz modela

Tablica 3: Ulazna opterećenja za model u RS Pileu

pilot	GSU rijetka			GSN karakteristična		
	N	T	M	N	T	M
<b>1</b>	1081	203	1154	1507	274	1558
<b>2</b>	1230	239	1341	1636	323	1811
<b>3</b>	1528	250	1365	2019	338	1843
<b>4</b>	1515	248	1354	2002	334	1828
<b>5</b>	1218	230	1267	1619	310	1711
<b>6</b>	1142	226	1203	1568	305	1624
<b>7</b>	1574	330	1655	2084	446	2234
<b>8</b>	1591	346	1655	2114	467	2234
<b>9</b>	1721	356	1655	2284	480	2234

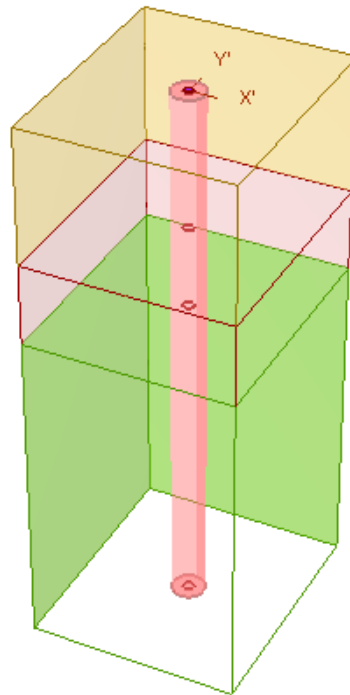
#### 5.4.1. Provjera nosivosti pilota

RS Pile pruža mogućnost provjere nosivosti pojedinačnog pilota. Niže su prikazani rezultati dobiveni analitičkim proračunom u poglavlju 5.2. Vrijednosti nisu faktorizirane te će se usporediti s vrijednostima dobivenim u računalnoj analizi nosivosti.

$R_b = 972.99 \text{ kN}$  → karakteristična vrijednost otpornosti na stopi pilota

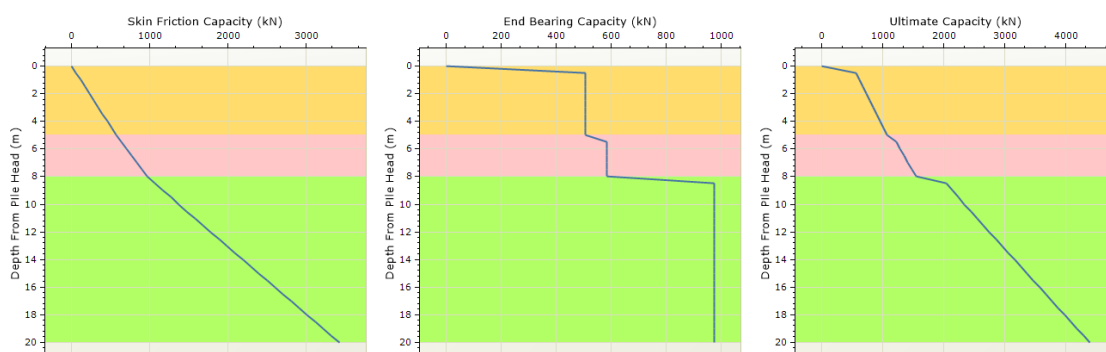
$R_s = 3425.34 \text{ kN}$  → karakteristična vrijednost otpornosti na plaštu pilota

$R_K = 4398.33 \text{ kN}$  → karakteristična vrijednost ukupne otpornosti pilota



Slika 32.: Model pilota za proračun nosivosti

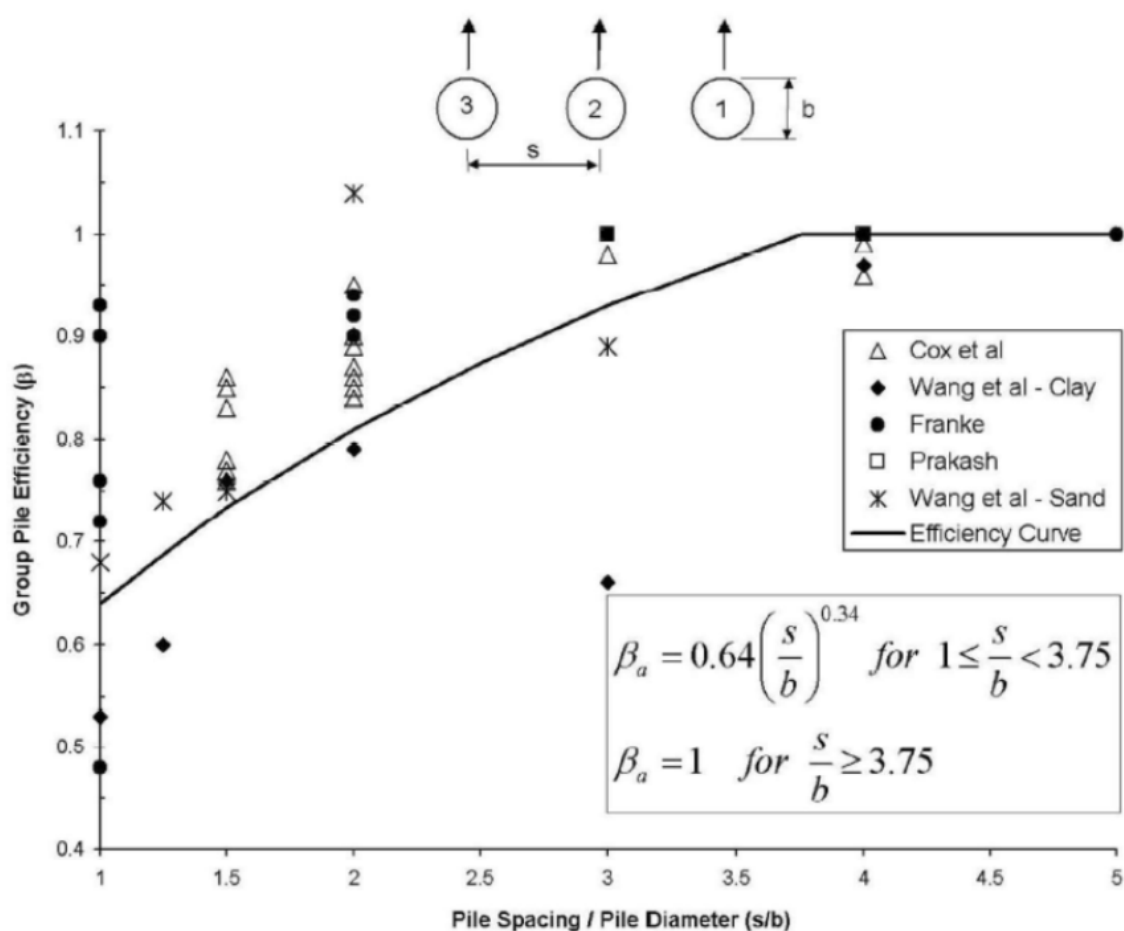
Kao ulazni podaci za analizu korišteni su parametri  $\alpha$ ,  $N_c$  i nedrenirana posmična čvrstoća svakog sloja. Kao što je vidljivo na slici 33, karakteristična nosivost pilota na plaštu iznosi 3430 kN a otpornost na bazi pilota je 973 kN. Rezultati su gotovo identični kao u analitičkom proračunu, tako da je i vrijednost ukupne nosivosti vrlo slična, a iznosi 4400 kN. Dijeljenjem s parcijalnim koeficijentom 1.8 dobiva se proračunska vrijednost nosivosti koja iznosi 2444.44 kN.



Slika 33.: Rezultati računalne provjere nosivosti jednog pilota

### 5.4.2. Granično stanje uporabivosti

Za analizu slijeganja primijenjena je GSU - rijetka kombinacija djelovanja jer daje nepovoljnija djelovanja na pojedini pilot. Model je opterećen uzdužnim i poprečnim silama te momentima iz projekta konstrukcije [22]. Pri izradi modela u RS Pileu bitno je uzeti u obzir učinak grupe pilota, što je moguće obaviti unosom poprečnih i uzdužnih koeficijenata. Poglavlja 5.3.1 i 5.3.2 prikazuju izračun uzdužnih koeficijenata pomoću Feldovog postupka [26] za potrebe računanja nosivosti grupa pilota, a graf pomoću kojeg je moguće odrediti poprečne koeficijente vidljiv je na slici 34.



Slika 34.: Graf za određivanje poprečnog koeficijenta učinkovitosti grupe

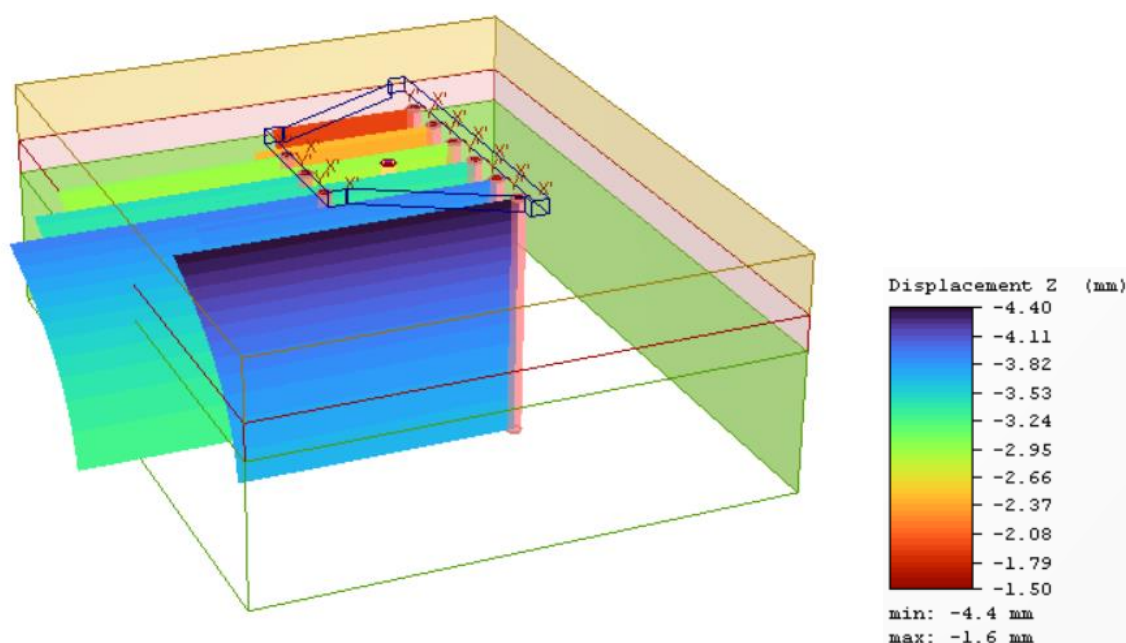
Uzdužni koeficijent za grupu 1 iznosi  $\eta = 0.896$ , a vrijednost koeficijenta za grupu 2 je  $\eta = 0.917$ . Poprečni koeficijent koji uzima u obzir udaljenost između pilota i promjer pilota u ovom slučaju iznosi  $\beta = 0.93$ . Tablica s koeficijentima prikazana je u nastavku, a software je sve vrijednosti zaokružio na drugu decimalu.



