

Rekonstrukcija nasipa za obranu od poplava Hrastelnica oštećenog u potresu

Radić, Josip

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:237:227583>

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

Josip Radić

**Rekonstrukcija nasipa za obranu od poplava
Hrastelnica oštećenog u potresu**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Radić

**Rekonstrukcija nasipa za obranu od poplava
Hrastelnica oštećenog u potresu**

DIPLOMSKI RAD

Izv. prof. dr. sc. Mario Bačić

Zagreb, 2024



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Josip Radić

**Reconstruction of a Hrastelnica levee
damaged in earthquake**

MASTER THESIS

Supervisor: Assoc. Prof. Mario Bačić, PhD CE

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Josip Radić

(Ime i prezime)

0082062032

(IMBAG)

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

Rekonstrukcija nasipa za obranu od poplava Hrastelnica oštećenog u potresu

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Reconstruction of a Hrastelnica levee damaged in earthquake

(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)

LevelLiq (Mapiranje prostorne varijabilnosti likvefakcijskog potencijala ispod nasipa za obranu od poplava i modeliranje optimalnih mitigacijskih tehnika)

(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:

13.11.2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

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

(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:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(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:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

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

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(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:

Potpis:

ZAHVALE

Iskrene zahvale upućujem svom mentoru izv.prof.dr.sc. Mariju Bačiću, za podršku, savjete i podijeljeno znanje tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Hvala mojim roditeljima, sestri i bratu bez kojih ovaj uspjeh nikad ne bih ostvario.

Na kraju hvala prijateljima i kolegama što su ovo studiranje učinili nezaboravnim.

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je rekonstrukcija nasipa za obranu od poplava u naselju Hrastelnica u sisačko-moslavačkoj županiji. Uslijed razornog potresa koji se dogodio 2020. godine nasip i okolno tlo su se deformirali i slomili na nekoliko lokacija. Jedan od najznačajnijih faktora koji je utjecao na slom nasipa je likvefakcija tla ispod samog nasipa. Tijekom likvefakcije tlo je izgubilo svoju čvrstoću i slomilo se. Tijekom istražnih radova detektirano je da je tlo sastavljeno od gline niske plastičnosti, teško gnječivog do čvrstog konzistentnog stanja, sa primjesama pijeska koje se povećavaju sa dubinom. Ispod tog sloja detektiran je sloj glinovitog slabo graduiranog pijeska. U radu se na temelju odabranih parametara iz geofizičkih i geotehničkih istražnih radova vrši provjera graničnog stanja nosivosti i uporabivosti za nasip. Otpornost i stabilnost nasipa će se dokazati za predviđena statička i seizmička opterećenja uz provedbu naponsko-deformacijskih analiza, analiza procjeđivanja te analiza stabilnosti.

Ključne riječi: nasip za obranu od poplava, potres, parametri, likvefakcija, rekonstrukcija, mlazno injektiranje, analize stabilnosti, dinamičke analize, analize procjeđivanja

SUMMARY

The topic of this thesis is the rehabilitation of levee in the settlement of Hrastelnica in Sisak-Moslavina County. Following the devastating earthquake that occurred in 2020, the levee and surrounding soil deformed and failed at several locations. One of the most significant factors contributing to the failure of the levee was soil liquefaction beneath the embankment itself. During liquefaction, the soil lost its strength and subsequently failed. Investigation studies detected that the soil consists of low-plasticity clay, ranging from stiff to very stiff consistency, with increasing sand content at greater depths. Beneath this layer, a layer of clayey, poorly graded sand was identified. Based on selected parameters from geophysical and geotechnical investigations, this thesis evaluates the ultimate and serviceability limit states of the levee. The levee's resistance and stability will be demonstrated for the anticipated static and seismic loads through stress-strain analyses, seepage analysis, and stability analysis.

Key words: levee, earthquake, parameters, liquefaction, restoration, jet grouting, stability analyses, dynamic analyses, seepage analyses

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. LIKVEFAKCIJA I METODE SANACIJE NASIPA	2
2.1. Općenito o likvefakciji.....	2
2.1.1. Utjecaj likvefakcije na nasipe i prevencija likvefakcije	3
2.1.2. Ostali mehanizmi prekoračenja graničnih stanja nasipa	4
2.1.3. Metode sanacije nasipa i temeljnog tla.....	7
2.2. Predmetna lokacija i oštećenja.....	11
3. RAZRADA PODLOGA I ODABIR RELEVANTNIH PARAMETARA	17
3.1. Geotehnička sredina 1-sloj nasipa (CL/SC).....	26
3.1.1. Rezultati za bušotinu B-1	26
3.1.2. Rezultati za bušotinu B-2	28
3.1.3. Rezultati za bušotinu B-3	29
3.1.4. Rezultati za bušotinu B4	30
3.2. Geotehnička sredina 2-sloj niskoplastične gline (CL).....	32
3.2.1. Rezultati za bušotinu B1	32
3.2.2. Rezultati za bušotinu B-2	34
3.2.3. Rezultati za bušotinu B-3	35
3.2.4. Rezultati za bušotinu B-4	36
3.3. Geotehnička sredina 3-sloj pijeska (SC)	37
3.3.1. Rezultati za bušotinu B-1	37
3.3.2. Rezultati za bušotinu B-2	38
3.3.3. Rezultati za bušotinu B-3	39
3.3.4. Rezultati za bušotinu B-4	41
3.4. Karakteristične srednje vrijednosti parametara slojeva	42
3.5. Seizmičke karakteristike lokacije.....	43
4. GEOTEHNIČKI PRORAČUN.....	44
4.1. Postojeće stanje	44

4.1.1.	Stacionarna analiza.....	44
4.1.2.	Nestacionarna analiza.....	46
4.2.	Sanacija nasipa.....	48
4.2.1.	Analize stabilnosti.....	48
4.2.2.	Analize procjeđivanja.....	56
4.3.	Dinamička analiza i ojačanje stupnjacima.....	59
4.3.1.	Prva analiza.....	59
4.3.2.	Druga analiza.....	66
5.	TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE I PROGRAM KONTROLE KVALITETE	70
5.1.	Opći uvjeti izvedbe	70
5.2.	Izrada nasipa.....	71
5.3.	Polaganje geomreža.....	72
5.4.	Izvedba mlazno injektiranih stupnjaka	73
5.5.	Kontrola kvalitete	75
6.	ZAKLJUČAK.....	76
	POPIS LITERATURE	77
	POPIS SLIKA.....	80
	POPIS TABLICA.....	83

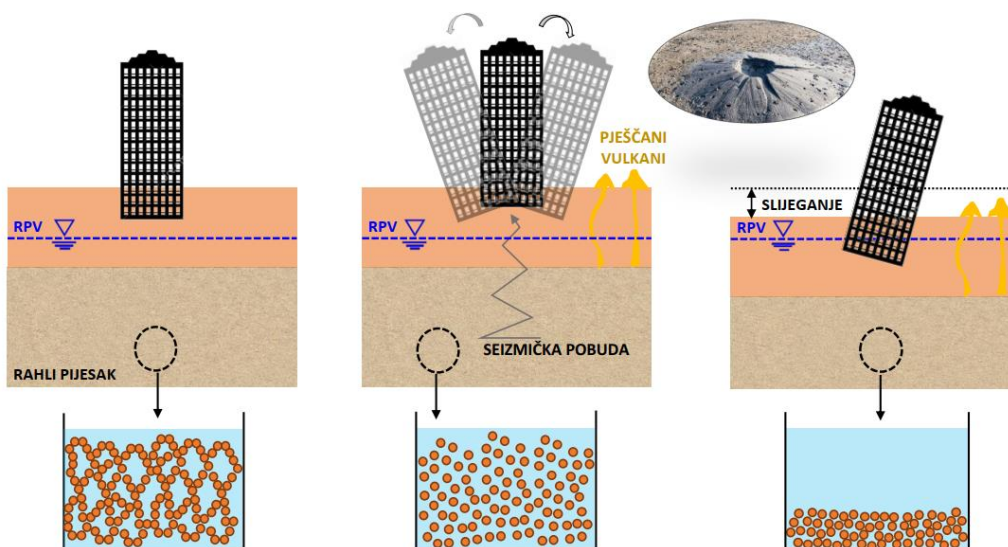
1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je obnova nasipa za obranu od potresa u mjestu Hrastelnica pored Siska. Sisačko-moslavačku županiju je 29.12.2020. pogodio potres magnitude 6.4 prema Richteru, a dan prije 28.12.2020. dva potresa magnitude 5.1 i 5.2 prema Richteru. U narednom periodu od prosinca do siječnja 2021.godine zabilježeno je niz naknadnih podrhtavanja sa magnitudom manjom od 5 prema Richteru. Nasip za obranu od poplava u mjestu Hrastelnica igra veliku ulogu u obrani tog dijela naselja od poplava stoga je njegova stabilnost ključna za sigurnost stanovništva i infrastrukture u periodima visokih voda koji se zbog klimatskih promjena sve više mijenjaju. Na temelju geotehničkih istražnih radova, geofizike, CPT i SPT pokusa obavljene su laboratorijske analize koje su omogućile uvid u stanje i kvalitetu nasipa i temeljnog tla. Na temelju njih određeni su parametri za geotehnički proračun pomoću računalnog programa Geostudio. Analizirano je postojeće stanje nasipa oštećenog u potresu, kao i mehanička i hidraulička otpornost nasipa saniranog na način da je temeljno tlo ojačano mlaznim injektiranjem a sam nasip je rekonstruiran na način da se koristio isti materijal iskopa nasipa uz ugradnju geomreža. Provedene su analize procjeđivanja stacionarna i nestacionarna za postojeće stanje. Analize stabilnosti su provedene za različite proračunske situacije: visoka razina vodnog lica, niska razina vodnog lica tj. kad je nasip suh, naglo sniženje vode, visoka voda sa pozitivnim i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja te pozitivni i vertikalni koeficijent ubrzanja sa visokom vodom u nedreniranim uvjetima. Provedene su još i analize slijeganja koje su uključivale kombinaciju dinamičke analize te naponsko deformacijske analize.

2. LIKVEFAKCIJA I METODE SANACIJE NASIPA

2.1. Općenito o likvefakciji

Likvefakcija tla je pojava koja se najčešće događa tijekom jakih potresa u tlima koja sadrže vodom zasićene zrnate materijale. Materijal koji je zasićen vodom se odjednom na određeno vrijeme pretvaraju u gustu tekućinu, odnosno „likvefira“, gubeći pritom svoju posmičnu čvrstoću, čime gube i mogućnost da podupiru građevinu [1].



Slika 1.: Likvefakcija (Izvor: [2])

Sam pojam likvefakcije obuhvaća nekoliko različitih fenomena od kojih su najpoznatija tzv. „flow liquefaction“ i ciklična mobilnost.

„Flow liquefaction“ odnosno tekuća likvefakcija tla se događa većinom u rastresitim tlima sa niskom rezidualnom čvrstoćom koja je manja od otpora koji je potreban za statičku ravnotežu okoline. Posljedica te nestabilnosti može dovesti do velikih deformacija čiji su pokreti slični klizanju. Uzrok deformacija je statička promjena naprezanja koja je još uvijek prisutna. Sami slučajevi ovog tipa likvefakcije su rijetki u praksi ali uzrokuju ogromna oštećenja [3].

Ciklična mobilnost je fenomen u kojem su posmična naprezanja glavni uzrok cikličnim porednim tlakovima u tlu sa rezidualnom čvrstoćom koja je veća od potrebne za statičku ravnotežu. Ovaj fenomen se najčešće događa u obliku bočnog pomicanja, u procesu

akumulacije trajnih pomaka pod utjecajem statičkih naprezanja tijekom seizmičke aktivnosti [3].

Potres koji djeluje kao brzo cikličko opterećenje, onemogućuje tlu mogućnost dreniranja, pa zbog toga dolazi u nedrenirano stanje koje karakterizira porast pornih tlakova uslijed spriječene promjene volumena [1].

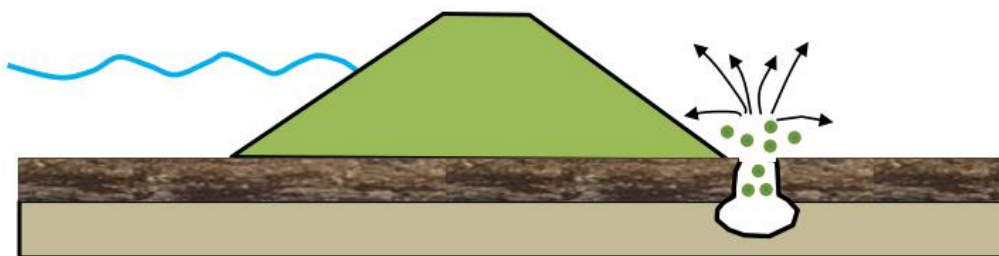
Prema Bačiću i dr. [1] dva su faktora koja se događaju istodobno omogućuju likvefakciju:

1. Materijali koji su najčešće podložni likvefakciji su rahli, čisti, sitni pijesci dok je u ostalim materijalima, kao što su šljunak ili neki koherentni materijali kao npr. prahovi i gline, praktički nepoznata. Likvefakcija se najčešće događa u gornjih 12-15 m profila tla.
2. Potres predstavljen maksimalnim seizmičkim ubrzanjem.