Tablica 4: Uzdužni i poprečni koeficijenti učinkovitosti grupe pilota

Pile	Lateral Coefficient	Axial Coefficient
1	0.93	0.92
2	0.93	0.92
3	0.93	0.92
4	0.93	0.90
5	0.93	0.90
6	0.93	0.90
7	0.93	0.90
8	0.93	0.90
9	0.93	0.90

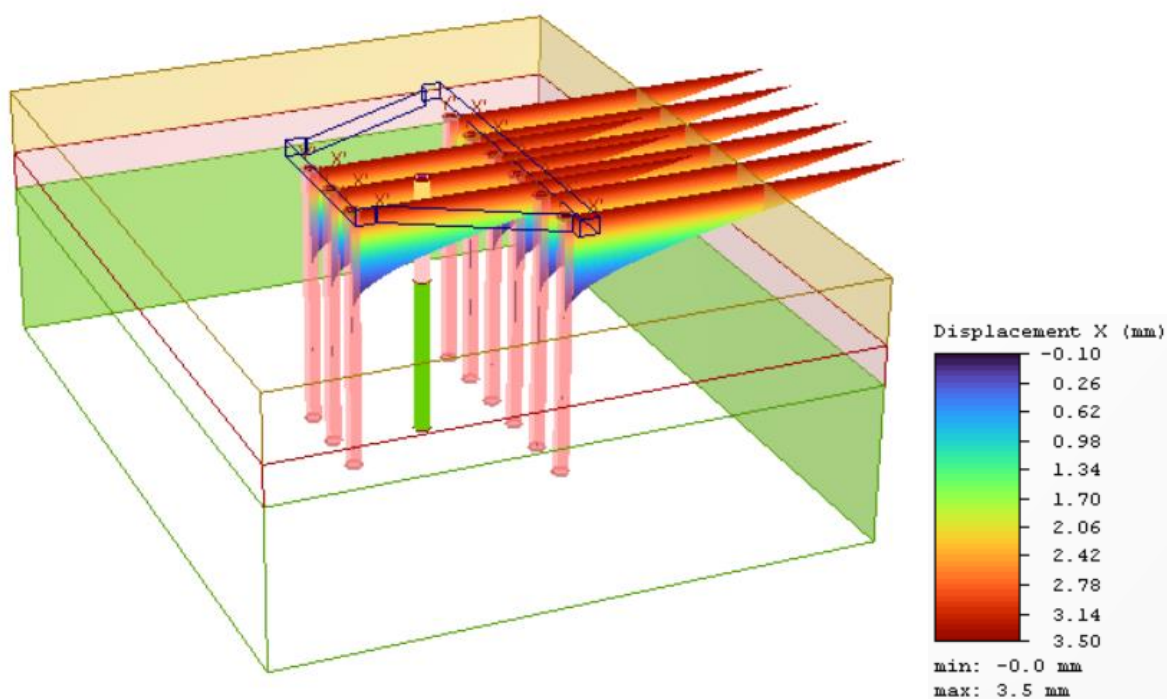
Unosom parametara tla, pilota, naglavne konstrukcije te podzemne vode moguće je pristupiti proračunu slijeganja pilota. Brojna mjerenja pokazala su da se otpornost po plaštu pilota aktivira već pri vrlo malim slijeganjima od 2 do 3 %, dok se puna otpornost na stopi pilota aktivira pri znatno većim slijeganjima od otprilike 10 %. Slijeganje pilota u grupi ovisi o nizu faktora, kao što je stišljivost tla kroz koje pilot prolazi, način prijenosa opterećenja, položaj naglavne ploče i raspodjela opterećenja na naglavnoj ploči [9].



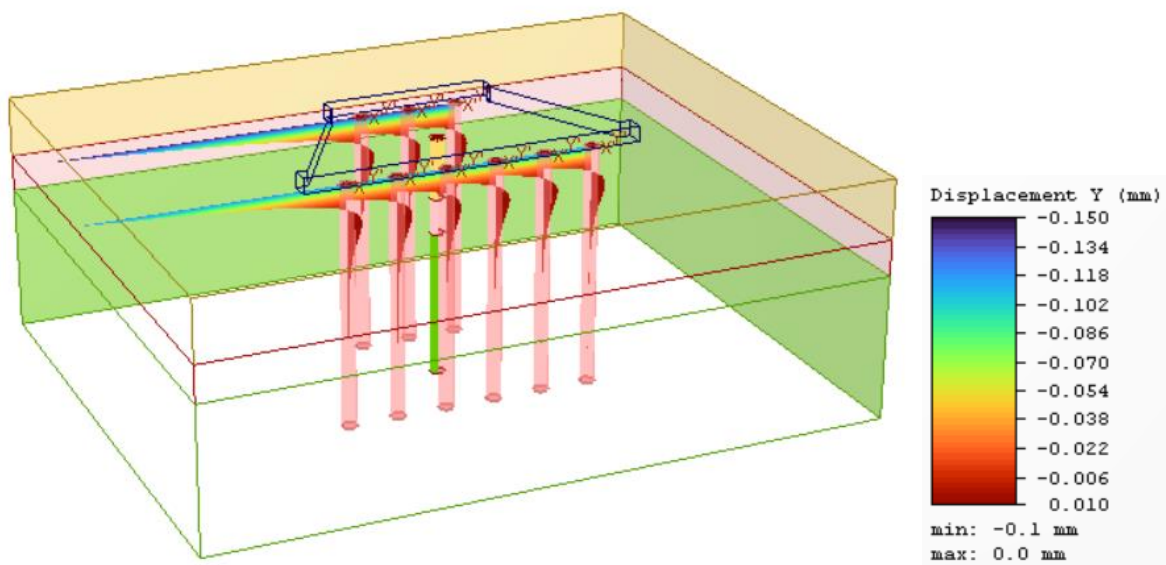
Slika 35.: Slijeganje pilota za GSU

Najveće slijeganje očitano je na rubnom pilotu prve grupe, a ono iznosi 4.4 milimetra. Druga grupa pilota također daje najveće slijeganje na rubnom pilotu, no u ovom slučaju ono je nešto manje te iznosi oko 4 milimetra.

Osim slijeganja, program omogućuje i uvid u poprečne pomake. Model je opterećen na isti način kao za izračun slijeganja. U nastavku su prikazani rezultati poprečnih pomaka u x i y smjeru. Najveći pomaci u x-smjeru iznose 3.5 milimetra te su prikazani na slici 36, dok su poprečni pomaci u y-smjeru zanemarivo malih vrijednosti te iznose 0.1 milimetar. Oni su vidljivi na slici 37.

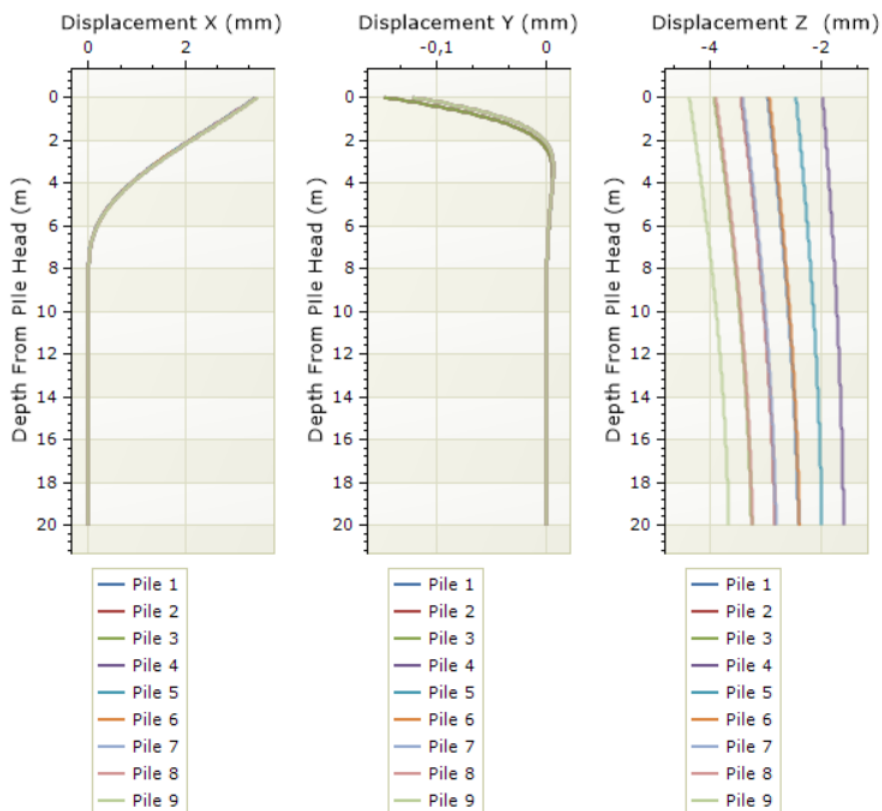


Slika 36.: Poprečni pomaci u x-smjeru za GSU



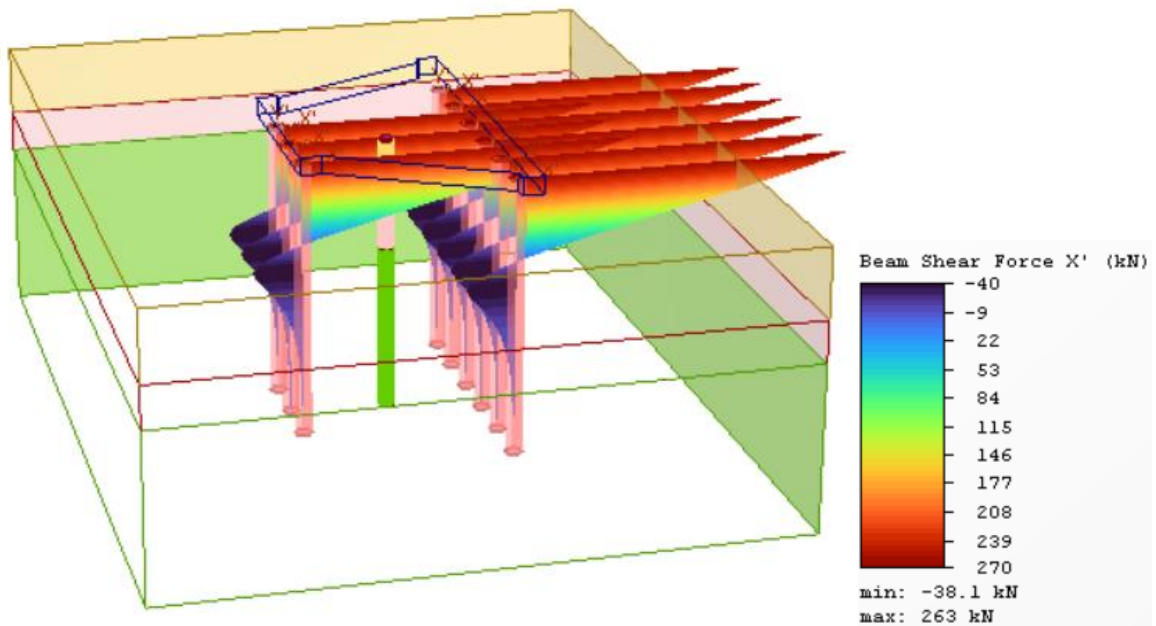
Slika 37.: Poprečni pomaci u y-smjeru za GSU

Na slici 38 grafički su prikazani pomaci za analizu graničnog stanja uporabivosti.

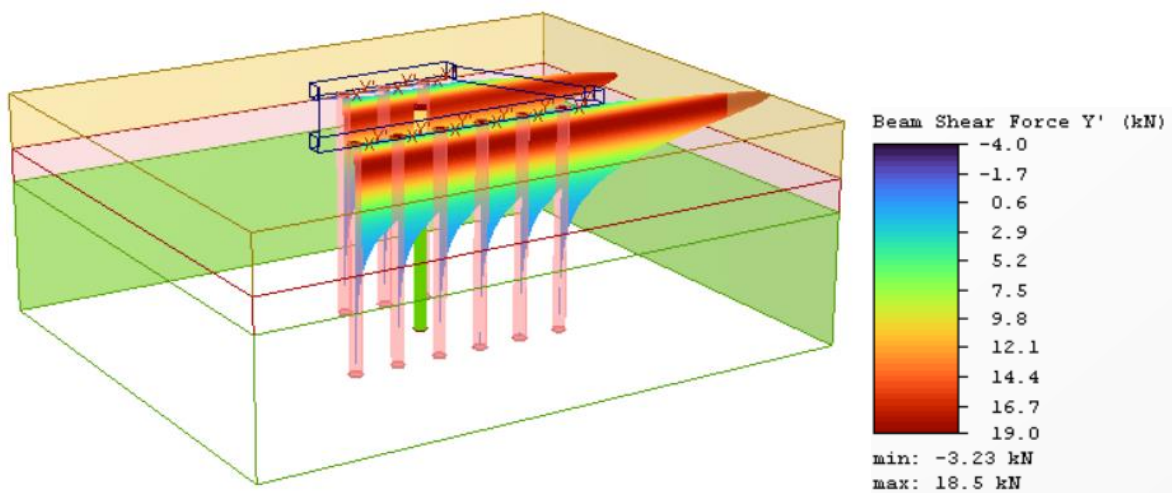


Slika 38.: Grafički prikaz pomaka za GSU

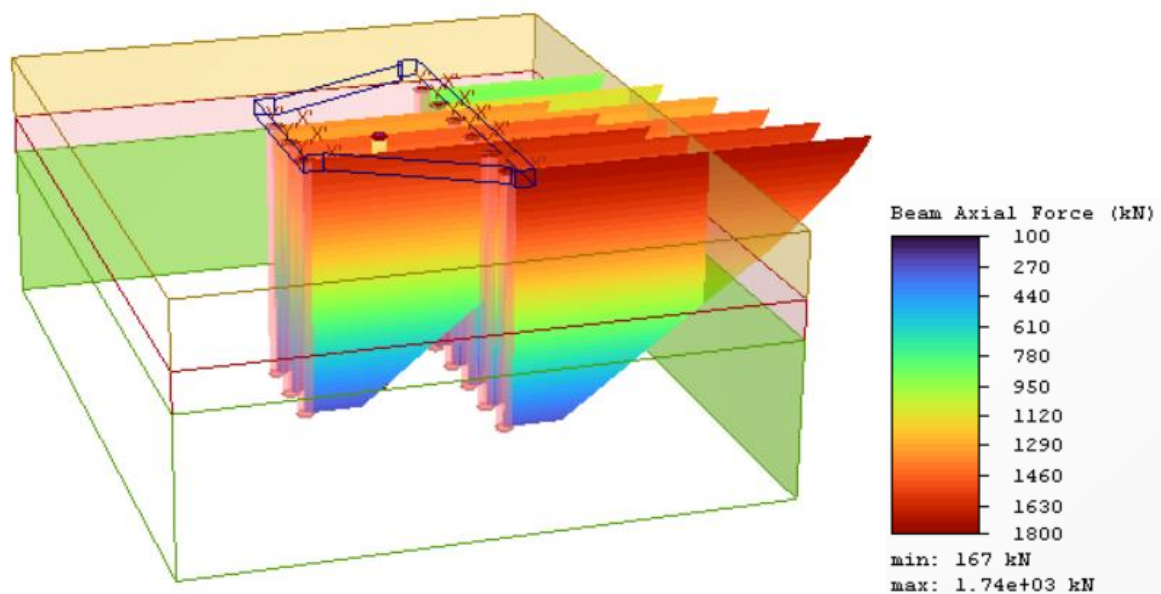
Uzdužne i poprečne sile te momenti za granično stanje uporabivosti također su prikazani na dva načina u nastavku.



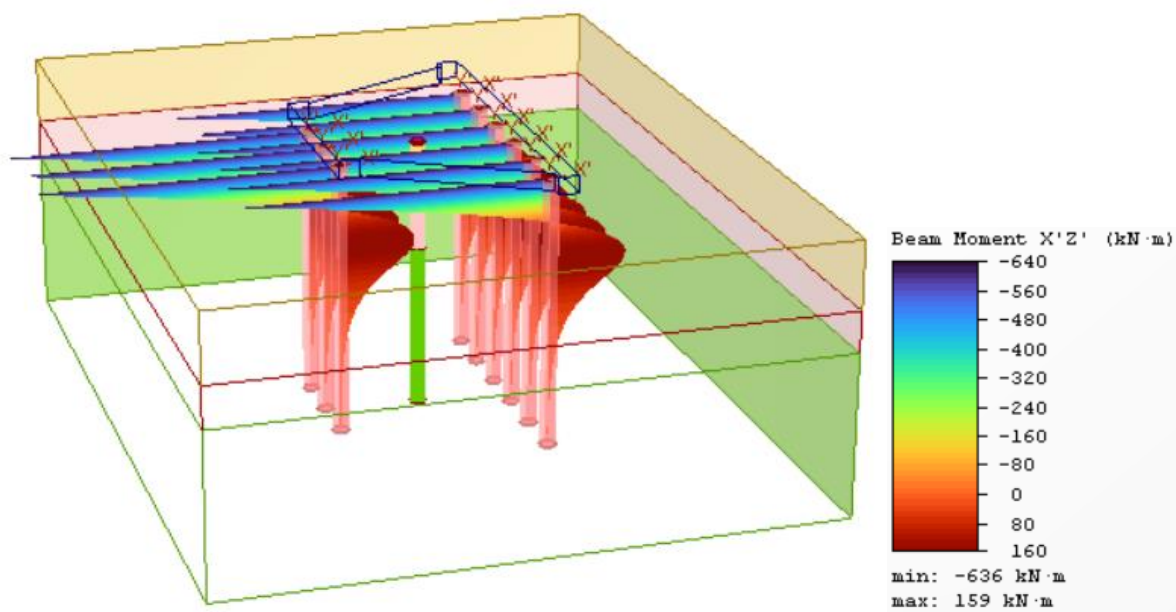
Slika 39.: Poprečne sile u x-smjeru za GSU