Slučajevi likvefakcije koji su se do sada pojavili u svijetu jasno pokazuju da je njena pojava nepravilna i da ovisi i o drugim pojavama u profilu tla. Glavna značajka likvefakcije je da uzrokuje gubitak nosivosti temeljnog tla, te deformacije koje uzrokuju naginjanje ili prevrtanje građevina [1].

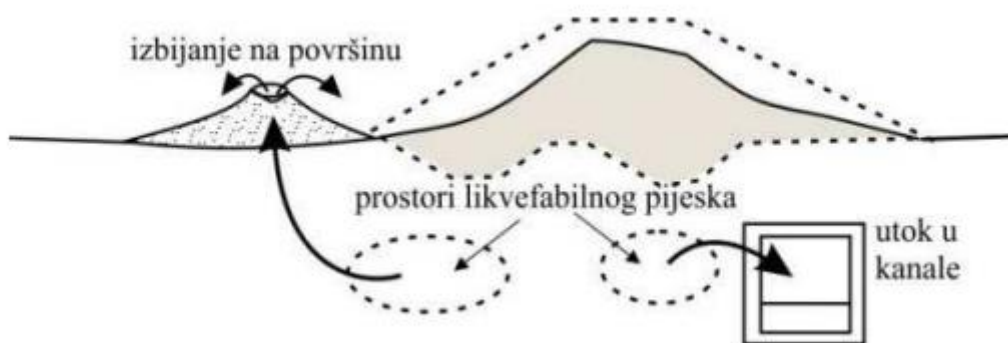
2.1.1. Utjecaj likvefakcije na nasipe i prevencija likvefakcije

Kod pojave likvefakcije kod nasipa dolazi do specifične situacije jer dovoljno je da se likvefakcija pojavi negdje u samoj blizini nasipa a ne u samom nasipu i na taj način se može uzrokovati slabljenje nasipa i njegov slom. Sama likvefakcija se može dogoditi zbog povećanja pornih tlakova na ili izvan nožice nasipa. Temeljno tlo ili materijal nasipa naglim smanjenjem posmične čvrstoće može dovesti do pojave nestabilnosti kao što je urušavanje nasipa ili klizanje nožice nasipa, a seizmička aktivnost uvelike na to može utjecati. Tijekom izbijanja vode kroz nasip ili u okolini nasipa zbog smanjenja posmične čvrstoće uslijed djelovanja potresa događa se likvefakcija tla [3].



Slika 2. :Likvefakcija kod nasipa (Izvor: [4])

Prema Roje-Bonacci [5] pojava likvefakcije se događa u rahlim vodom zasićenim pijescima uskog granulometrijskog sastava, a pomaci u tlu izazvani su cikličkom promjenom stanja naprezanja uzrokovano potresom. Prema tome da bi se to spriječilo potrebno je povećati zapreminu, odnosno dodatno premjestiti čestice u gušću strukturu kako bi se spriječila likvefakcija. Roje-Bonacci navodi da je utvrđena donja granica indeksa zbijenosti kod koje se neće javiti likvefakcija a ona iznosi 75%.



Slika 3.:Učinak likvefakcije na nasip (Izvor: [5])

Prema Martinec [6] neke od načina prevencije likvefakcije su:

- Vibroflotacija
- Dinamička kompakcija
- Stabilizacija dubokih slojeva tla dodacima
- Zbijanje i zamjena tla
- Izvedba drenova
- Ugradnja šljunčanih stupova.

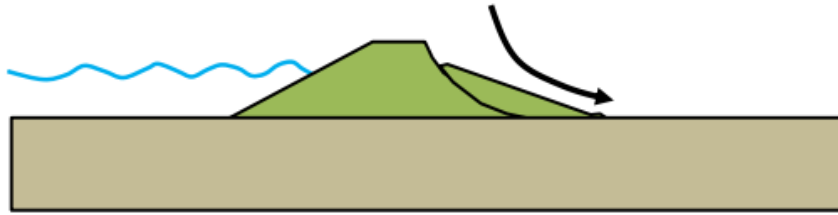
Autorica navodi da je za hidrotehničke nasipe najbolja metoda vibroflotacije, jer omogućuje ojačanje nasipa nastalih refuliranjem pijeska.

2.1.2. Ostali mehanizmi prekoračenja graničnih stanja nasipa

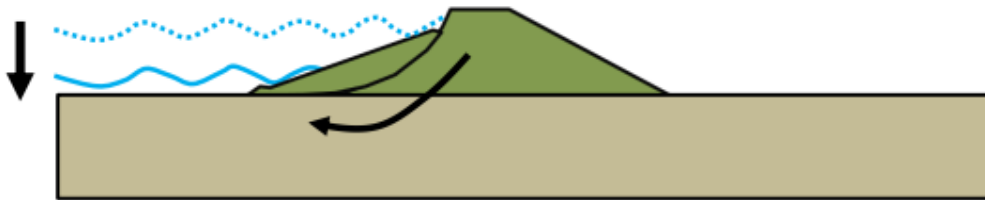
Osim same likvefakcije postoje još načina uzrokovanja nestabilnosti nasipa na koja treba obratiti pažnju;

- a) Plitke klizne plohe

Na slici je prikazana klizna ploha na nizvodnoj strani koja se javlja tijekom vremena zbog gubitka posmične čvrstoće, u pravilu događa kod visokih voda, sa druge strane također je prikazano klizanje na uzvodnoj strani koje se događa zbog zaostajanja vode u tijelu nasipa što uzrokuje smanjenje posmične čvrstoće i uzrokuje nestabilnost [4].



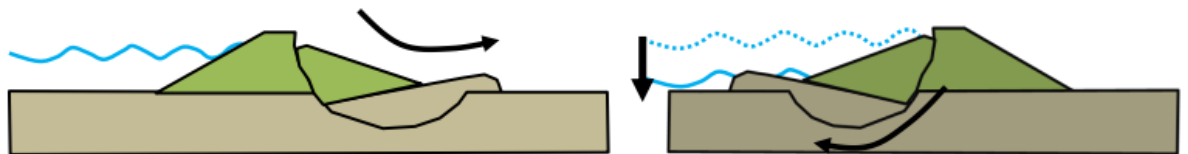
Slika 4.:Plitka klizna ploha nizvodna strana (Izvor: [4])



Slika 5.:Plitka klizna ploha uzvodna strana (Izvor: [4])

b) Duboke klizne plohe

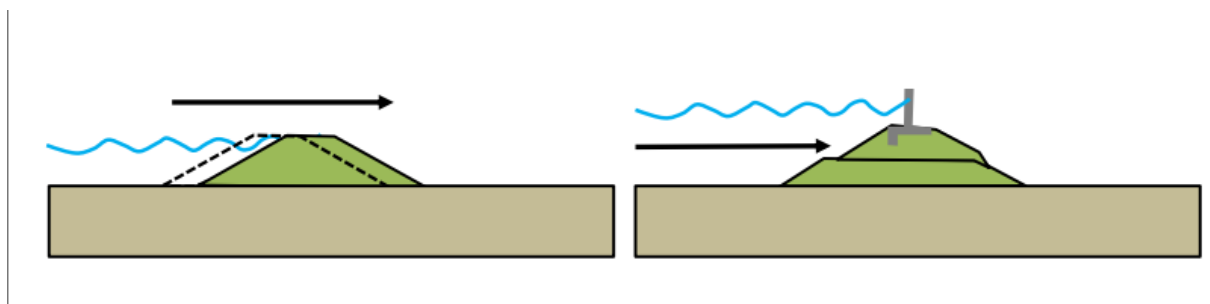
Najčešći uzroci pojave dubokih kliznih ploha su izdizanje terena ispred nasipa, pojave pukotina te naguravanje materijala na pokosu [4].



Slika 6.:Duboke klizne plohe (Izvor: [4])

c) Translacijsko gibanje nasipa

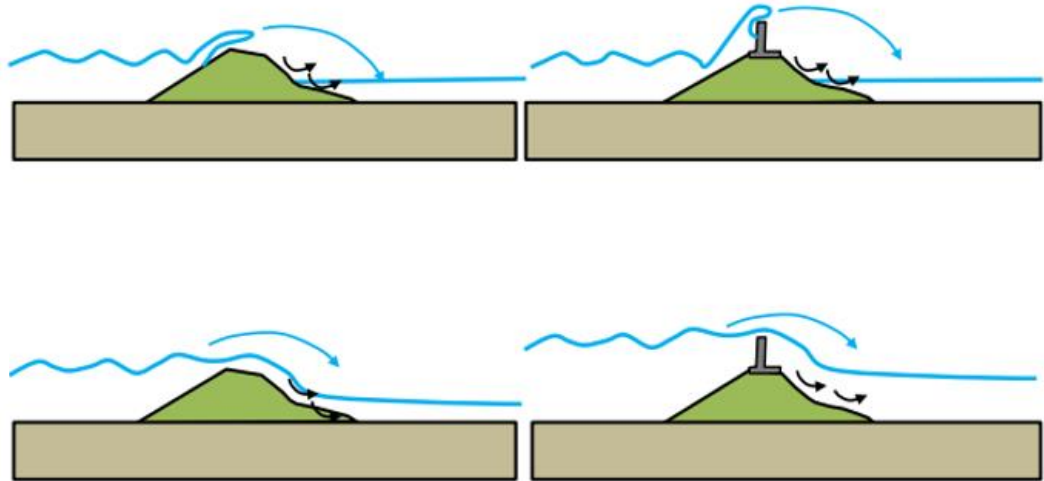
Zbog nedovoljno velike posmične čvrstoće koja se ne može oduprijeti hidrauličkim silama zbog visokih voda nastaje horizontalno blokovsko pomicanje nasipa [4].



Slika 7.:Translacijsko gibanje(Izvor: [4])

d) Prelijevanje preko nasipa

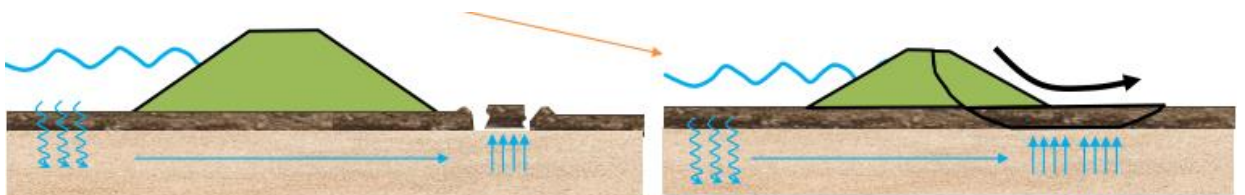
Trenutno prelijevanje (eng. Overtopping) i kontinuirano prelijevanje (eng. Overflow) preko nasipa mogu uzrokovati velika oštećenja na nizvodnom pokosu koja su vezana uz površinsku eroziju, a uzrok im može biti brzina strujanja i udarci od prevaljenog vala [4].



Slika 8.:Vanjska erozija-prelijevanje preko nasipa (Izvor: [4])

e) Nestabilnost temeljnog tla uzgonom

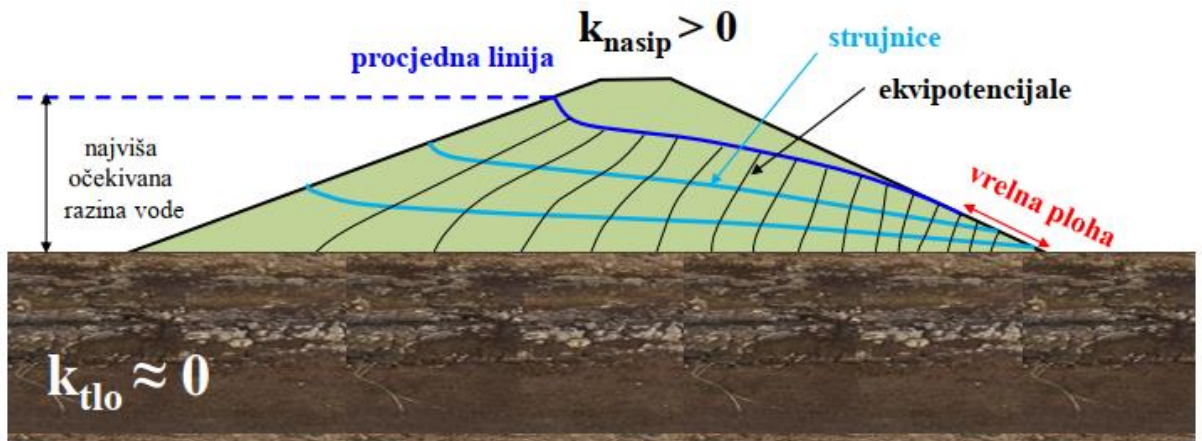
Zbog povećanja tlaka pora u propusnom sloju može se dogoditi izdizanje pokrovnog sloja. Procjeđivanjem vode kroz temeljno tlo dolazi do povećanja tlaka i pojave nestabilnosti pokosa [4].