Slika 40.: Poprečne sile u y-smjeru za GSU

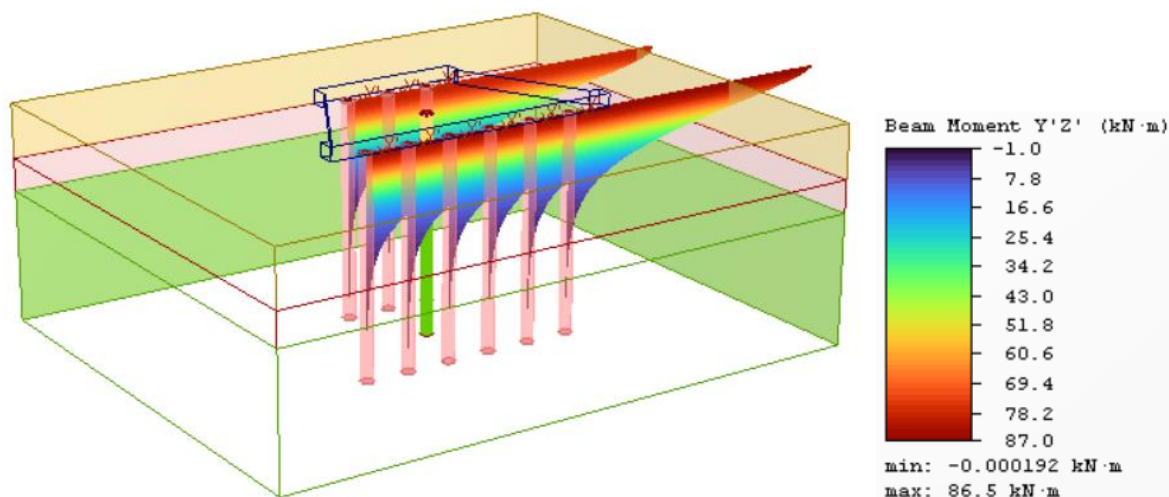


Slika 41.: Uzdužne sile u pilotima za GSU

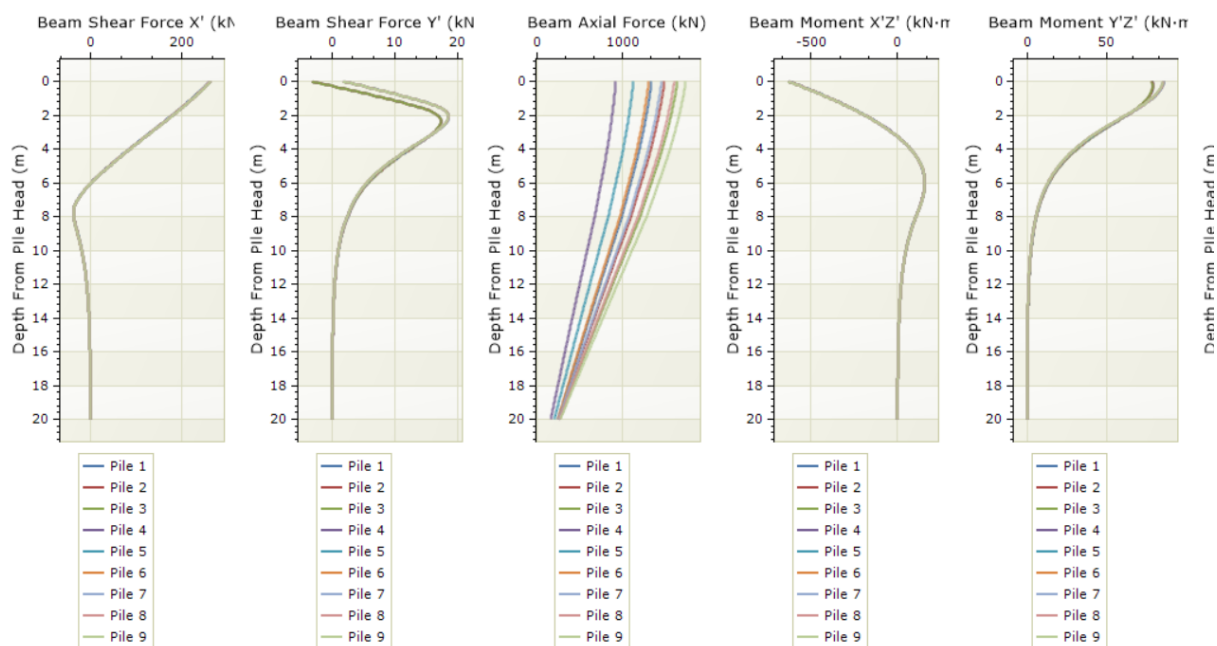


Slika 42.: Momenti u XZ ravnini za GSU





Slika 43.: Momenti u YZ ravni za GSU

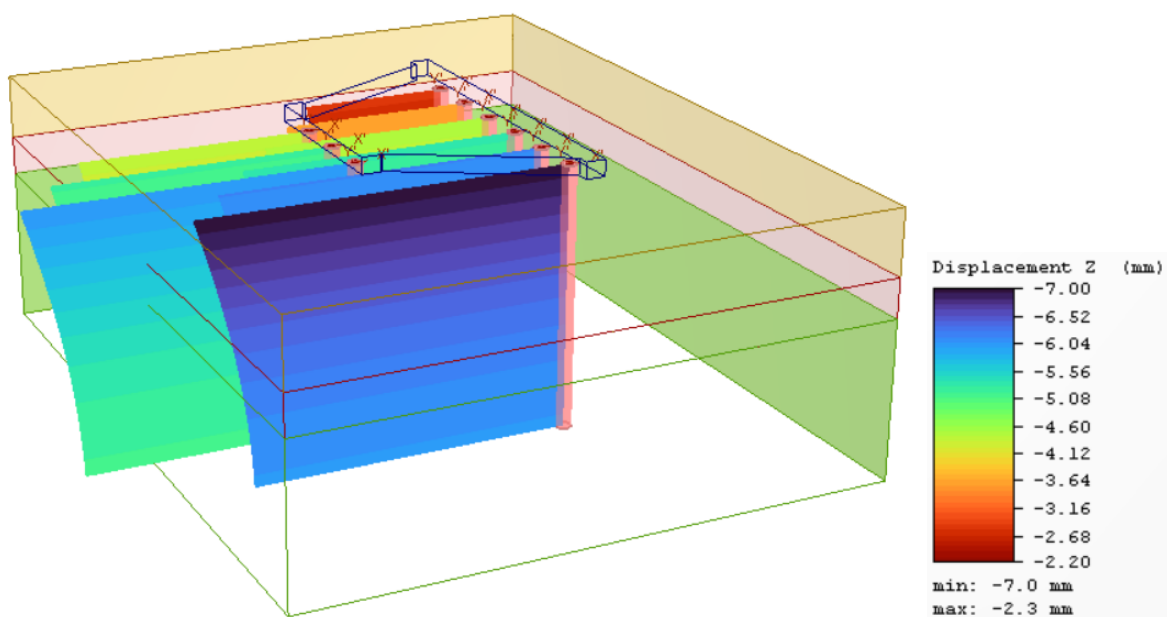


Slika 44.: Grafički prikaz uzdužnih sila, poprečnih sila i momenata za GSU

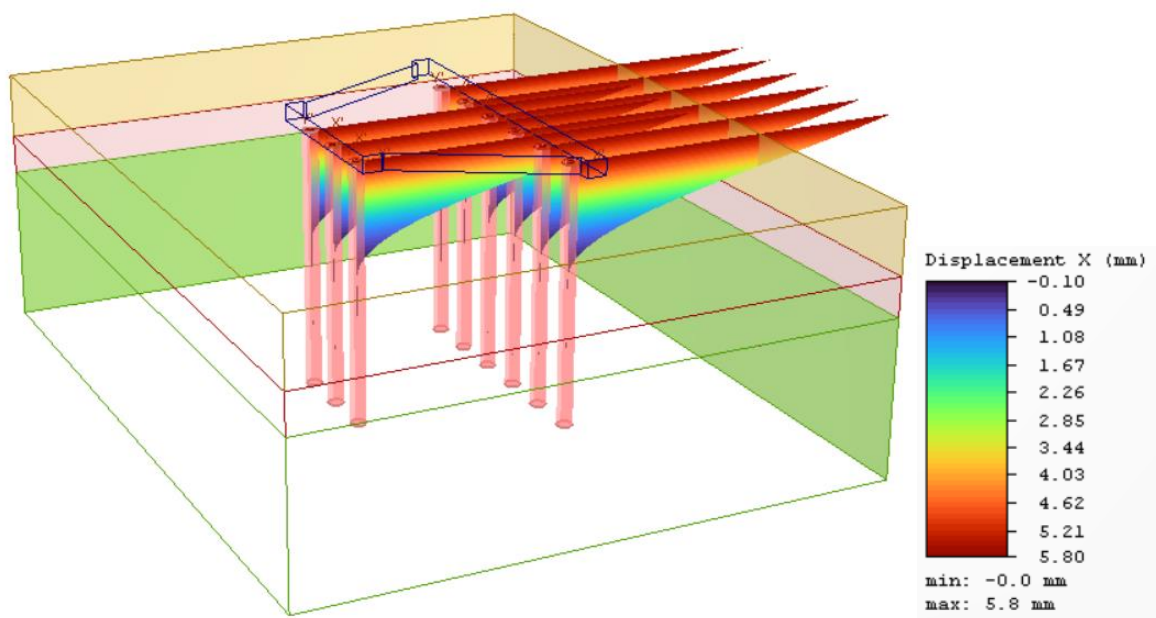
### 5.4.3. Granično stanje nosivosti

Pri proračunu nosivosti pilota korištena su relevantna opterećenja iz kombinacije opterećenja za karakteristično granično stanje nosivosti. Za te potrebe napravljena je nova analiza u programu RS Pile s istim modelom, no u ovom slučaju s drugim opterećenjima izvučenim iz projekta konstrukcije [22]. Korišten je PP2-B, isti proračunski pristup kao pri analitičkom računanju nosivosti pilota. U nastavku je prikazan niz rezultata analize koji uključuju vrijednosti slijeganja i poprečnih pomaka, reznih sila, mobiliziranog trenja na

plaštu i sile na stopi pilota. Bitno za naglasiti je da vrijednosti pomaka za granično stanje nosivosti nisu relevantne.

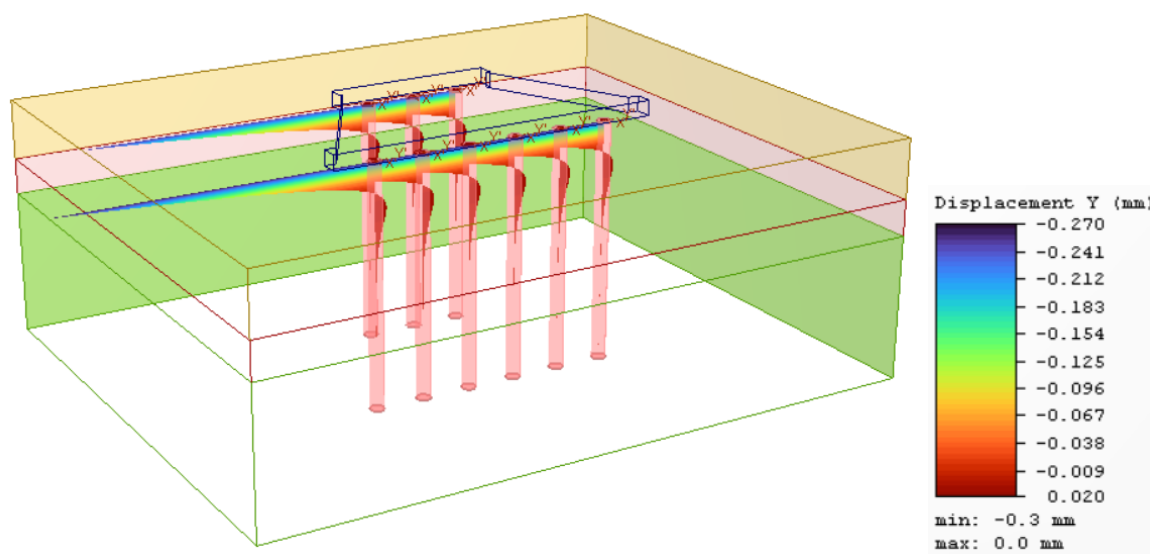
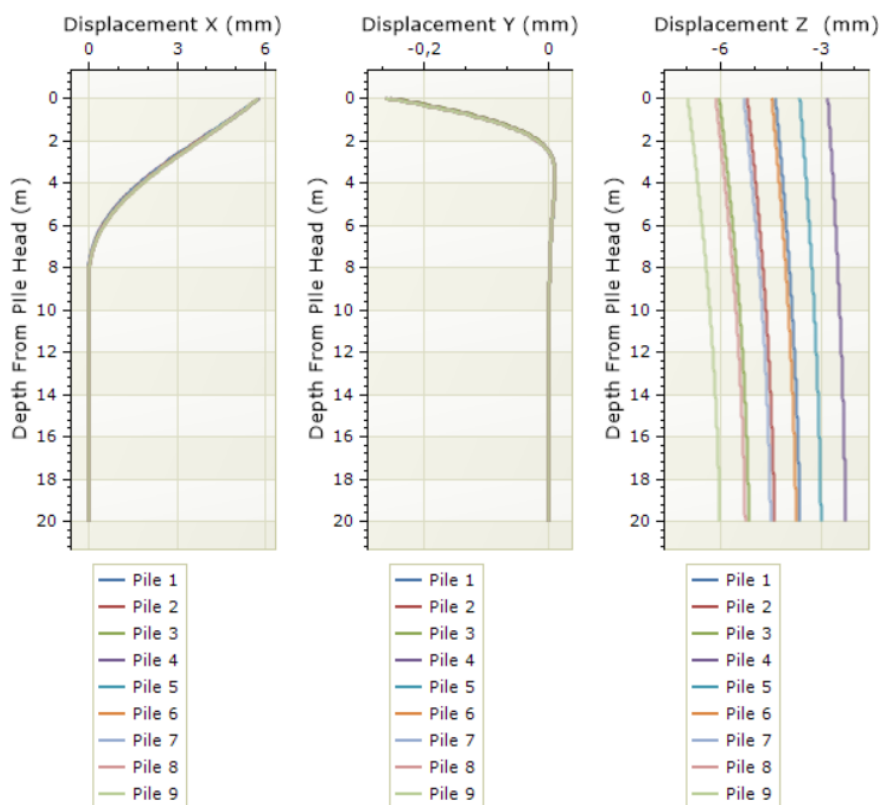


Slika 45.: Slijeganje pilota za GSN



Slika 46.: Poprečni pomaci u x-smjeru za GSN



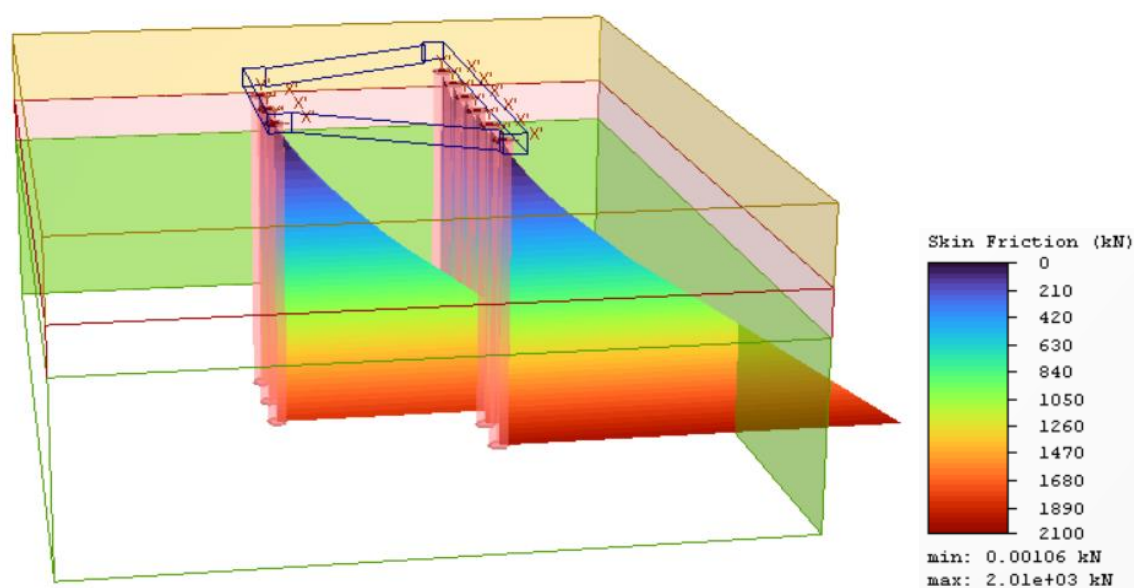
Slika 47.: Poprečni pomaci u  $y$ -smjeru za GSN

Slika 48.: Grafički prikaz pomaka za GSN

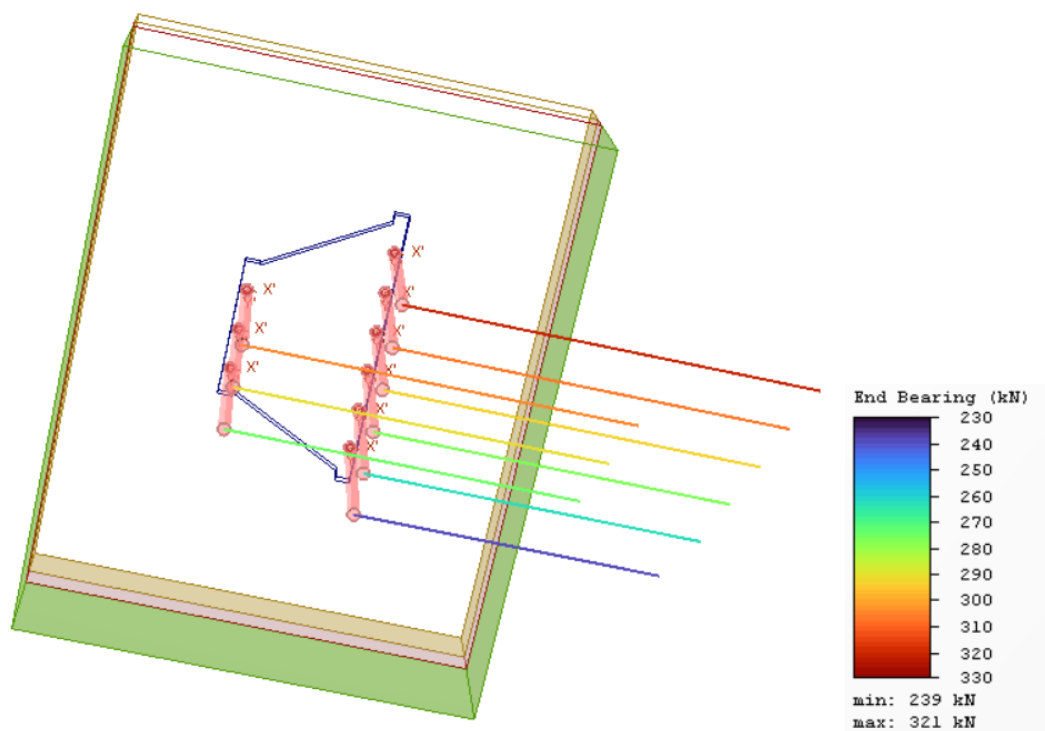
Kombinacija djelovanja korištena za provjere graničnih stanja nosivosti sastoji se od sila i momenata većih vrijednosti, pa su tako i pomaci veći. Najveće slijeganje iznosi 7 milimetara, poprečni pomaci u  $x$ -smjeru idu do vrijednosti od 5.8 milimetara, dok su u  $y$ -

smjeru i dalje vrlo mali te iznose 0.3 milimetra. Za usporedbu, provjera graničnog stanja uporabivosti dala je rezultate slijeganja od 4.4 milimetra, poprečnih pomaka u x-smjeru 3.5 milimetara te 0.1 milimetar za y-smjer. Provjera graničnog stanja uporabivosti u ovom slučaju je mjerodavna, dok se pomaci za granično stanje nosivosti ne uzimaju u obzir.

Sljedeće dvije slike prikazuju vrijednosti mobiliziranog trenja na plaštu pilota i mobilizirane sile na stopi pilota.

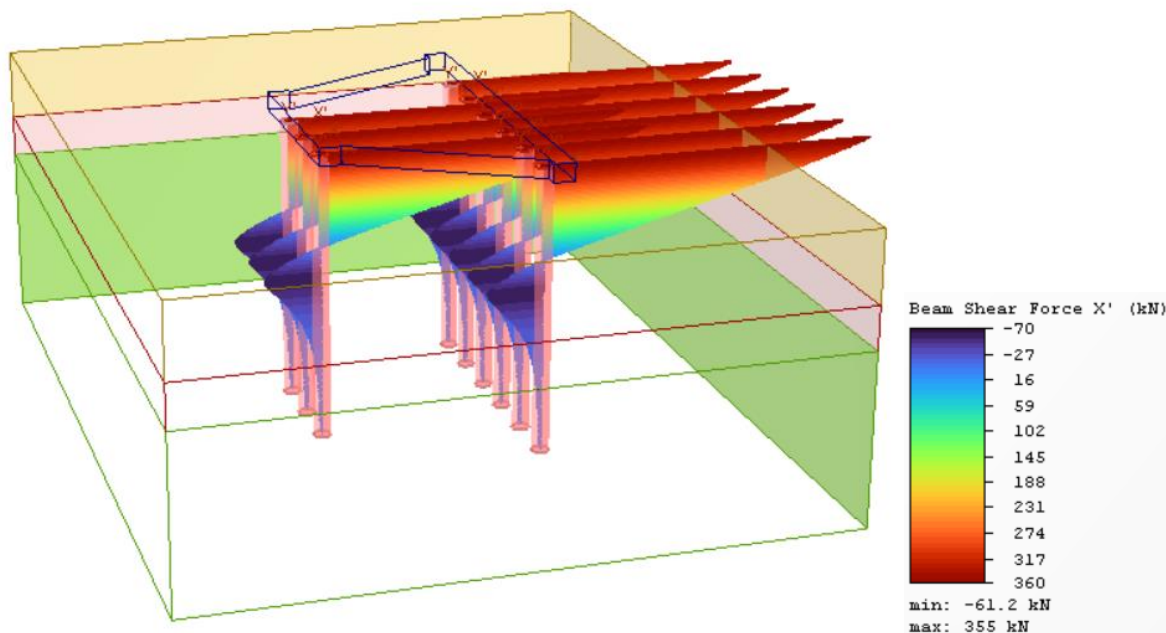


Slika 49.: Mobilizirano trenje na plaštu za GSN

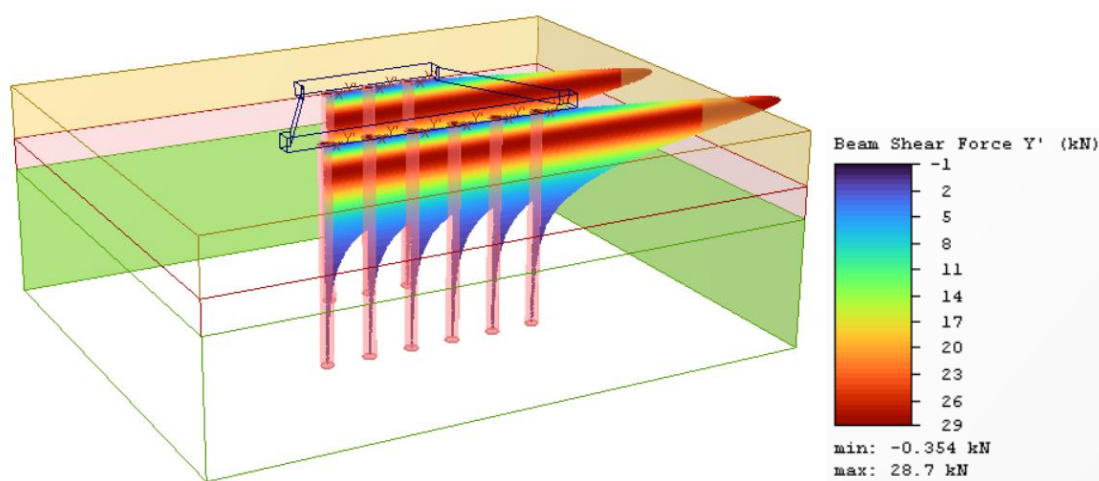


Slika 50.: Mobilizirana sila na bazi za GSN

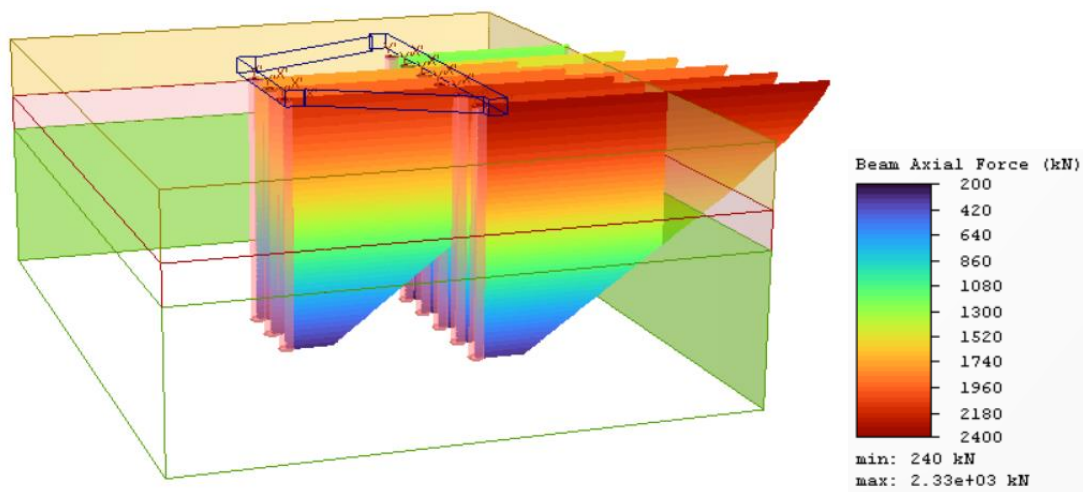
Kao što je vidljivo na gornjim slikama, mobilizirano trenje na plaštu iznosi 2010 kN, a mobilizirana sila na bazi značajno je manja te iznosi 321 kN. Posljednji izlazni podaci u ovoj analizi bit će vrijednosti uzdužnih i poprečnih sila u pilotima te vrijednosti momenata koji se javljaju.



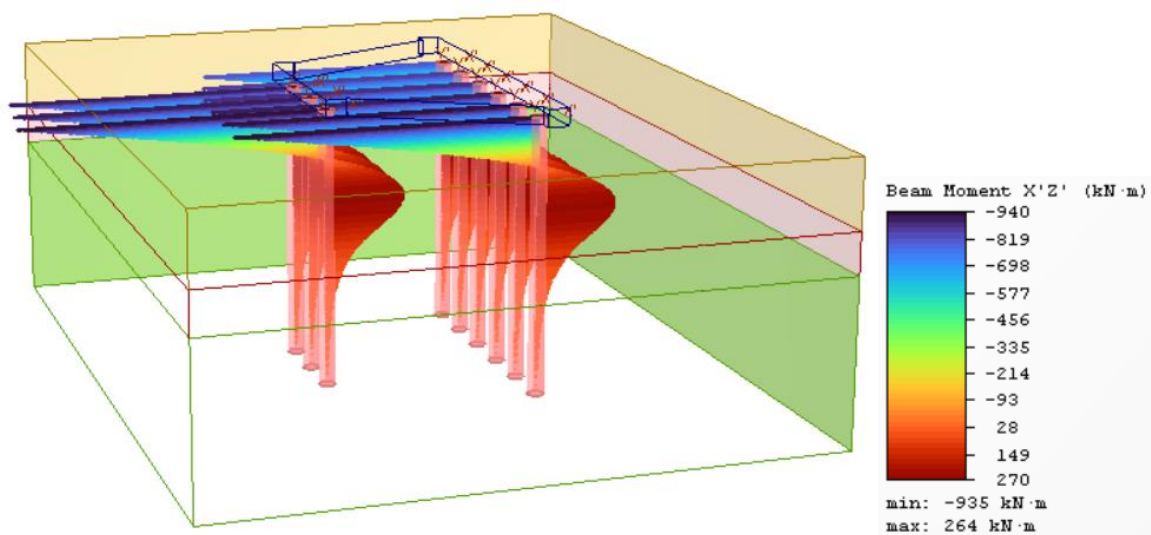
Slika 51.: Poprečne sile u x-smjeru za GSN



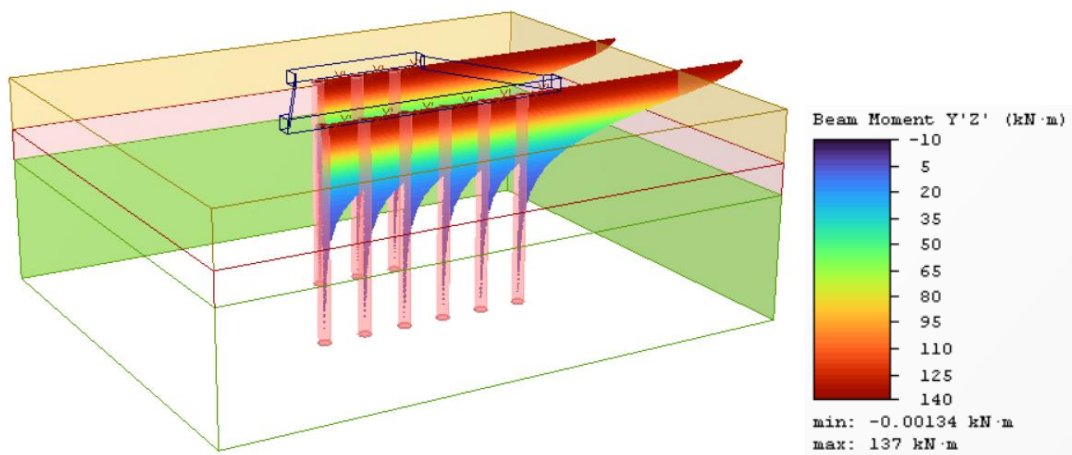
Slika 52.: Poprečne sile u y-smjeru za GSN



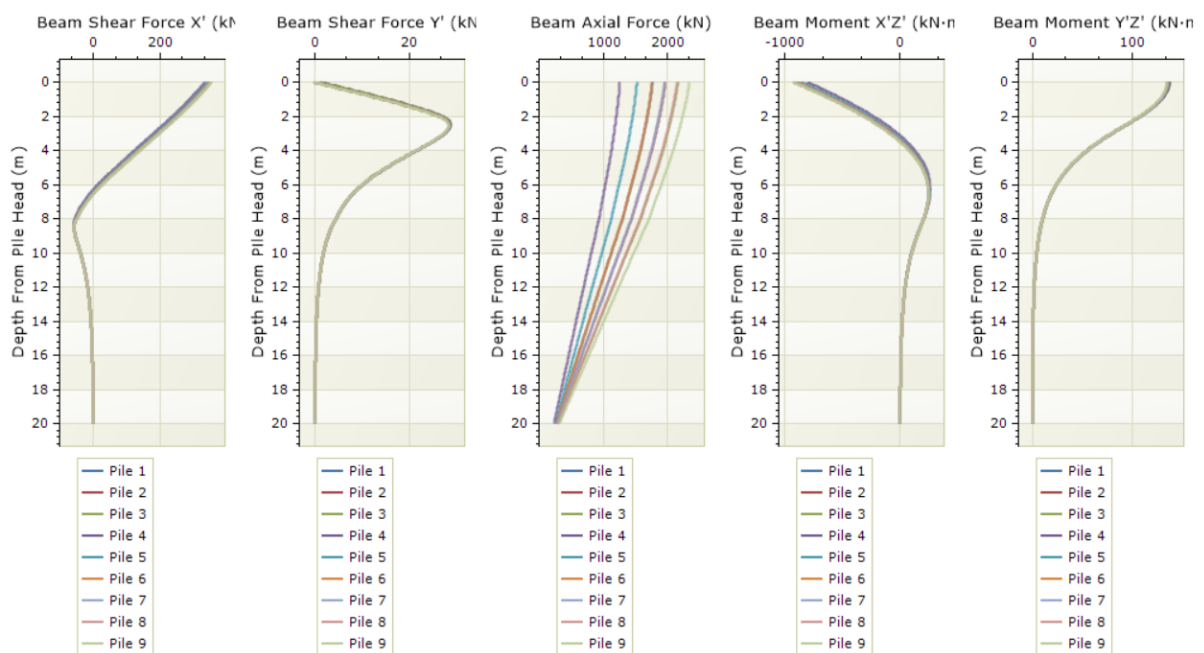
Slika 53.: Uzdužne sile u pilotima za GSN



Slika 54.: Momenti u XZ ravlini za GSN



Slika 55.: Momenti u YZ ravnini za GSN



Slika 56.: Grafički prikaz uzdužnih sila, poprečnih sila i momenata za GSN

## 5.5. Armiranje pilota

Konačni rezultati proračuna prikazani su u tablici 4 na kojoj je vidljiva usporedba vrijednosti prilikom provjere graničnog stanja uporabivosti i nosivosti. Za uzdužne i poprečne sile te momente odabrane su mjerodavne vrijednosti na temelju usporedbe vrijednosti iz graničnog stanja uporabivosti pomnoženih s koeficijentom 1.35 te graničnog stanja nosivosti pomnoženih s koeficijentom 1.0. Odabrana je uzdužna i poprečna armatura.