Slika 9.:Nestabilnost temeljnog tla na uzgon (Izvor: [4])

f) Hidraulički slom-preveliki hidraulički gradijent

Izlazni hidraulički gradijenti se provjeravaju kod svakog nasipa, međutim postoji mogućnost nastanka vrelna plohe, na nasipu ili uz nasip . Na njoj je potrebno odrediti izlazni gradijent kako bi se provjerila mogućnost pojave hidrauličkog sloma a samim time i oštećenja nasipa [4].



Slika 10.-Hidraulički slom uslijed prevelikog gradijenta (Izvor: [4])

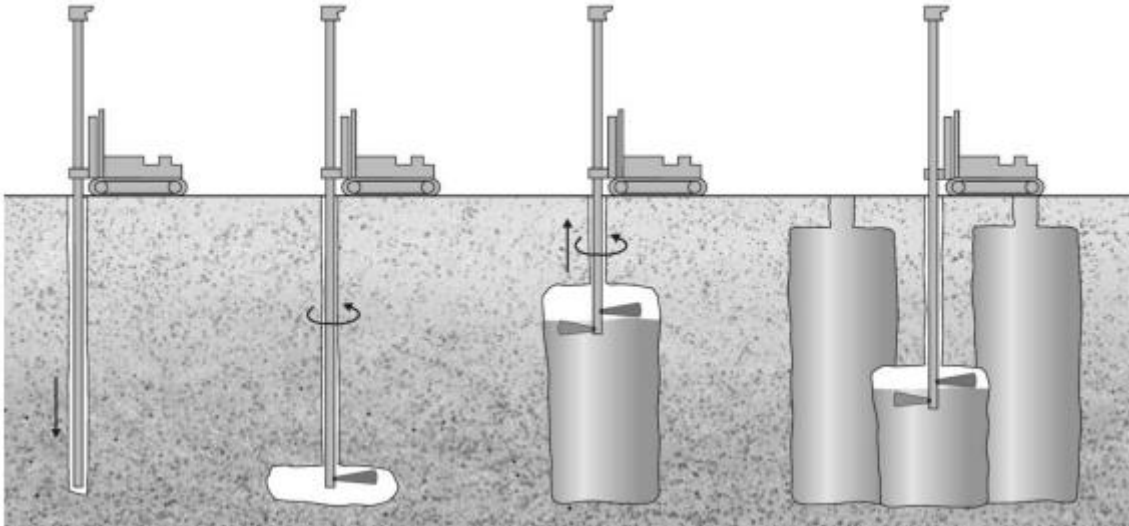
2.1.3. Metode sanacije nasipa i temeljnog tla

Različite su metode sanacije oštećenja nasipa i one ovise prvotno o veličini oštećenja i prihvatljivom načinu rekonstrukcije. Ukoliko se radi o slomu temeljnog tla ispod nasipa jedan od načina obnove je poboljšanje karakteristika tla. To se može postići mlaznim injektiranjem, ojačanjem šljunčanim stupnjacima, stupovima od cementa ili termičkom obradom [7].

Mlazno injektiranje je jedna od najpoznatijih metoda ojačanja tla u kojoj se jedan dio volumena tla pretvara u zemljani mort te se na taj način razbija struktura tla pomoću energetskog mlaza tekućine [8].

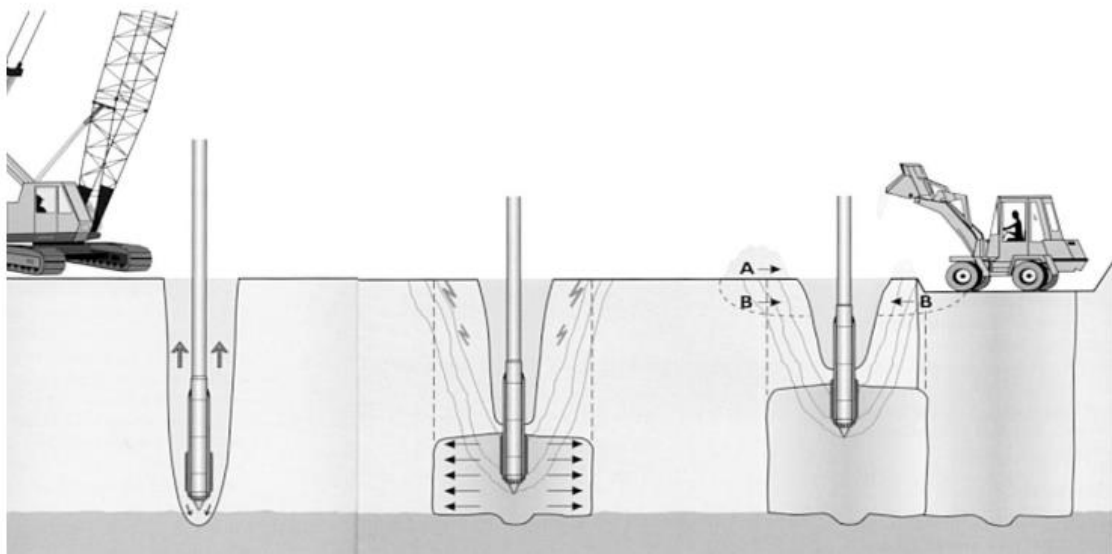
Kovačević [8] navodi da su četiri glavne faze izvođenja mlaznog injektiranja:

1. Bušenje,
2. Rezanje,
3. Injektiranje,
4. Proširenje.



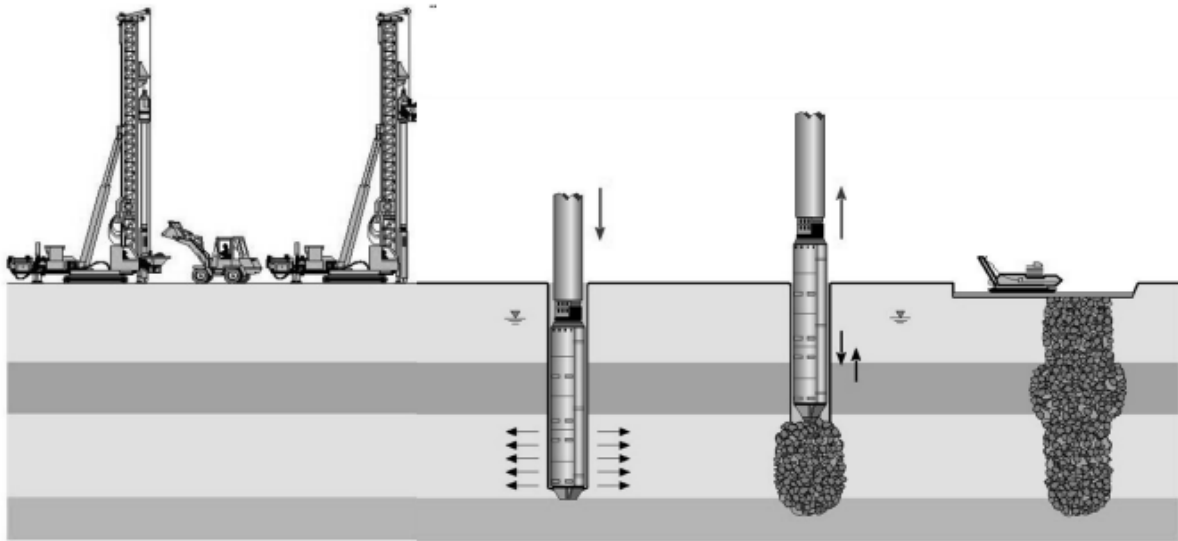
Slika 11. :Postupak izvođenja mlaznog injektiranja (Izvor: [8])

Vibracijsko zbijanje je također jedan od načina poboljšanja kvalitete temeljnog tla. To je postupak kojim se smanjuje volumen pora između tla, a time se povećava gustoća i krutost tla. Princip izvođenja je da se vibrator spušta na određenu dubinu, a nakon toga horizontalnim vibracijama zbijaju tlo. Postiže se relativna gustoća od 70–85% [9].



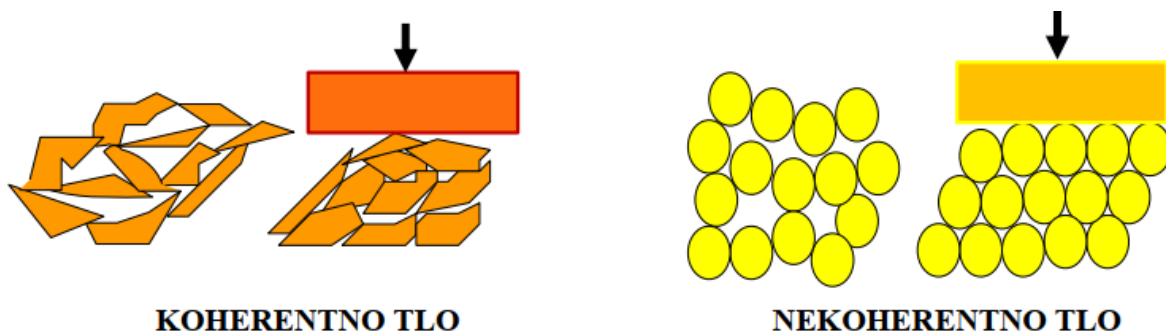
Slika 12.:Princip izvođenja vibracijskog zbijanja (Izvor: [9])

Jedna od metoda koje se koriste kod povećanja stabilnosti nasipa je metoda izvedbe stupova od kamena. Korištenjem teške vibracijske sonde tlo se razmiče i nakon toga se ubačeni kamen zbijaju u tlu [10].



Slika 13. :Princip izvođenja vibracijskog punjenja (Izvor: [10])

Ukoliko je došlo do oštećenja samog nasipa, jedna od metoda koja se može primijeniti je i zbijanje nasipa. Zbijanjem se odstranjuje zrak između pora u tlu. Zbijanje se vrši odgovarajućom mehanizacijom u slojevima. Tlo se zbjija zbog toga što prilikom prijevoza gubi svoju strukturu a samim time i svoja svojstva. Kod koherentnih tla smanjuje se razmak između čestica a kod nekoherentnih tla se povećava dodirna površina [4].



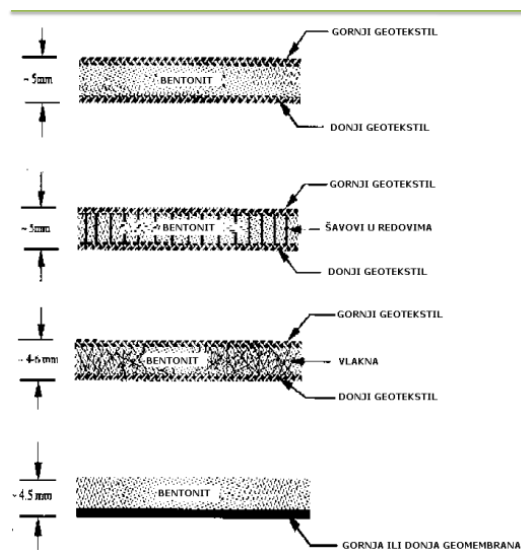
Slika 14. :Zbijanje čestica koherentnog i nekoherentnog tla (Izvor: [4])

Također je važno osigurati vodonepropusnost samog nasipa. To se rješava ugradnjom geosintetika ili nasipavanjem i zbijanjem dodatnog materijala. Geosintetici se odlikuju visokom otpornošću na kidanje i proboj, građeni su najčešće od polietilena, polivinil klorida i prolipropilena. Odlikuje ih koeficijenti propusnosti koji su manji od 10^{-13} m/s [4].



Slika 15.-:Postavljanje geomembrana (Izvor: [4])

Bentonitni tepisi su također materijal koji se koristi za smanjenje vodopropusnosti. Za razliku od geomembrana jeftiniji je i manje osjetljiv u eksploataciji. Koeficijenti propusnosti se kreće između 2×10^{-12} do 2×10^{-10} m/s [4].



Slika 16.:Bentonitni tepisi (Izvor: [4])

Oštećenje površine nasipa uzrokovano erozijom se osim geosinteticima može sanirati i zamjenom materijala ili sadnjom vegetacije, a ugradnja drenažnih sustava služi za sigurnu odvodnju kako bi pritisak na nasip bio što manji.

Geomreže su vrsta geosintetika čija je glavna zadaća armiranje i ojačanje slabog tla. Kad se ojačava temeljno tlo nasipa koristi se trodimenzionalni madrac od geomreža a primarna funkcija u tom slučaju je sprječavanje posmičnih deformacija tla. Razlikujemo geomreže koje su nosive u oba smjera i one koje su nosive u jednom smjeru [11].