Tablica 5: Vrijednosti proračuna u RS Pileu

		Granično stanje uporabivosti	Granično stanje nosivosti
Pomaci (mm)	Slijeganje	4.4	-
	Horizontalni pomak u x-smjeru	3.5	-
	Horizontalni pomak u y-smjeru	0.1	-
Sile (kN)	Poprečne sile u x-smjeru	263	355
	Poprečne sile u y-smjeru	18.5	28.7
	Uzdužne sile u pilotima	1740	2330
Momenti (kNm)	Moment u XZ ravnini	636	935
	Moment u YZ ravnini	86.5	137

Odabrane su sljedeće vrijednosti za proračun:

$$N = 2349 \text{ kN}$$

$$V_x = 355 \text{ kN}$$

$$V_y = 28.7 \text{ kN}$$

$$M_x = 935 \text{ kNm}$$

$$M_y = 137 \text{ kNm}$$

Prvi korak izračuna odnosi se na vrijednosti  $f_{CD}$ ,  $f_{YD}$  i površinu poprečnog presjeka pilota:

$$f_{CD} = 1.0 \cdot \frac{30}{1.5} = 20 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{YD} = \frac{500}{1.15} = 434.78 \text{ N/mm}^2 = 43.478 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_c = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{120^2 \pi}{4} = 11304 \text{ cm}^2$$

Na temelju mjerodavnih opterećenja moguće je izračunati bezdimenzionalne veličine uzdužnih sila i momenta savijanja:



$$\nu_{ED} = \frac{N_{ED}}{A_C \cdot f_{CD}} = \frac{2349}{11304 \cdot 2} = 0.104$$

$$\mu_{ED} = \frac{M_{ED}}{A_C \cdot d \cdot f_{CD}} = \frac{94500}{11304 \cdot 120 \cdot 2} = 0.035$$

Na temelju dobivenih vrijednosti interakcijskim dijagramom ili izrazom moguće je odrediti mehanički koeficijent armiranja koji u ovom slučaju iznosi  $\omega = 0.15$ . Prelazi se na izračun potrebne, minimalne i maksimalne uzdužne armature.

$$A_S = \omega \cdot \frac{f_{CD}}{f_{YD}} = 0.15 \cdot \frac{2}{43.478} \cdot 11304 = 78.0 \text{ cm}^2$$

$$A_{S, MIN} = 0.0025 \cdot A_C = 28.3 \text{ cm}^2$$

$$A_{S, MIN, POTRES} = 0.01 \cdot A_C = 113.04 \text{ cm}^2$$

$$A_{S, MAX} = 0.04 \cdot A_C = 452.16 \text{ cm}^2$$

Iz priloženog je vidljivo da će mjerodavna biti minimalna armatura koja u ovom slučaju iznosi  $A_{S, MIN} = 113.04 \text{ cm}^2$ . Za tu površinu odabrano je 26 šipki promjera 24 milimetra za uzdužnu armaturu:

$$26\emptyset 24 (A_S = 117.52 \text{ cm}^2 > A_{S, REQ} = 113.04 \text{ cm}^2)$$

Za potrebe poprečnog armiranja pilota odabrana je spiralna armatura profila  $\emptyset 10$ . Razmak armature određen je na sljedeći način, uzimajući u obzir progušćenje na vrhu pilota:

$$s_{cl,t \text{ sredina}} = 12 \cdot \emptyset_S = 12 \cdot 2.4 = 28.8 \text{ cm}$$

$$s_{cl,t \text{ vrh}} = 0.6 \cdot 28.8 = 17.28 \text{ cm}$$

Dobivene vrijednosti zaokružene su na prvi niži cijeli broj, pa je tako razmak poprečne armature na vrhu pilota 17 centimetara, a kroz ostatak pilota 28 centimetara.

$\emptyset 10/28 \rightarrow$  sredina pilota

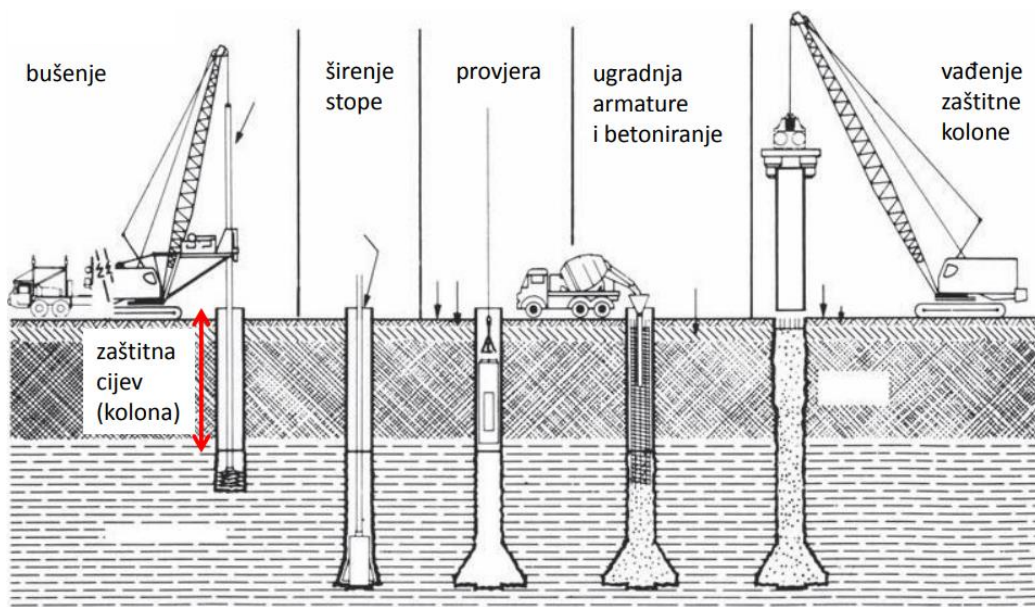
$\emptyset 10/17 \rightarrow$  vrh pilota

## 6. TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE I PROGRAM KONTROLE KVALITETE

### 6.1. Tehnički uvjeti izvedbe

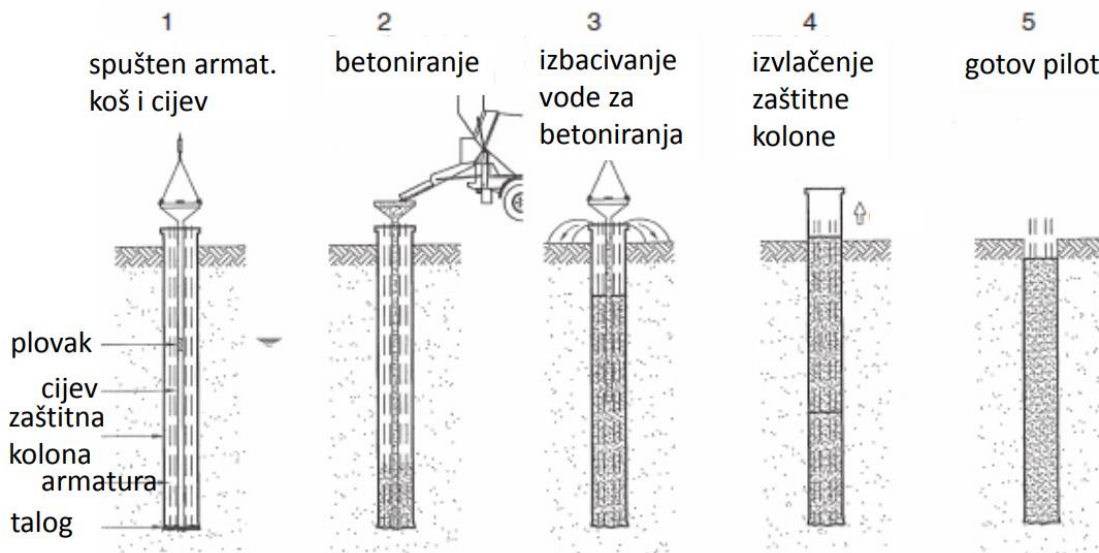
Za temeljenje mosta preko potoka Vuger odabrani su bušeni piloti. Tom odabiru prethodilo je više faza planiranja. Počevši sa prikupljanjem podataka i pregledom lokacije kasnije se pristupilo konkretnim terenskim i laboratorijskim istražnim radovima [28].

Bitni faktori za uzeti u obzir pri planiranju također su seizmički rizik, agresivna tla i voda. Za konkretnu lokaciju u Sesvetama treba voditi računa o dozvoljenoj razini buke s obzirom na naseljenost okolnog područja tako da zabijanje pilota nije prikladna opcija. Ugradnja i korištenje bušenih pilota izazvat će određene pomake u tlu koji mogu utjecati na susjedne građevine i infrastrukturu. Konkretno, geotehničkim elaboratom [16] definirano je da sjevernom stranom mosta prolazi vodovodna infrastruktura, što će također biti potrebno uzeti u obzir tijekom izvedbe. S obzirom na kratku duljinu mosta nešto manju od 15 metara, bušeni piloti su razumno rješenje jer duljine naglavnih elemenata neće biti prevelike. U slučajevima temeljenja većih mostova, primjena bušenih pilota je rijetka baš zbog velikog broja pilota koje je potrebno povezati naglavnom pločom [16, 30]. Slikovit prikaz izvedbe bušenih pilota prikazan je na slici 57.



Slika 57.: Izvedba bušenih pilota (Izvor: [28])

Potrebno je osigurati dovoljno prostora i pristupne putove za strojeve kojim se piloti ugrađuju te unaprijed računati na odgovorno uklanjanje otpada pri završetku ugradnje. Kao što je vidljivo na slici 58, bušeni piloti ugrađuju se u više koraka. Ključan element je zaštitna kolona koja stoji u tlu prilikom cijele ugradnje. Nakon spuštanja zaštitne kolone potrebno je raširiti prostor oko stope pilota prije početka ugradnje armaturnog koša i betoniranja. Pritom je bitno da armaturni koš ima vodilice za osiguravanje središnjeg položaja u pilotu. Sam postupak bušenja moguće je realizirati na više načina, a najpopularniji u praksi su bušenje grabilicom, bušenje pužnom bušilicom i bušenje beskonačnim pužem. Sve metode podrazumijevaju obradu glave pilota pri kraju postupka. Betoniranje je moguće obaviti takozvanim „kontraktor“ postupkom shematski prikazanim na slici 56. Naposljetku se ranije spomenuta zaštitna kolona vadi iz bušotine [28].



Slika 58.: Betoniranje „kontraktor“ postupkom (Izvor: [28])

Osim ranije navedenog razloga odabira bušenih pilota prije zabijenih koji se odnosi na buku proizvedenu pri zabijanju pilota, postoje još neke prednosti bušenih pilota nad zabijenima. Za ovaj projekt relevantne prednosti odnose se na manje poremećivanje tla, precizan uvid u sastav tla, mogućnost postizanja većih dubina i promjera te lakše svladavanje eventualnih prepreka u tlu. Ipak, naglasak je na točnom i opreznom izvođenju bušenih pilota. U slučaju nepravilnog bušenja može doći do smanjenja nosivosti pilota, a pri prebrzom i neopreznom izvlačenju zaštitne kolone može doći do oštećenja tijela pilota i armaturnog koša [28].

Piloti se izvode u grupama povezanim naglavnom konstrukcijom. Prednost takve izvedbe je mogućnost prijenosa većeg opterećenja i preraspodjela sila u slučaju smanjenja nosivosti jednog od pilota u grupi. Konkretno, za most preko potoka Vuger u Sesvetama projektirane su dvije grupe pilota [28, 29].