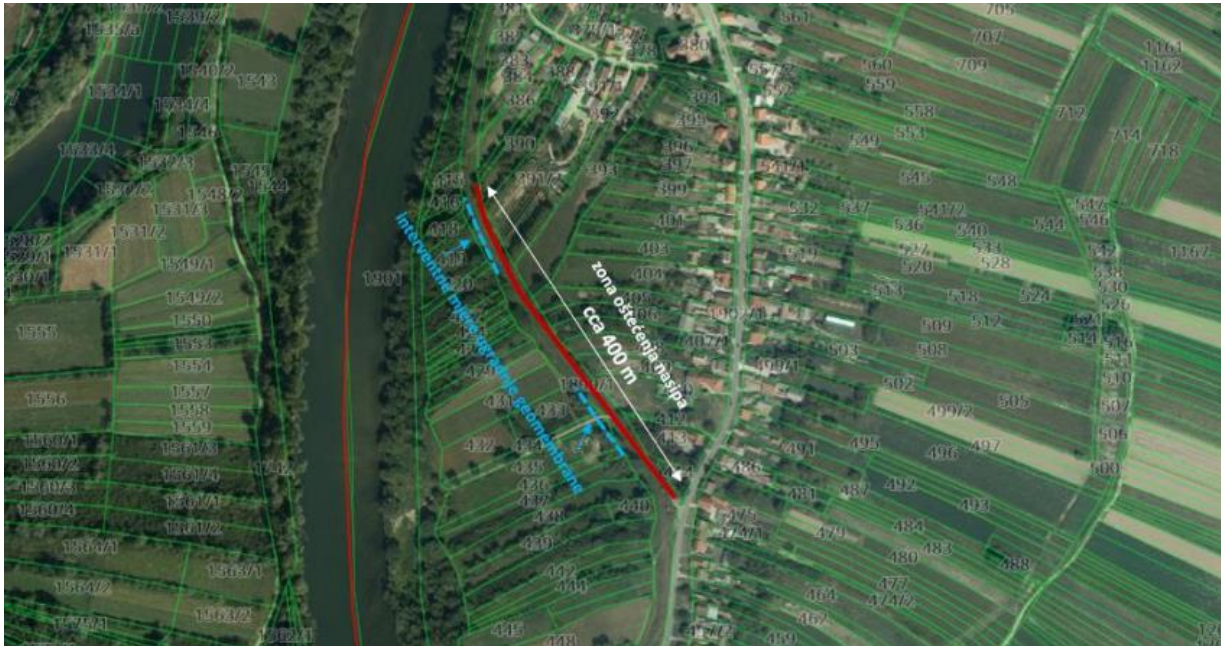


Slika 17.: Geomreže (Izvor: [11])

Unatoč postojanju različitih metoda sanacije nasipa, bilo da se radi o sanaciji temeljnog tla ispod nasipa ili osiguravanju vodonepropusnosti, za dugotrajnost nasipa je ključan monitoring i redovno održavanje, što uključuje redovan pregled nasipa, košenje pokosa koji mogu uzrokovat nestabilnost nakon nekog vremena kao i sprječavanje djelovanja biljnog i životinjskog utjecaja na nasip.

2.2. Predmetna lokacija i oštećenja

Potres koji je ošteti nasip Hrastelnica dogodio se 29.12.2020. godine sa epicentrom u Petrinji, jačine 6,4 prema Richteru. Na slici je locirana dionica za obnovu koja se proteže na nešto više od 400m, na lokaciji lijevo obalnog savskog nasipa od n.km. 106+200 do n.km.106+600. Utvrđen je detaljni pregled lokacije, ustanovljena su oštećenja, izvršena su terenska a nakon toga i laboratorijska istraživanja. Na pojedinim dijelovima nasipa jasno je uočena pojava likvefakcije kao jedan od uzroka oštećenja.



Slika 18.:Dionica za obnovu (Izvor: [12])

Zbog jasno vidljivih tragova likvefakcije na površini terena, terenska ispitivanja pokazuju visoku vjerojatnost pojave likvefakcije u pjeskovitim slojevima na dubinama od 8m do 15m ispod nožice nasipa, dok se na pojedinim dijelovima može očekivati vrh sloja pijeska do 4m ispod nožice nasipa [12].

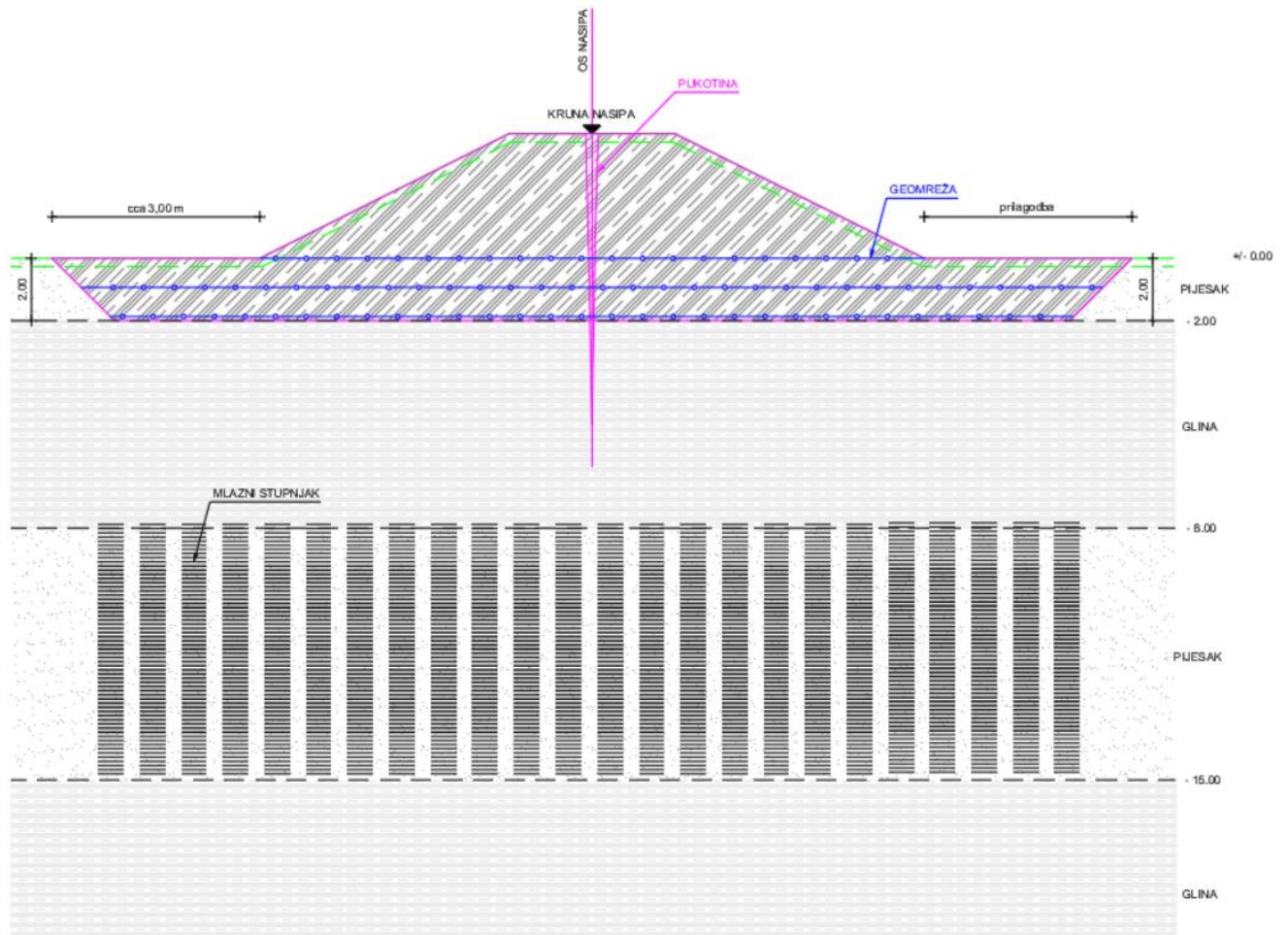


Slika 19.:Oštećenja nasipa (Izvor: [12])



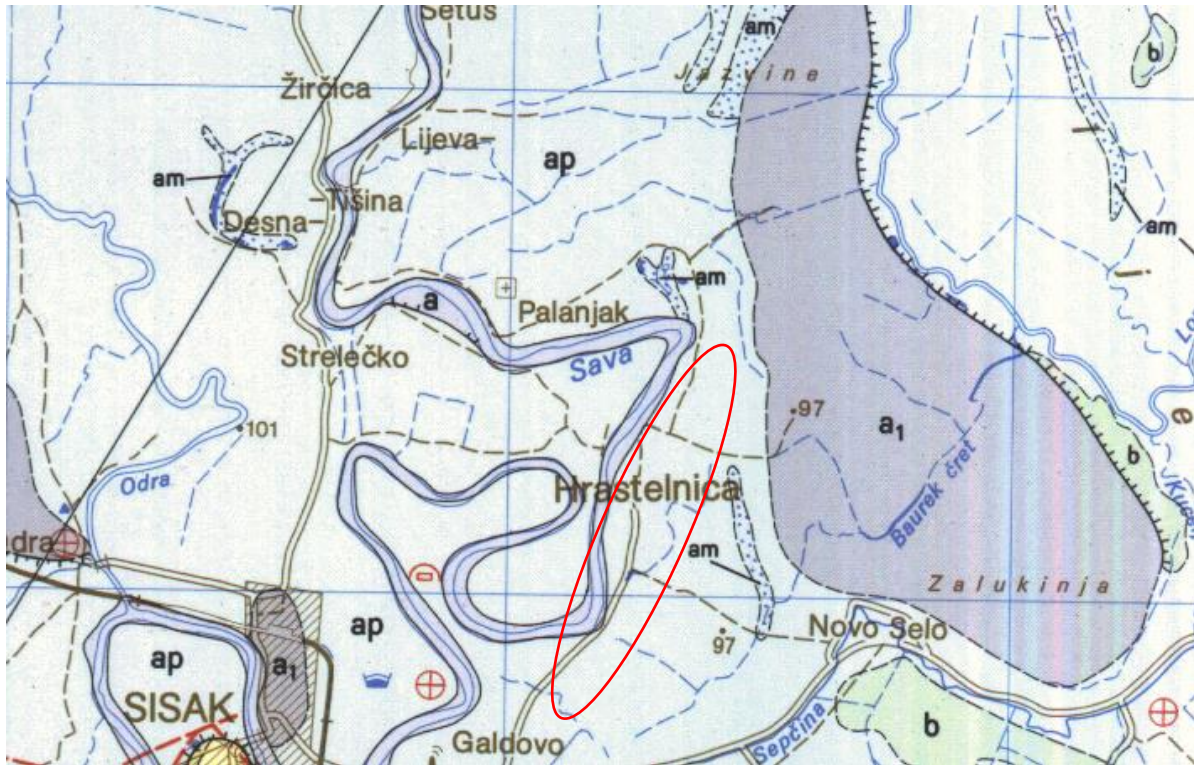
Slika 20.:Likvefakcijske pukotine (Izvor: [12])

Dvije su metode kojima će se pristupiti obnovi nasipa a to su poboljšanje temeljnog tla i sanacija nasipa. Poboljšanje temeljnog tla izvodit će se mlazno injektiranim stupnjacima prosječne duljine 7m dok će se rekonstrukcija samog nasipa izvoditi na način da će se ukloniti postojeći nasip, a materijal će se zbiti i pritom ukopati 2m u temeljno tlo te će se ojačati geomrežama [12].



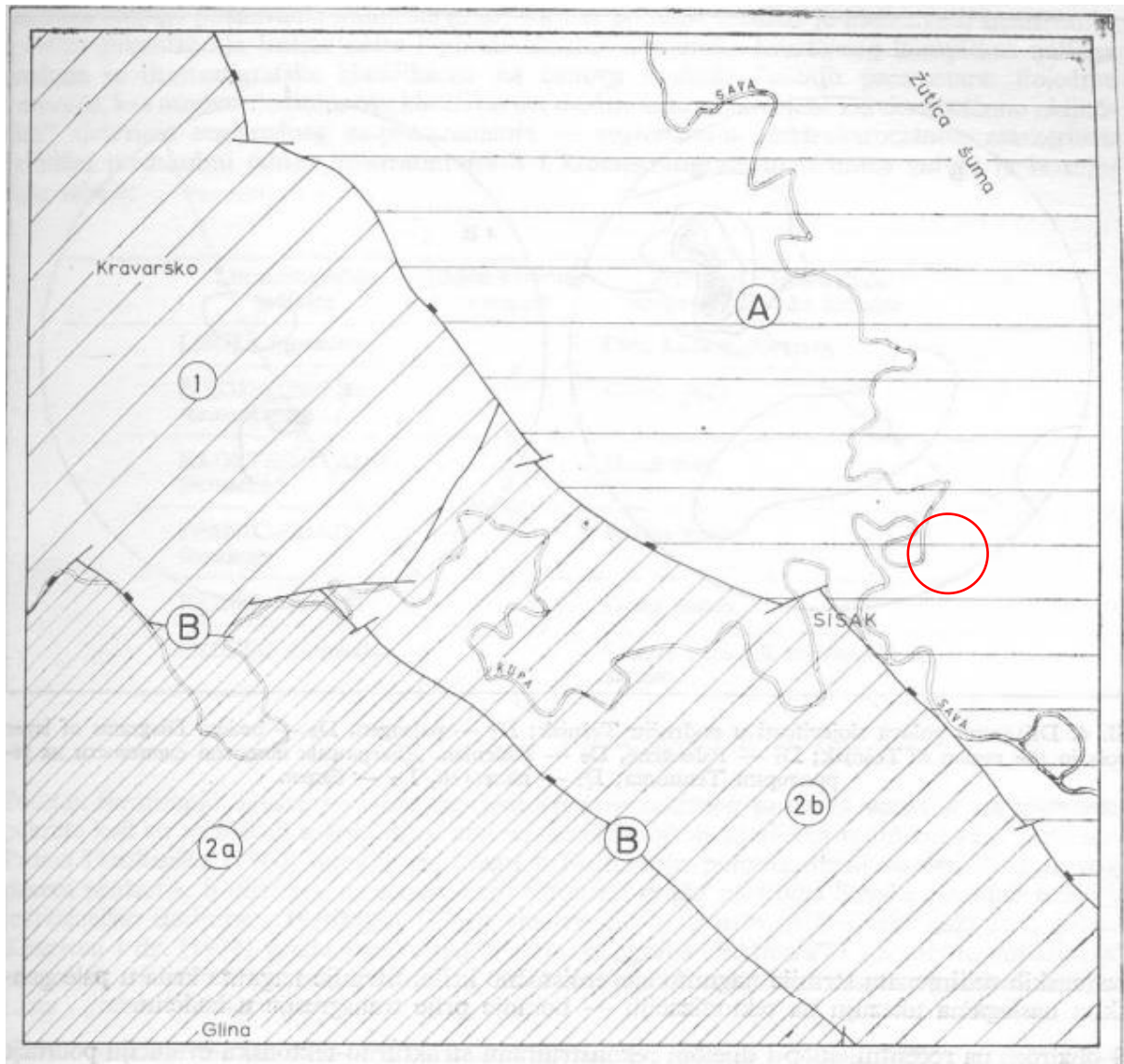
Slika 21.: Shematski prikaz sanacije (Izvor: [12])

Na slici je prikazan izvadak iz OGK Siska list 33-93. Elipsom crvene boje naznačena je lokacija na kojoj se nalazi nasip za obranu od poplave. Jasno se može vidjeti da je područje prekriveno sedimentima poplava (siltovi i pijesci) „ap“, koji su uglavnom rasprostranjeni u dolinama rijeka Lonje, Gline, Save i Kupe. Nakon svake poplave ostaju određeno talozi sitnozrnog materijala iz vodene suspenzije, ti talozi su najčešće glinoviti sedimenti i pjeskoviti siltovi, a u manjoj mjeri su zastupljeni sitnozrni pijesci. Sadržaj pijeska u siltu je manji od 20%, a primjesama gline se kreće između 5 i 12%. Debljina poplavnih sedimenata „ap“ iznosi maksimalno 5m, a varira od područja zbog različitih podloga sedimenata [13].



Slika 22.:OGK Siska (Izvor: [13])

Na sljedećoj slici je prikazana tektonska karta područja Siska i okolice, a kružnicom crvene boje označena je lokacija Hrastelnice gdje se nalazi nasip. Lokacija se nalazi u području „A” koje označava tektonsku jedinicu „Savska potolina”. To je jedna od najvećih tektonskih jedinica koje obuhvaćaju Sisačko područje. Granicu sa tektonskom jedinicom kredno-tercijarni pojas predstavlja rasjed čiji se smjer većim dijelom poklapa s rubnim terasnim dijelom doline Save. Navedena granica se smatra uvjetnom jer je rezultat mlađih tektonskih potresa pa su moguće promjene uslijed pojačane tektonske aktivnosti. Rezultat mobilnosti granice tijekom neotektonske etape je tektonska zona naziva „južni potolinski rasjed” [13].



Slika 23.: Tektonika predmetnog područja (Izvor: [13])

3. RAZRADA PODLOGA I ODABIR RELEVANTNIH PARAMETARA

Prema geotehničkom elaboratu [14] provedena su terenska i laboratorijska ispitivanja koje između ostalog uključuju:

1. Geotehnička istražna bušenja sa kontinuiranim jezgrovanjem, SPT testom i uzimanjem uzorka
2. Ispitivanja statičkom penetracijskom sondom s mjerenjem pornog tlaka
3. Laboratorijska ispitivanja
4. Geofizička ispitivanja:
 - Seizmička refrakcija
 - Multikanalna analiza površinskih valova
 - Geoelektrična tomografija

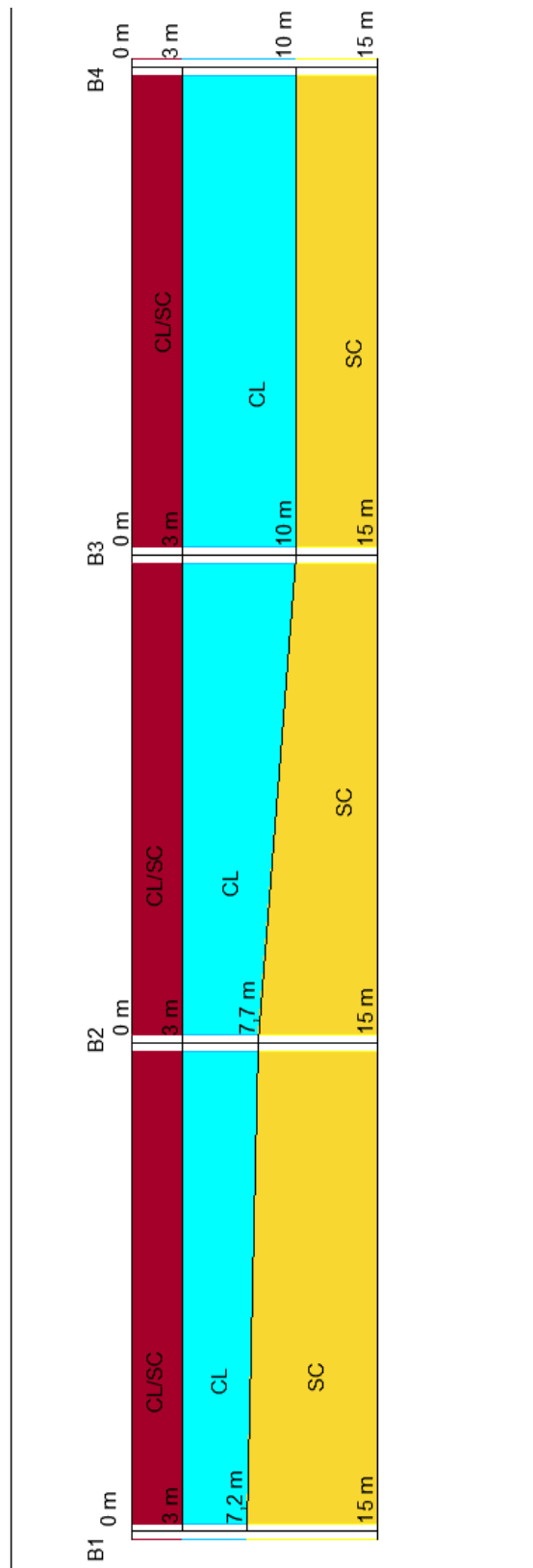
Na samom nasipu napravljene su četiri istražne bušotine na različitim lokacijama.

Tablica 1.: Podaci o bušotinama (Izvor: [14])

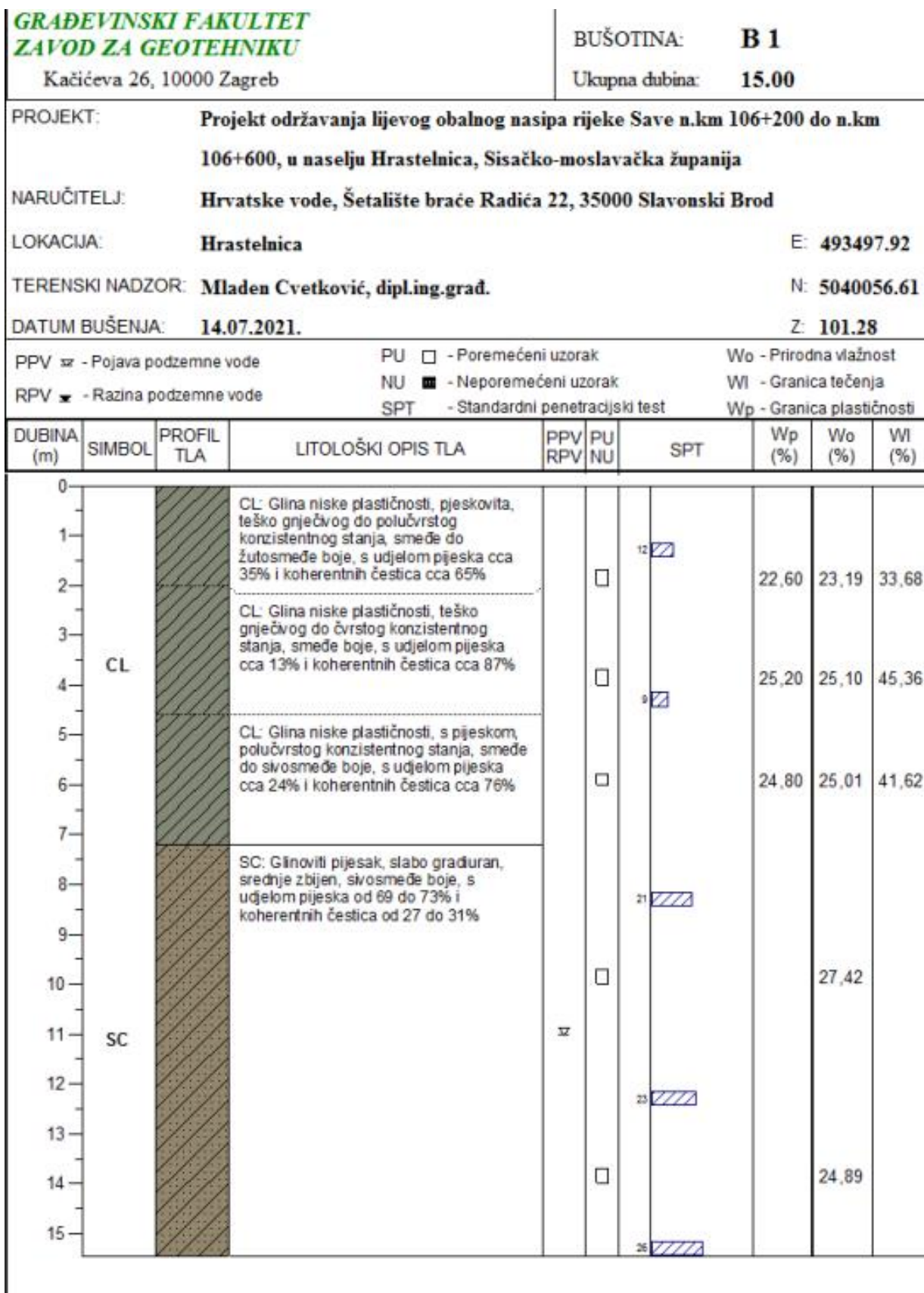
Oznaka bušotine	E	N	Z	Dubina ispitivanja (m)
B1	493497,92	5040056,61	101,28	15,0
B2	493455,20	5040106,78	101,21	15,0
B3	493411,72	5040171,18	101,25	15,0
B4	493377,83	5040230,74	101,35	15,0

Tablica 2.: Podaci o poziciji CPT ispitivanju (Izvor: [14])








Oznaka bušotine	E	N	Z	Dubina ispitivanja (m)
CPT1	4933528,95	5040015,85	101,73	16,36
CPT2	493468,13	5040090,66	101,22	14,16
CPT3	493427,98	5040145,77	101,21	13,02
CPT4	493389,29	5040210,66	101,33	11,18