Za projektirane pilota predviđen je beton razreda C30/37 i armatura B500B [17]. Sami piloti promjera su 1200 milimetara i duljine 20 metara. Armaturu je potrebno zaštititi od korozije na jedan od uobičajenih načina, koji uključuju premaze, epoksi smole ili zaštitne slojeve. Urađeni su proračuni armature koji daju podatke o minimalnoj i maksimalnoj armaturi za svaki upornjak pri čemu mora biti ispunjen zahtjev graničnog stanja pukotina. Osim pilota, potrebno je armirati i naglavnu ploču koja povezuje pilote [22].

## **6.2. Program kontrole kvalitete**

Program kontrole kvalitete može se oslanjati na više različitih načina ispitivanja pilota. Neke od popularnijih metoda su test cjelovitosti pilota, dinamički test nosivosti pilota te statički test nosivosti pilota. Vrijedi spomenuti i test brzog opterećenja (RLT) koji je tek nedavno ušao u praksu [30].

### **6.2.1. Ispitivanje cjelovitosti pilota**

Ispitivanje cjelovitosti pilota, poznato i kao PIT (Pile Integrity Test) vrlo je jednostavan i koristan način ispitivanja integriteta tijela pilota. Test funkcionira na način da se na glavu pilota postavi sonda uz istovremeno udaranje glave pilota čekićem. Slika 59 prikazuje glavu pilota spremnu za ispitivanje cjelovitosti [31].



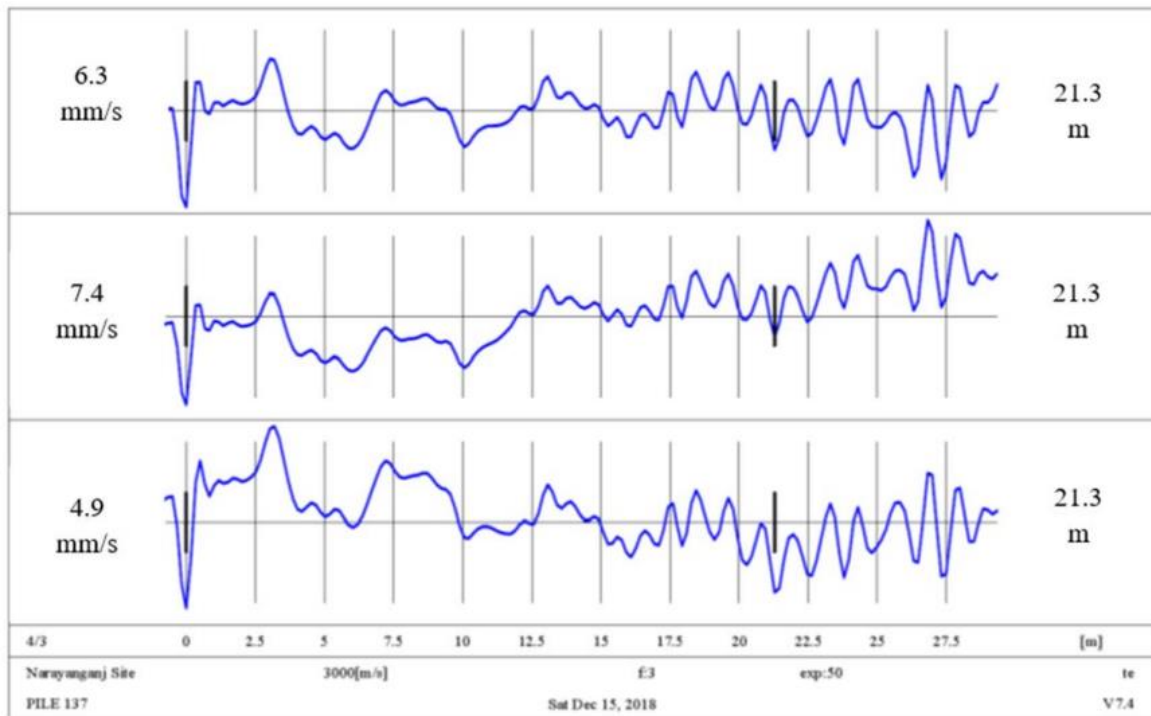
**Slika 59.:** Glava pilota spremna za ispitivanje cjelovitosti (Izvor: [31])

Nakon udarca čekića u glavu pilota mjeri se vremenski razmak između prolaska odlaznog elastičnog vala i odbijenog vala. Val se može odbiti od stopu pilota što bi značilo da tijelo pilota nema značajnijih oštećenja te se može prijeći na testiranje integriteta idućeg pilota. U slučaju da se val brže vrati, riječ je o oštećenju u tijelu pilota te integritet pilota nije osiguran. S obzirom na nisku cijenu i nerazorne karakteristike pokusa, obično se izvodi na svim pilotima [28].

Kao izlazni rezultati dobiju se karakteristični reflektogrami za pilote, koji grafički prikazuju ponašanje vala u pilotu. Iz njih je moguće procijeniti gdje se nalaze promjene u profilima pilota, oštećenja u betonu ili bilo kakve druge smetnje koje mogu ugrožavati cjelovitost pilota. Nekoliko primjera reflektograma prikazano je na slikama 60-62. Slika 60 prikazuje ponašanje vala u pilotu razumno dobre kvalitete betona te bez značajnijih pukotina ili promjena poprečnih profila. Na slici 61 vidljiv je pilot sa problemima uz glavu pilota. Moguće je da je riječ o malim pukotinama ili lošijoj kvaliteti materijala. Funkcionalnost pilota ovime nije ugrožena no razumno je za pretpostaviti da bi ovakav pilot mogao imati manju nosivost i trajnost. Slika 62 prikazuje najproblematičniji pilot koji ima pukotine ili smanjenja poprečnog presjeka na većoj udaljenosti od glave pilota. Moguće je i da je problem u loše izabranoj vrsti betona. Svakako, ovakav pilot ne može se smatrati funkcionalnim [31].







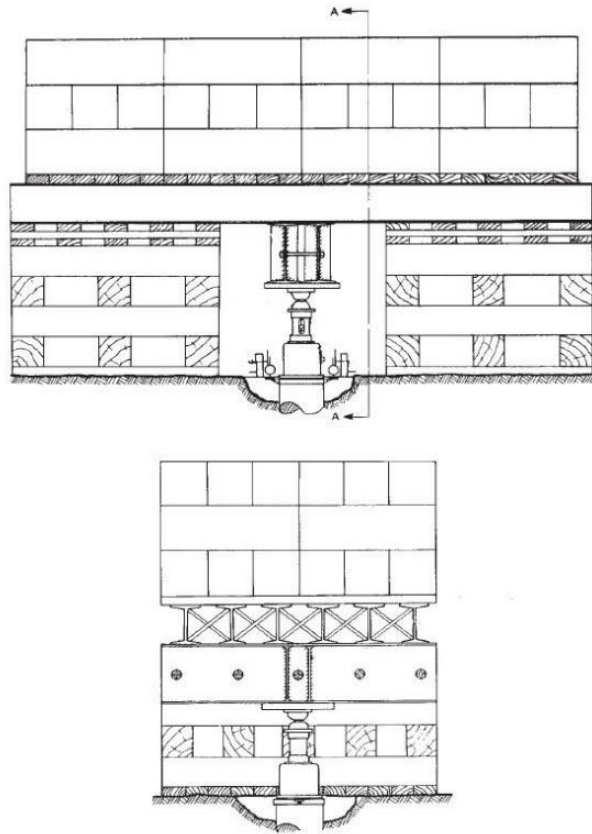
Slika 62.: Reflektogram pilota loše cjelovitosti (Izvor: [31])

Najveća mana ovog pokusa je u tome da su valovi preslabog intenziteta da bi se na temelju njihovih karakteristika mogla interpretirati nosivost pilota [28].

### 6.2.2. Statički test nosivosti pilota

Probno statičko opterećenje u praksi se može koristiti za određivanje nosivosti i slijeganja pilota. Za opterećivanje je potrebna hidraulička preša sa utegom ili usidrenim sustavom vlačnih pilota ili sidara. Slijeganje glave pilota i deformacije na pilotu mjere se pogodno postavljenim mjernim instrumentima. Opterećenje se nanosi inkrementalno uz povremena rasterećenja. Najveća mana pokusa je u njegovoj cijeni, koja je velika iz razloga što je potrebno postići iznimno velike sile pri opterećivanju pilota [28].

Bez obzira na cijenu, ova metoda smatra se najpouzdanijom te je vrlo često u uporabi. Prilikom ispitivanja bitno je bilježiti apliciranu silu i slijeganja pilota kako bi se konstruirala krivulja sila-pomak [1].



**Slika 63.:** Shema statičkog ispitivanja korištenjem hidrauličke preše pridržane protu-  
utegom (Izvor: [32])

Budući da se projektirani parametri mogu promijeniti prilikom ugradnje pilota, uputno je prethodno ugraditi probni pilot koji se stavlja pod opterećenje i ispituje. Dobiveni rezultati zatim se uspoređuju s projektiranim parametrima [32].

### 6.2.3. Dinamički test nosivosti pilota

Dinamički test nosivosti pilota, poznat i kao ispitivanje dinamičkim udarom, također se koristi za ispitivanje nosivosti i slijeganja pilota. Često ju je dobro koristiti kod zabijenih pilota jer se ispitivanje provodi istim instrumentom kojim se pilot i zabija, što omogućuje uštedu u mehanizaciji. Također se postavljaju deformetri i akcelerometri u blizini glave pilota. Oni mjere prolazak i povratak elastičnih valova izazvanih udarom [28].

Razlikuju se dvije metode: Case metoda i CAPWAP metoda. CAPWAP je računalni program koji procjenjuje nosivost po plaštu i stopi pilota te se preporuča njegova uporaba. Jedna od mana metode je da njeno pouzdano provođenje zahtijeva angažman visokoobrazovanog osoblja za interpretaciju rezultata [1].



Slika 64.: Provođenje dinamičkog testa nosivosti na terenu (Izvor: [33])

Velika prednost dinamičke metode nad statičkom je u izazivanju slijeganja sa znatno manjim silama nego pri statičkom pokusu. Računalni program simulira gibanje pilota i nosivost na plaštu i stopi te se iterativnim postupkom mijenjaju parametri dok ne dođe do poklapanja mjerenih vrijednosti sa vrijednostima dobivenim računalnim putem [1, 3].

## 7. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad obuhvatio je rješenje rekonstrukcije mosta preko potoka Vuger u Sesvetama. Most se nalazi na frekventnoj prometnoj lokaciji te povezuje naselje Sopnicu s ulicom Ljudevita Posavskog te je stoga rekonstrukcija neophodna. Osim temeljenja, mijenja se i infrastruktura na mostu. Tako se planira da most nakon izgradnje ima dva prometna traka te obostrani nogostup. Projekt je definirao temeljenje armiranobetonskim bušenim pilotima koje povezuje naglavna konstrukcija. Most se temelji na dva upornjaka te ukupno devet pilota, šest ispod jednog te tri ispod drugog upornjaka. Svi piloti istog su poprečnog presjeka te iste duljine, promjer im je 1.2 metra dok su dugački po 20 metara.