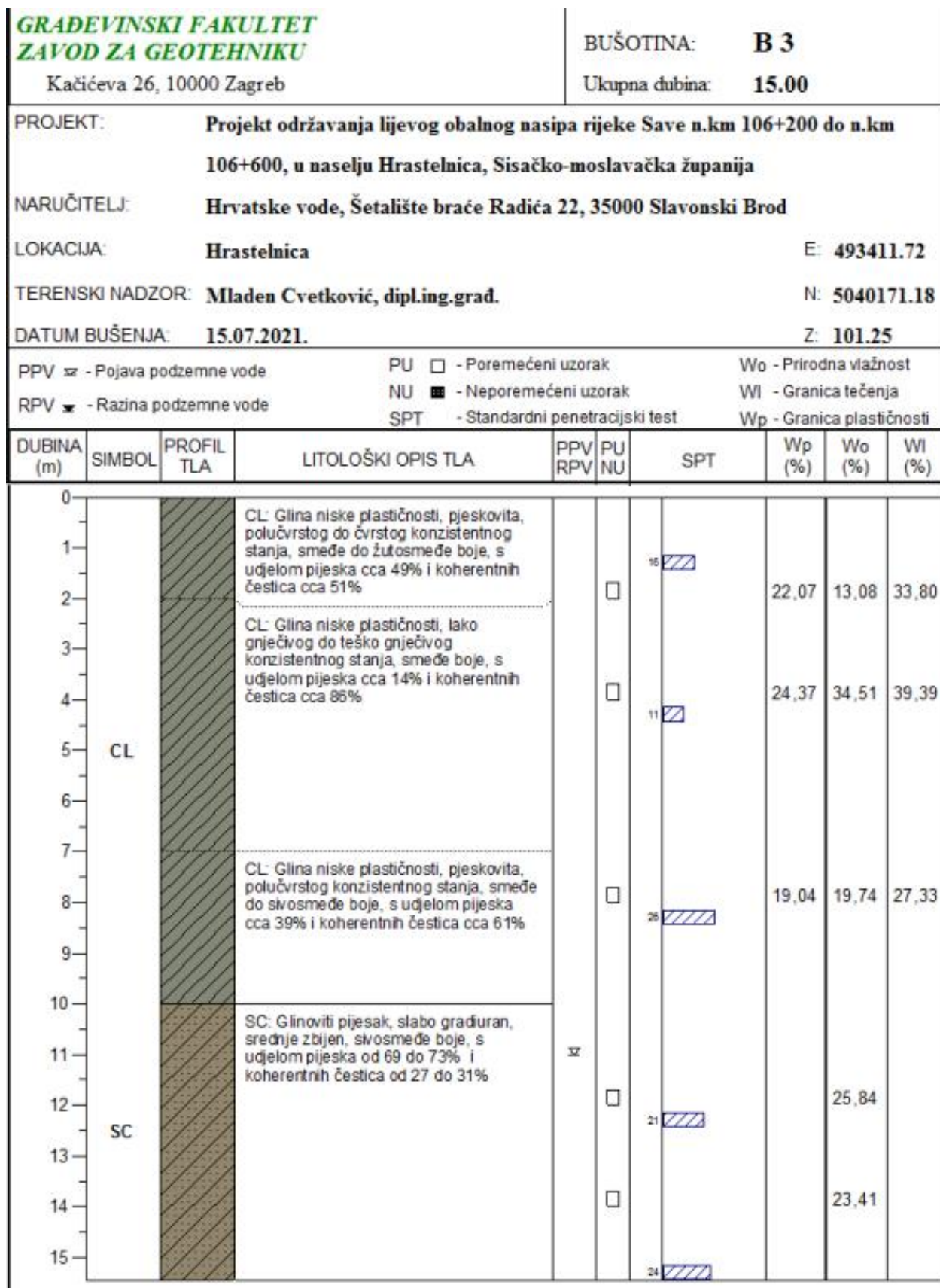
Slika 24. :Inženjersko-geološki profil duž nasipa



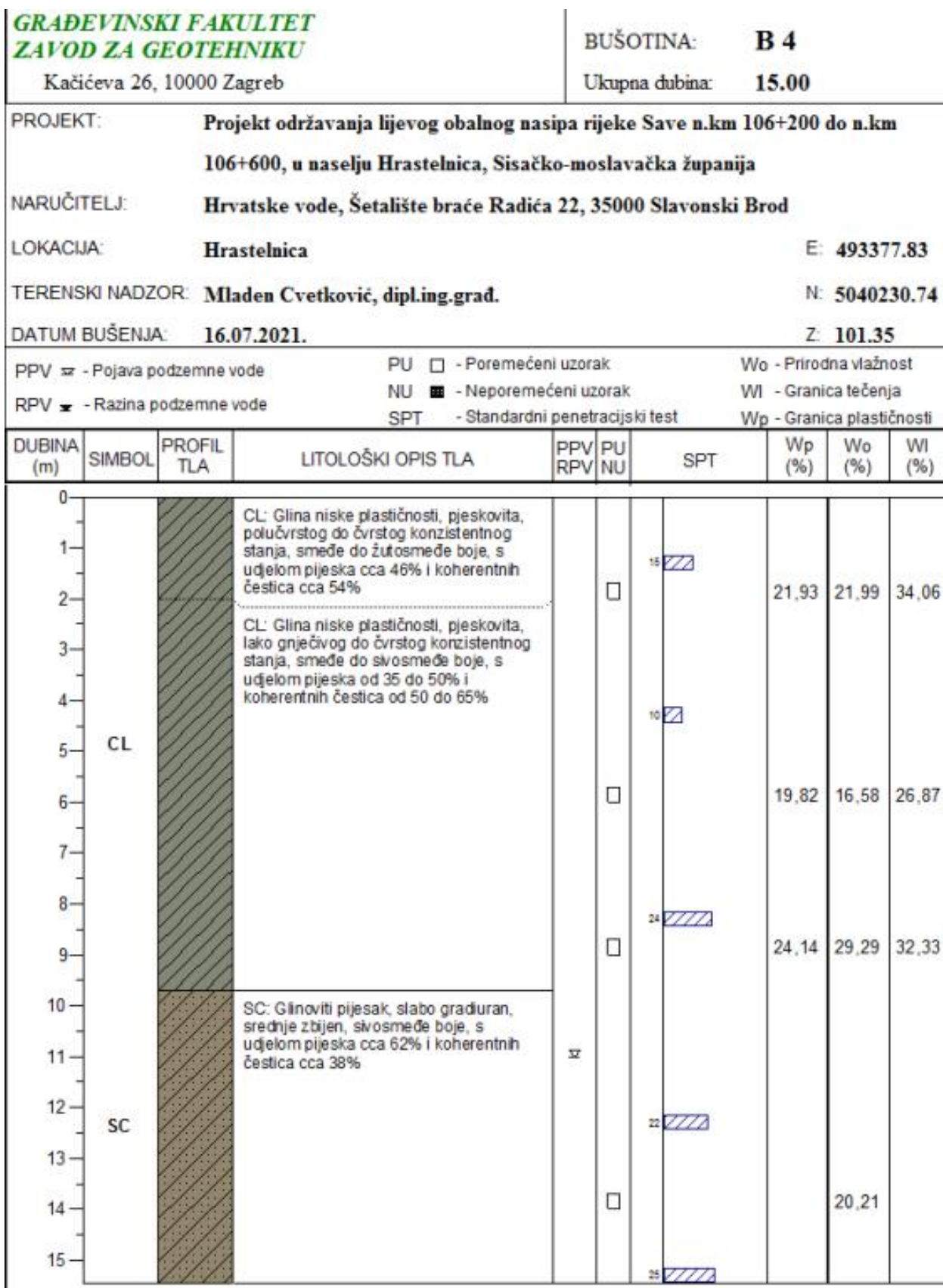
Slika 25.: Profil bušotine B-1 (Izvor: [14])

GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAVOD ZA GEOTEHNIKU Kačićeva 26, 10000 Zagreb			BUŠOTINA: B 2 Ukupna dubina: 15.00							
PROJEKT:		Projekt održavanja lijevog obalnog nasipa rijeke Save n.km 106+200 do n.km 106+600, u naselju Hrastelnica, Sisačko-moslavačka županija								
NARUČITELJ:		Hrvatske vode, Šetalište braće Radića 22, 35000 Slavonski Brod								
LOKACIJA:		Hrastelnica							E: 493455.20	
TERENSKI NADZOR:		Mladen Cvetković, dipl.ing.građ.							N: 5040106.78	
DATUM BUŠENJA:		26.07.2021.							Z: 101.21	
PPV \approx - Pojava podzemne vode			PU \square - Poremećeni uzorak			Wo - Prirodna vlažnost				
RPV \approx - Razina podzemne vode			NU \blacksquare - Neporemećeni uzorak			Wl - Granica tečenja				
			SPT - Standardni penetracijski test			Wp - Granica plastičnosti				
DUBINA (m)	SIMBOL	PROFIL TLA	LITOLOŠKI OPIS TLA	PPV RPV	PU NU	SPT	Wp (%)	Wo (%)	Wl (%)	
0										
1	CL		CL: Glina niske plastičnosti, pjeskovita, teško gnječivog do čvrstog konzistentnog stanja, smeđe boje, s udjelom pijeska cca 39% i koherentnih čestica cca 61%			10 	22,58	22,16	34,36	
2				\square						
3										
4					11 					
5	CH		CH: Glina visoke plastičnosti, s pijeskom, teško gnječivog konzistentnog stanja, smeđe do sivosmeđe boje, s udjelom pijeska cca 24% i koherentnih čestica cca 76%				27,93	28,89	50,78	
6				\square						
7										
8	SC		SC: Glinoviti pjesak, dobro do slabo gradiuran, srednje zbijen, sivosmeđe boje, s udjelom pijeska od 55 do 83% i koherentnih čestica od 17 do 45%			21 	20,86	28,91		
9				\square						
10				\square						
11										
12										
13					26 	19,22				
14										
15			18,60							

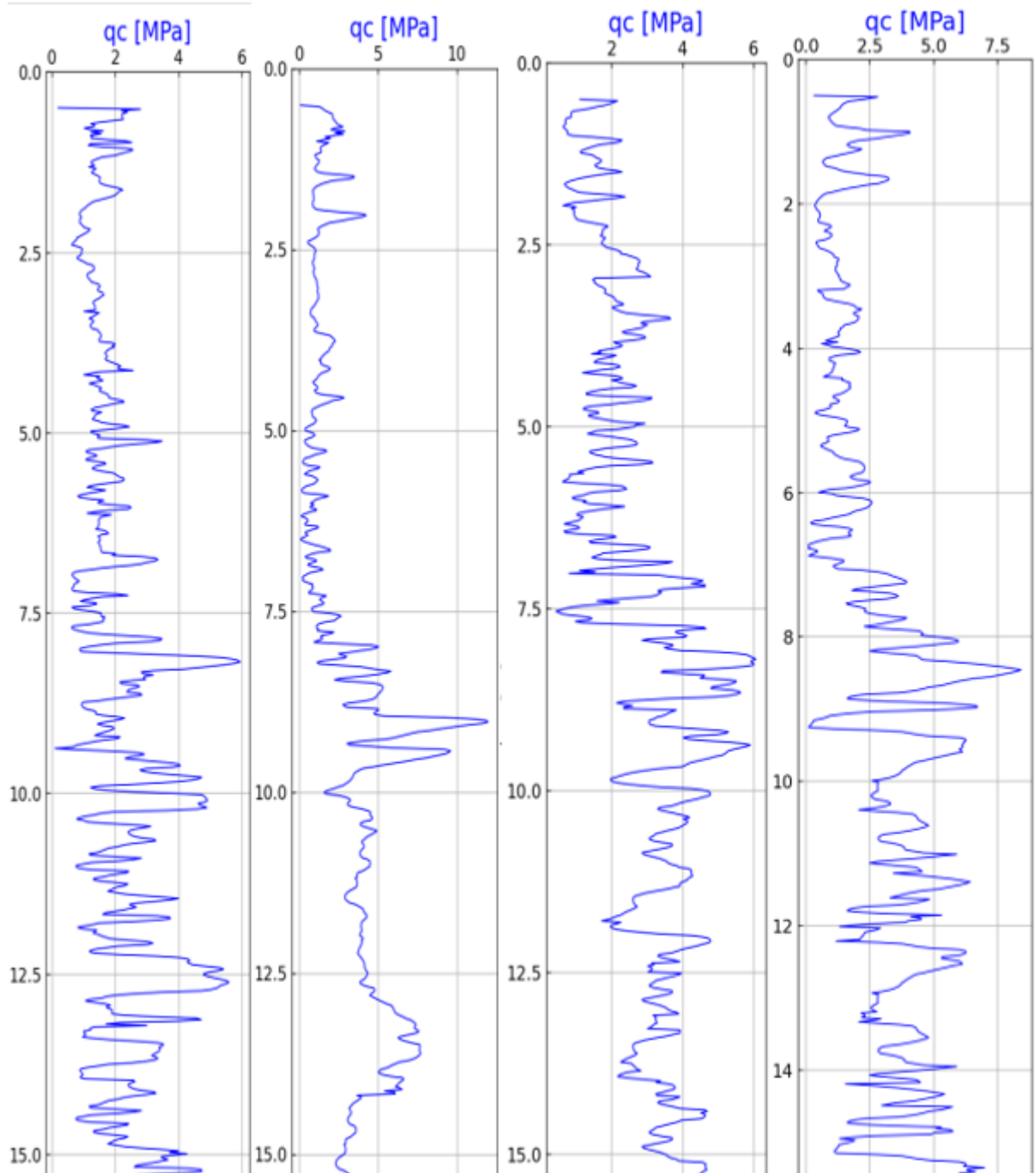
Slika 26.: Profil bušotine B-2 (Izvor: [14])