Provedeni su analitički i računalni proračuni nosivosti pojedinih pilota te analitički proračun grupa pilota. Slijeganja pilota, poprečni pomaci i rezne sile provjereni su softwareom. Za računalni proračun korišten je software RS Pile. Rezultati proračuna pružaju zadovoljavajuće rezultate glede graničnih stanja nosivosti i uporabivosti. Iz navedenog je moguće zaključiti da će projektirani most pri izvedbi na sebe moći preuzeti sva očekivana opterećenja a da pritom ne dođe do narušavanja nosivosti ili pojave neprihvatljivo velikih deformacija.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Ivšić, T., Bačić, M., Librić, L.: Procjene nosivosti i slijeganja bušenih pilota u mekim tlima, Građevinar 10, 2013.
- [2] Ghosh, B., Mian, J., Lubkowski, Z. A.: Design of piles in liquefiable soil: A review of design codes and methodologies, 15 WCEE, 2012.
- [3] Kempfert, H., Gebreselassie, B.: Shallow foundations on soft soils. In: Excavations and Foundations in Soft Soils. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [4] Prakash, S., Sharma, H. D.: Pile foundations in engineering practice, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [5] Civil Today. What is Pile Foundation? Types of Pile Foundation - Civil Engineering [Internet]. Civiltoday.com. 2019. Dostupno: <https://civiltoday.com/geotechnical-engineering/foundation-engineering/deep-foundation/176-pile-foundation-definition-types>
- [6] Sugatman M. Construction of a new bridge at Dambai, Penampang, Sabah: PROGRESS as on 28 Jan 2014 just before their 1 Week CNY Break [Internet]. Construction of a new bridge at Dambai, Penampang, Sabah. 2014 [pristupljeno 22.5.2024.]. Dostupno: <https://dambaibrige.blogspot.com/2014/02/progress-as-on-28-jan-2014-just-before.html>
- [7] View Riverside Steel Pipe Being Drilled Stock Footage Video (100% Royalty-free) 19493380 [Internet]. Shutterstock. [pristupljeno 22.5.2024.]. Dostupno: [https://www.shutterstock.com/video/clip-19493380-view-riverside--steel-pipe-being-drilled?src=search%2F\\_pITdQRVJN2-6h7MPINsqg%3A1%3A3](https://www.shutterstock.com/video/clip-19493380-view-riverside--steel-pipe-being-drilled?src=search%2F_pITdQRVJN2-6h7MPINsqg%3A1%3A3)
- [8] Pattekar K. What is Shallow And Deep Foundation ? [Internet]. KPSTRUCTURES. 2018 [cited 2024 May 22]. Dostupno: <https://www.kpstructures.in/2018/09/what-is-shallow-and-deep-foundation.html>
- [9] Roje-Bonacci, T., Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla, 2010.
- [10] Brookhaven [Internet]. East Coast Piles. [pristupljeno 22.5.2024.]. Dostupno: [http://eastcoastpiles.com/services/wood\\_piles/](http://eastcoastpiles.com/services/wood_piles/)
- [11] Teng, W. C.: Foundation design, 1992.

- [12] Namita. Pile Foundation | Classification of Pile Foundations | Pile Installation Methods | CivilDigital | [Internet]. CivilDigital. 2016. Dostupno: <https://civildigital.com/pile-foundation-classification-of-pile-foundations-pile-installation-methods/>
- [13] Admin. Concrete Pile [Internet]. Constructionor.com. 2022. Dostupno: [https://constructionor.com/concrete-pile/?utm\\_content=cmp-true](https://constructionor.com/concrete-pile/?utm_content=cmp-true)
- [14] Paikowsky, S., Hart, L.: Development and field testing of multiple deployment model pile (MDMP), FHWA, 2000.
- [15] admin. Type of Pile Foundation in Construction [Internet]. Basic Civil Engineering. 2016. Dostupno: <https://basiccivilengineering.com/2016/11/type-of-pile-foundation-in-construction.html>
- [16] Kovačević, M. S., Bačić, M., Pušić, L., Cvetković, M., Perić, T., Matić, S., Car, M., Jurić Kačunić, D.: Rekonstrukcija mosta na Vuger potoku i raskrižja Sopničke ulice i ulice Ljudevita Posavskog, 2021.
- [17] Markić, I., Bačić, M., Rossi, N., Jurić Kačunić, D.: Rekonstrukcija mosta na Vuger potoku i raskrižja Sopničke ulice i ulice Ljudevita Posavskog, 2022.
- [18] Basch, O. i dr.: Osnovna geološka karta SFRJ Ivanić-Grad, Geološki zavod Zagreb, OOUR za geologiju i paleontologiju, 1969.-1976.
- [19] Strelec, S.: Podpovršinski istražni radovi, Interna skripta, Geotehnički fakultet Varaždin, 2012.
- [20] Szavits-Nossan, V.: Geotehnički terenski istražni radovi, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [21] Stroud, M. A., The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, lipanj 5.-7., 1974 2(2): 367-375
- [22] PRONA-GRAD d.o.o.: Izvadak iz projekta konstrukcije mosta, 2021.
- [23] Reese, L., C., Isenhowe, W. M., Wang, S.-T.: Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations, 2006.
- [24] Ivšić, T.: Temelji na pilotima 1 – predavanje iz kolegija Temeljenje, Građevinski fakultet Zagreb, 2020.
- [25] Orr, T., Farrell, E.: Geotechnical Design to Eurocode 7 [Internet]. Springer eBooks. 1999. Dostupno: from: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0803-0>

- [26] Feld, J.: "Discussion on friction pile foundations", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, pp. 143-144, 1943.
- [27] International Journal of Scientific & Engineering Research, Volumen 7, Izdanje 7, srpanj 2016.
- [28] Szavits-Nossan, V.: Piloti, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [29] Shukla, R. P., Ponašanje grupe pilota pri naglom rušenju potporne konstrukcije, Građevinar, 11. izdanje, 2018.
- [30] TYPES OF PILE TESTING AND WHY THEY ARE NEEDED [Internet]. Sheer Force Engineering. 2021 [pristupljeno 30.7.2024.]. Dostupno: <https://sheerforceeng.com/2021/11/05/types-of-pile-testing-and-why-they-are-needed/#rapid-load-testing-of-piles>
- [31] Hossain, M. I., Hamim, O. F.: Evaluation of Cast-in-Situ Pile Condition Using Pile Integrity Test, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, vol. 14, br. 7, 2020.
- [32] Šandrak, A.: Modeliranje statičkog probnog opterećenja na lokaciji Ilica, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [33] Rajagopal, C., Solanki, C. H., Tandel, Y. K.: Comparison of Static and Dynamic Load Test of Pile, EJGE, vol. 17, 2012.



## POPIS SLIKA

<b>Slika 1:</b> Uporaba pilota u blizini rijeke (Izvor: [6]).....	4
<b>Slika 2:</b> Temeljenje upornjaka mosta na pilotima (Izvor: [7]) .....	4
<b>Slika 3:</b> Piloti prenose silu u stijenu (Izvor: [8]) .....	5
<b>Slika 4:</b> Drveni piloti (Izvor: [10]) .....	6
<b>Slika 5:</b> Čelični piloti u obliku H-profila (Izvor: [12]) .....	7
<b>Slika 6:</b> Betonski piloti kružnog presjeka (Izvor: [13]) .....	7
<b>Slika 7:</b> Pilot koji nosi na vrh i pilot koji nosi na trenje (Izvor: [15]).....	8
<b>Slika 8:</b> Lokacija mosta preko potoka Vuger na podlozi HOK 1:5000 (Izvor: [16]).....	10
<b>Slika 9:</b> Lokacija mosta preko potoka Vuger na Osnovnoj geološkoj karti, list Ivanić grad (Izvor: [16]).....	11
<b>Slika 10:</b> Mikrolokacija postojećeg mosta (Izvor: [16]) .....	11
<b>Slika 11:</b> Standardni penetracijski test (Izvor: [20]).....	13
<b>Slika 12 a:</b> CL/CH na dubini 20 m (Izvor: [16]).....	14
<b>Slika 12 b:</b> CL na dubini 4 m (Izvor: [16]).....	14
<b>Slika 13:</b> Prikaz istražne bušotine B1 (Izvor: [17]) .....	16
<b>Slika 14:</b> Fotografija istražne bušotine B1 (Izvor: [16]) .....	17
<b>Slika 15:</b> Prikaz istražne bušotine B2 (Izvor: [17]) .....	18
<b>Slika 16:</b> Fotografija istražne bušotine B2 (Izvor: [16]) .....	19
<b>Slika 17:</b> Korelacija parametra $f_1$ sa indeksom plastičnosti IP.....	20
<b>Slika 18 a:</b> Presjek istražne bušotine B1 (0-4 m) (Izvor: [17]) .....	21
<b>Slika 18 b:</b> Presjek istražne bušotine B2 (0-5 m) (Izvor: [17]) .....	21
<b>Slika 19:</b> Presjek istražne bušotine B2 (5-8 m) (Izvor: [17]).....	22
<b>Slika 20 a:</b> Presjek istražne bušotine B1 (4-20 m) (Izvor: [17]).....	23
<b>Slika 20 b:</b> Presjek istražne bušotine B2 (8-20 m) (Izvor: [17]).....	23
<b>Slika 21:</b> Geotehnički profil tla.....	24
<b>Slika 22:</b> Postojeći most preko potoka Vuger (Izvor: [17]).....	25
<b>Slika 23:</b> Empirijski izrazi za otpornost na stopi i plaštu pojedinog pilota (Izvor: [24]) .....	26
<b>Slika 24:</b> Interpolacija vrijednosti faktora nosivosti.....	27
<b>Slika 25:</b> „Alfa“ postupak određivanja nosivosti na plaštu (Izvor: [23]).....	28
<b>Slika 26:</b> Rezne sile za pojedinačne pilote ispod upornjaka za granično stanje uporabivosti i nosivosti.....	30
<b>Slika 27:</b> Feldova metoda za procjenu grupne nosivosti pilota (Izvor: [26]) .....	31

<b>Slika 28:</b> Grupa pilota ispod upornjaka U1 .....	32
<b>Slika 29:</b> Grupa pilota ispod upornjaka U2 .....	33
<b>Slika 30:</b> Tlocrtni prikaz modela.....	34
<b>Slika 31:</b> Trodimenzionalni prikaz modela.....	35
<b>Slika 32:</b> Model pilota za proračun nosivosti.....	36
<b>Slika 33:</b> Rezultati računalne provjere nosivosti jednog pilota.....	36
<b>Slika 34:</b> Graf za određivanje poprečnog koeficijenta učinkovitosti grupe .....	37
<b>Slika 35:</b> Slijeganje pilota za GSU.....	38
<b>Slika 36:</b> Poprečni pomaci u x-smjeru za GSU .....	39
<b>Slika 37:</b> Poprečni pomaci u $y$ -smjeru za GSU .....	40
<b>Slika 38:</b> Grafički prikaz pomaka za GSU.....	40
<b>Slika 39:</b> Poprečne sile u x-smjeru za GSU.....	41
<b>Slika 40:</b> Poprečne sile u $y$ -smjeru za GSU .....	41
<b>Slika 41:</b> Uzdužne sile u pilotima za GSU.....	42
<b>Slika 42:</b> Momenti u XZ ravnini za GSU .....	42
<b>Slika 43:</b> Momenti u YZ ravnini za GSU .....	43
<b>Slika 44:</b> Grafički prikaz uzdužnih sila, poprečnih sila i momenata za GSU .....	43
<b>Slika 45:</b> Slijeganje pilota za GSN.....	44
<b>Slika 46:</b> Poprečni pomaci u x-smjeru za GSN .....	44
<b>Slika 47:</b> Poprečni pomaci u $y$ -smjeru za GSN .....	45
<b>Slika 48:</b> Grafički prikaz pomaka za GSN .....	45
<b>Slika 49:</b> Mobilizirano trenje na plaštu za GSN .....	46
<b>Slika 50:</b> Mobilizirana sila na bazi za GSN .....	47
<b>Slika 51:</b> Poprečne sile u x-smjeru za GSN .....	48
<b>Slika 52:</b> Poprečne sile u $y$ -smjeru za GSN .....	48
<b>Slika 53:</b> Uzdužne sile u pilotima za GSN.....	49
<b>Slika 54:</b> Momenti u XZ ravnini za GSN.....	49
<b>Slika 55:</b> Momenti u YZ ravnini za GSN .....	50
<b>Slika 56:</b> Grafički prikaz uzdužnih sila, poprečnih sila i momenata za GSN.....	50
<b>Slika 57:</b> Izvedba bušenih pilota (Izvor: [28]).....	54
<b>Slika 58:</b> Betoniranje „kontraktor“ postupkom (Izvor: [28]).....	55
<b>Slika 59:</b> Glava pilota spremna za ispitivanje cjelovitosti (Izvor: [31]).....	57
<b>Slika 60:</b> Reflektogram pilota dobre cjelovitosti (Izvor: [31]).....	58
<b>Slika 61:</b> Reflektogram pilota s problemima oko glave pilota (Izvor: [31]).....	58
<b>Slika 62:</b> Reflektogram pilota loše cjelovitosti (Izvor: [31]).....	59

---

<b>Slika 63:</b> Shema statičkog ispitivanja korištenjem hidrauličke preše pridržane protutegom (Izvor: [32]).....	60
<b>Slika 64:</b> Provođenje dinamičkog testa nosivosti na terenu (Izvor: [33]).....	61

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Parametri materijala po bušotinama (Izvor: [16]).....	15
Tablica 2: Parcijalni faktori prema EC7 (Izvor: [25]).....	29
Tablica 3: Ulazna opterećenja za model u RS Pileu .....	35
Tablica 4: Uzdužni i poprečni koeficijenti učinkovitosti grupe pilota.....	38
Tablica 5: Vrijednosti proračuna u RS Pileu .....	51