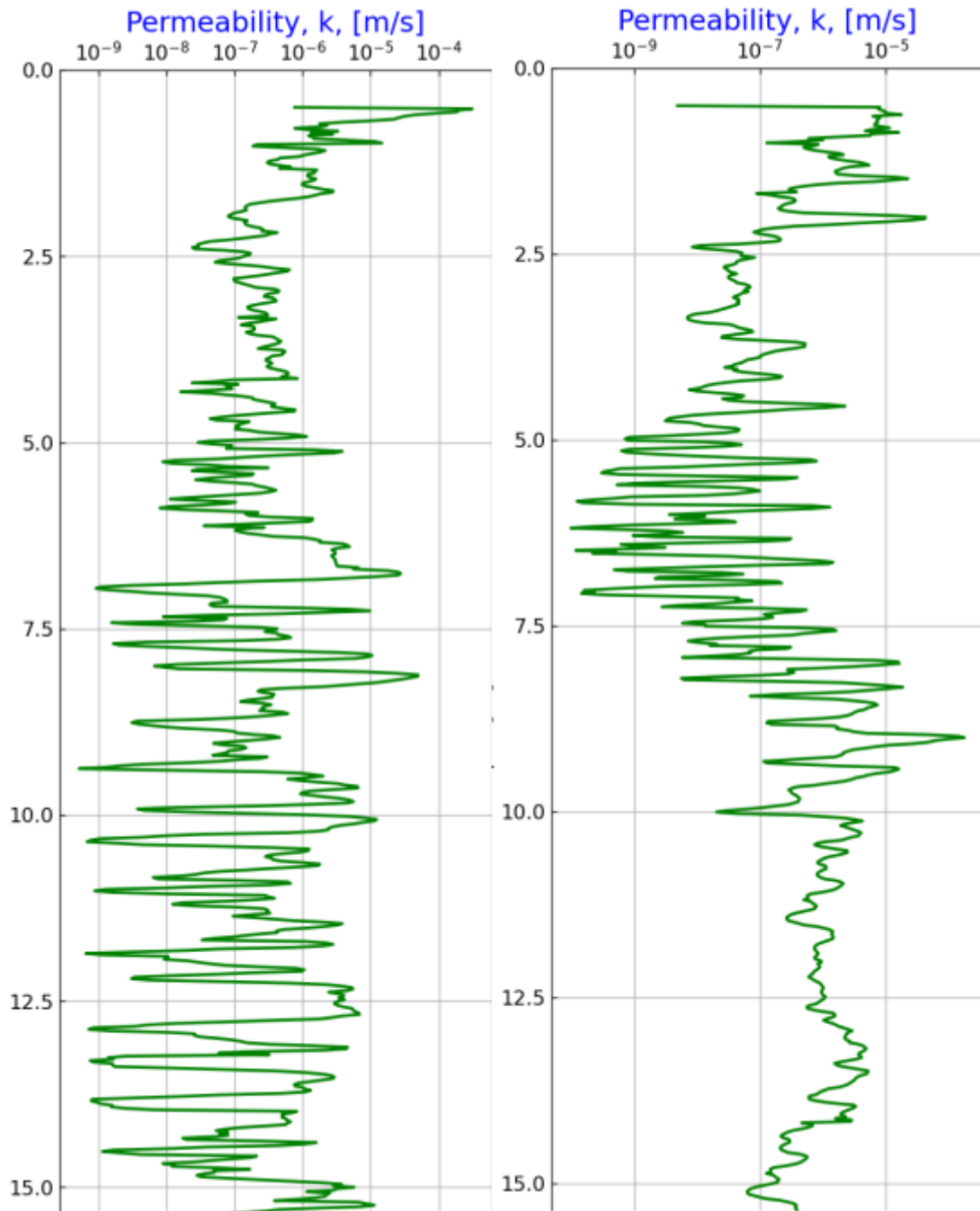
Slika 27.: Profil bušotine B-3 (Izvor: [14])



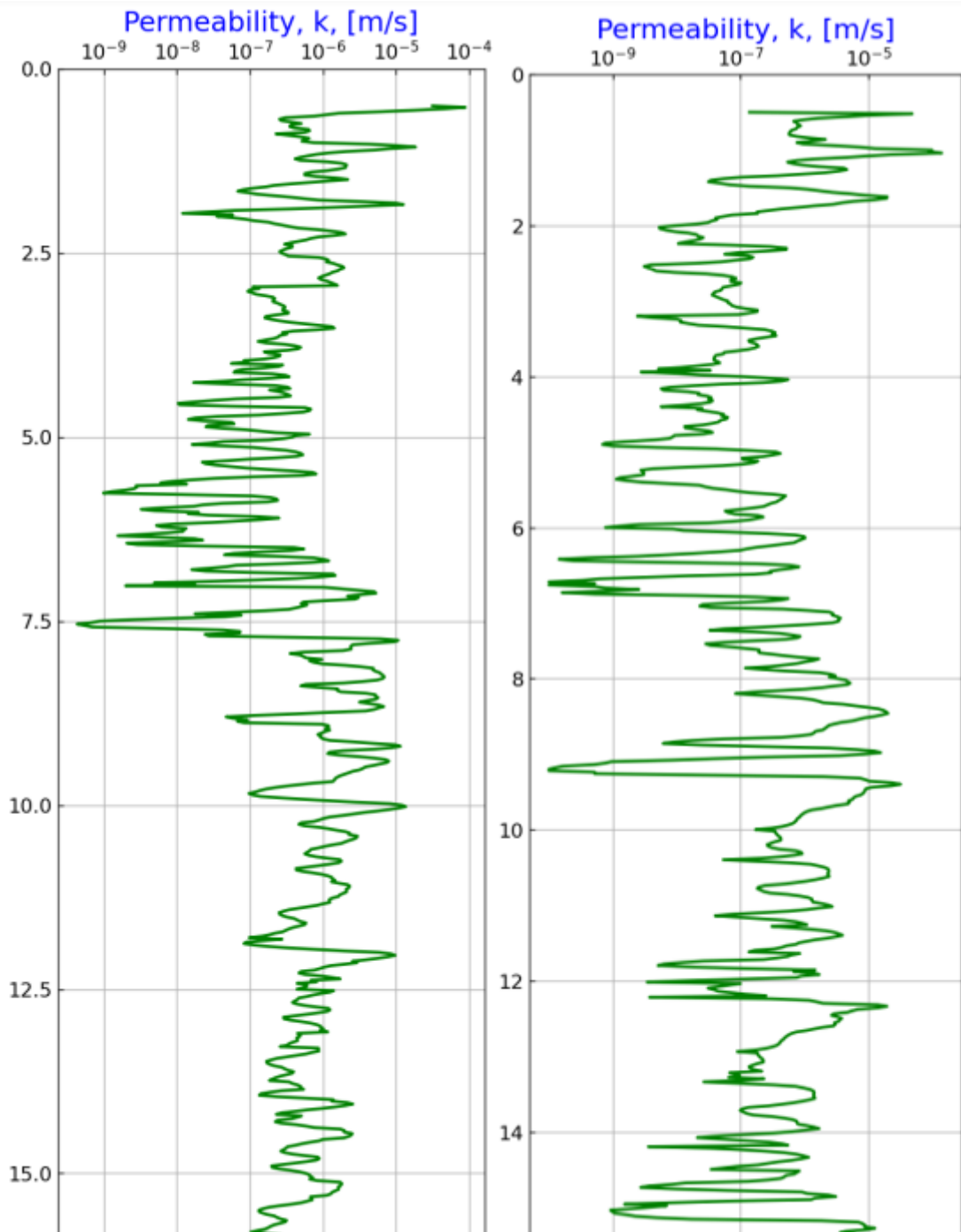
Slika 28.: Profil bušotine B-4 (Izvor: [14])



Slika 29. :Rezultati q_c iz CPT pokusa za bušotine B-1, B-2, B-3, B-4 (Izvor: [14])



Slika 30. :Koeffcijent propusnosti za bušotine B-1 i B-2 (Izvor: [14])



Slika 31.: Koeficijent propusnosti za bušotine B-3 i B-4 (Izvor: [14])

3.1. Geotehnička sredina 1-sloj nasipa (CL/SC)

3.1.1. Rezultati za bušotinu B-1

Zapreminska težina

$$\gamma = 18,5 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 7 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ kPa}$$

Kut unutarnjeg trenja

Procjena prema indeksu plastičnosti [16].

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(I_p)$$

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(11) = 35,07^\circ$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(35,07^\circ) \cdot 0,95 = 33,7^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1600 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

$$\sigma'_v = 55 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

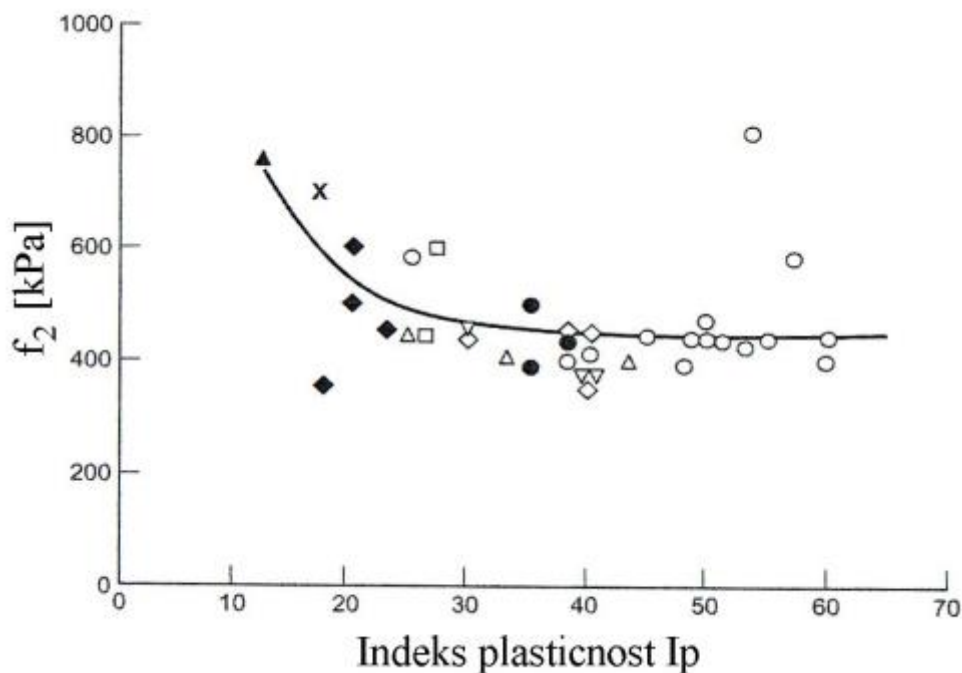
$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 77,4 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 77,4 \cdot 0,85 = 65,7 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Broj udaraca, $N=12$ [14]

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 27 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini pokusa

Prema Claytonu, C.R.I. (1995), očitano sa grafa na sljedećoj slici [15].



Slika 32.:Dijagram ovisnosti indeksa plastičnosti i koeficijenta f_2 (Izvor: [15])

$$I_p = 11\% \rightarrow f_2 = 800 \text{ kPa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

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

$$(N_1)_{60} = 12 \cdot \sqrt{\frac{96}{27}} = 23$$

Modul elastičnosti se određuje prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 800 \cdot 23 = 18400 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 18400 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 24769,23 \text{ kPa}$$

3.1.2. Rezultati za bušotinu B-2

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kut unutarnjeg trenja

Procjena prema indeksu plastičnosti [16]:

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(I_p)$$

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(12) = 34,5^\circ$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34,5^\circ) \cdot 0,95 = 33,1^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 2000 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

$$\sigma'_v = 57 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 97,5 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 97,5 \cdot 0,85 = 82,9 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Broj udaraca, $N=10$ [14]

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 19 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini provođenja pokusa

Prema Claytonu [15]:

$$I_p = 12\% \rightarrow f_2 = 800 \text{ kPa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma_v}}$$

$$(N_1)_{60} = 10 \cdot \sqrt{\frac{96}{19}} = 22$$

Modul elastičnosti se određuje prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 800 \cdot 22 = 17600 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 17600 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 23692 \text{ kPa}$$

3.1.3. Rezultati za bušotinu B-3

Zapreminska težina

$$\gamma = 18,5 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 7 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ kPa}$$

Kut unutarnjeg trenja

Procjena prema indeksu plastičnosti [16]:

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(I_p)$$

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(15) = 33,1^\circ$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(33,1^\circ) \cdot 0,95 = 31,77^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1950 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

$$\sigma'_v = 55 \text{ kPa}$$

$$N_k = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_k} = 94,8 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 94,8 \cdot 0,85 = 80,6 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Broj udaraca, $N=16$ [14]

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 18,5 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini provođenja pokusa

Prema Claytonu [15]:

$$I_p = 15\% \rightarrow f_2 = 620 \text{ kPa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

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

$$(N_1)_{60} = 16 \cdot \sqrt{\frac{96}{18,5}} = 36$$

Modul elastičnosti se određuje prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 620 \cdot 36 = 22320 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 22320 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 30046,2 \text{ kPa}$$

3.1.4. Rezultati za bušotinu B4

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 6 \text{ kPa}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 6 \cdot 0,8 = 4,8 \text{ kPa}$$

Kut unutarnjeg trenja

Procjena prema indeksu plastičnosti [16]:

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(I_p)$$

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(12) = 34,5^\circ$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34,5^\circ) \cdot 0,95 = 33,1^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1200 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

$$\sigma'_v = 57 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 57,2 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 57,2 \cdot 0,85 = 48,62 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

$$N = 15 \text{ [14]}$$

Efektivno naprežanje $\sigma'_v = 19 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini provođenja pokusa

Prema Claytonu [15]:

$$I_p = 12\% \rightarrow f_2 = 800 \text{ kPa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

$$(N_1)_{60} = N \cdot \sqrt{\frac{96}{\sigma_v}}$$

$$(N_1)_{60} = 15 \cdot \sqrt{\frac{96}{19}} = 34$$

Modul elastičnosti se određuje prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 800 \cdot 34 = 27200 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 27200 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 36615,4 \text{ kPa}$$

Koeficijent propusnosti na temelju procjene rezultata iz CPT [14].

$$k = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Na temelju srednjih vrijednosti iz svake bušotine dobiven je rezultat karakterističnih vrijednosti parametara za sloj nasipa od 0 do 3m.

Tablica 3.: Karakteristične vrijednosti sloja nasipa (CL/SC)

$\gamma (\text{kN} / \text{m}^3)$	$C_k (\text{kPa})$	Φ'_k	$C_{u,k} (\text{kPa})$	$M_v (\text{kPa})$	$E' (\text{kPa})$
18,8	5,3	32,9	69,5	28780,7	21380

3.2. Geotehnička sredina 2-sloj niskoplastične gline (CL)

3.2.1. Rezultati za bušotinu B1

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 7 \text{ kPa}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ kPa} \rightarrow \text{Na dubini 7m}$$

Kut unutarnjeg trenja:

$$\Phi' = 28^\circ [14]$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(28^\circ) \cdot 0,95 = 26,8^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1230 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini 7m [14]}$$

$$\sigma'_v = 134,8 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 54,8 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 54,8 \cdot 0,85 = 46,58 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Prema Claytonu, C.R.I. [15]:

$$I_p = 19\% \rightarrow f_2 = 590 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = 74 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

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

$$(N_1)_{60} = 9 \cdot \sqrt{\frac{96}{74}} = 10$$

Modul elastičnosti se određuje prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 590 \cdot 10 = 5900 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 5900 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 7942,3 \text{ kPa}$$

3.2.2. Rezultati za bušotinu B-2

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Procjena kuta unutarnjeg trenja prema indeksu plastičnosti [16]:

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(I_p)$$

$$\sin(\Phi') = 0,8 - 0,094 \ln(23) = 30,3^\circ$$

Izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$\Phi'_k = \tan(30,3^\circ) \cdot 0,95 = 29^\circ \text{ [15]}$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1060 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini } 7.7 \text{ m [14]}$$

$$\sigma'_v = 146,3 \text{ kPa}$$

$$N_k = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_k} = 45,7 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 45,7 \cdot 0,85 = 38,85 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Prema Claytonu, C.R.I. [15].

$$I_p = 23\% \rightarrow f_2 = 500 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = 76 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

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

$$(N_1)_{60} = 11 \cdot \sqrt{\frac{96}{76}} = 12$$

Modul elastičnosti prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 500 \cdot 12 = 6000 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 6000 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 8076,9 \text{ kPa}$$

3.2.3. Rezultati za bušotinu B-3

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN / m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 7 \text{ kPa}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 7 \cdot 0,8 = 5,6 \text{ kPa}$$

Kut unutarnjeg trenja

$$\Phi' = \frac{27^\circ + 29^\circ}{2} = 28^\circ \rightarrow \text{rezultati laboratorija [14]}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]

$$\Phi'_k = \tan(28^\circ) \cdot 0,95 = 26,8^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 1980 \text{ kPa [14]}$$

$$\sigma'_v = 188 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 89,6 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 89,6 \cdot 0,85 = 76,16 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

Prema Claytonu, C.R.I. [15].

$$I_p = 15\% \rightarrow f_2 = 620 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_v = 74 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Izraz za određivanje $(N_1)_{60}$ [16]:

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

$$(N_1)_{60} = 11 \cdot \sqrt{\frac{96}{74}} = 13$$

Modul elastičnosti prema izrazu [15]:

$$E = f_2 \cdot (N_1)_{60} = 620 \cdot 13 = 8060 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 8060 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 10850 \text{ kPa}$$

3.2.4. Rezultati za bušotinu B-4

Zapreminska težina

$$\gamma = 19 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kohezija

$$C = 6 \text{ kPa}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$C_k = 6 \cdot 0,8 = 4,8 \text{ kPa}$$

Kut unutarnjeg trenja

$$\Phi' = 29^\circ \rightarrow \text{laboratorijski rezultat [14]}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(29^\circ) \cdot 0,95 = 27,8^\circ$$

Nedrenirana čvrstoća

$$q_c = 2050 \text{ kPa} \text{ [14]}$$

$$\sigma'_v = 184,3 \text{ kPa}$$

$$N_K = 20$$

Formula prema Weltmanu i Headu [17], te izraz za određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma'_v}{N_K} = 93,3 \text{ kPa} \rightarrow C_{u,k} = 93,3 \cdot 0,85 = 79,3 \text{ kPa}$$

Modul elastičnosti

$$E = 7400 \text{ kPa} \rightarrow \text{procjena}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 7400 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 9961 \text{ kPa}$$

Koeficijent propusnosti procijenjen na temelju rezultata iz CPT-a [14]:

$$k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

Tablica 4.: Karakteristične vrijednosti sloja gline (CL)

$\gamma (\text{kN} / \text{m}^3)$	$C_k (\text{kPa})$	Φ'_k	$C_{u,k} (\text{kPa})$	$M_v (\text{kPa})$	$E' (\text{kPa})$
19	4	27,6	77,6	9207,6	6840

3.3. Geotehnička sredina 3-sloj pijeska (SC)

3.3.1. Rezultati za bušotinu B-1

Zapreminska težina

$$\gamma = 18 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kut unutarnjeg trenja

$$\Phi' = 34^\circ \rightarrow \text{laboratorijski rezultati [14]}$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34^\circ) \cdot 0,95 = 32,65^\circ$$

Modul elastičnosti

1. Broj udaraca, N=21

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 134,8 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini izvođenja pokusa}$

$$\text{Prema Bowlesu [18]: } E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (18 + 15) = 9900 \text{ kPa}$$

2. Broj udaraca, N=23

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 211,39 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini izvođenja pokusa}$

$$\text{Prema Bowlesu [18]: } E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (15 + 15) = 9000 \text{ kPa}$$

3. Broj udaraca, N=26

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 235,96 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini izvođenja pokusa}$

$$\text{Prema Bowlesu [18]: } E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (17 + 15) = 9600 \text{ kPa}$$

Srednja vrijednost modula elastičnosti:

$$E = \frac{9000 + 9900 + 9600}{3} = 9500 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 9500 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 12788,5 \text{ kPa}$$

3.3.2. Rezultati za bušotinu B-2

Zapreminska težina

$$\gamma = 20 \text{ kN} / \text{m}^3 \text{ [14]}$$

Kut unutarnjeg trenja

$$q_c = 3300 \text{ kPa} \quad [14]$$

$$\Phi' = 29^\circ + 2,5 \cdot \sqrt{q_c} = 34^\circ \quad [16]$$

$$\Phi' = 34^\circ$$

Karakteristična vrijednost prema izrazu [15]

$$\Phi'_k = \tan(34^\circ) \cdot 0,95 = 32,65^\circ$$

Modul elastičnosti

1. Broj udaraca, N=21

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 152,3 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini izvođenja pokusa

$$\text{Prema Bowlesu [18]: } E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (17 + 15) = 9600 \text{ kPa}$$

2. Broj udaraca, N=26

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 227,39 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini izvođenja pokusa

$$\text{Prema Bowlesu [18]: } E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (17 + 15) = 9600 \text{ kPa}$$

$$E = \frac{9600 + 9600}{2} = 9600 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 9600 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 12923,1 \text{ kPa}$$

3.3.3. Rezultati za bušotinu B-3**Zapreminska težina**

$$\gamma = 20 \text{ kN} / \text{m}^3 \quad [14]$$

Kut unutarnjeg trenja

$$N=21$$

$\sigma'_v = 218,19 \text{ kPa} \rightarrow$ na dubini provođenja pokusa

Prema Muromachiju izraz za određivanje kuta trenja [19]:

$$\Phi' = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{N_{cor}} = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{14} = 33^\circ$$

Određivanje karakteristične vrijednosti prema izrazu [15]:

$$\Phi'_k = \tan(33^\circ) \cdot 0,95 = 31,67^\circ$$

N=24

$$\sigma'_v = 248,76 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Prema Muromachiju izraz za određivanje kuta trenja [19]:

$$\Phi' = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{N_{cor}} = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{15} = 34^\circ$$

Određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34^\circ) \cdot 0,95 = 32,65^\circ \text{ [15]}$$

Srednja vrijednost:

$$\Phi'_k = \frac{32,65^\circ + 31,67^\circ}{2} = 32,16^\circ$$

Modul elastičnosti

1. Broj udaraca, N=21

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 218,19 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$

Prema Bowlesu [18]: $E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (14 + 15) = 8700 \text{ kPa}$

2. Broj udaraca, N=24

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 248,76 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$

Prema Bowlesu [18]: $E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (15 + 15) = 9000 \text{ kPa}$

$$E = \frac{8700 + 9000}{2} = 8850 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 8850 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 11913,5 \text{ kPa}$$

3.3.4. Rezultati za bušotinu B-4

Zapreminska težina

$$\gamma = 20 \text{ kN} / \text{m}^3$$

Kut unutarnjeg trenja

$$N=22$$

$$\sigma'_v = 220,49 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Prema Muromachiju izraz za kut trenja [19]:

$$\Phi' = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{N_{cor}} = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{15} = 34^\circ$$

Određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34^\circ) \times 0,95 = 32,65^\circ$$

$$N=25$$

$$\sigma'_v = 251,06 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini provođenja pokusa}$$

Prema Muromachiju izraz za kut trenja [19]:

$$\Phi' = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{N_{cor}} = 20^\circ + 3,5 \cdot \sqrt{15} = 34^\circ$$

Određivanje karakteristične vrijednosti [15]:

$$\Phi'_k = \tan(34^\circ) \cdot 0,95 = 32,65^\circ$$

Modul elastičnosti

1. Broj udaraca, N=22

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 220,49 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini izvođenja pokusa}$

Prema Bowlesu [18]: $E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (15 + 15) = 9000 \text{ kPa}$

2. Broj udaraca, N=25

Efektivno naprezanje $\sigma'_v = 251,06 \text{ kPa} \rightarrow \text{na dubini izvođenja pokusa}$

Prema Bowlesu [18]: $E = 300 \cdot (N_{cor} + 15) = 300 \cdot (15 + 15) = 9000 \text{ kPa}$

$$E = \frac{9000 + 9000}{2} = 9000 \text{ kPa}$$

Modul stišljivosti prema izrazu [16]:

$$M_v = E \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 9000 \cdot \frac{(1-0,3)}{(1+0,3) \cdot (1-2 \cdot 0,3)} = 12115,4 \text{ kPa}$$

Koeficijent propusnosti procijenjen na temelju rezultata iz CPT-a [14]:

$$k = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

Tablica 5.: Karakteristične vrijednosti sloja pijeska (SC)

γ (kN / m ³)	C_k (kPa)	Φ_k	$C_{u,k}$ (kPa)	M_v (kPa)	E (kPa)
19,5	/	32,5	/	12435,1	9237,5

3.4. Karakteristične srednje vrijednosti parametara slojeva

U samom proračunu u prethodno prikazanim poglavljima na temelju korelacija dobiveni su rezultati za unos u GeoStudio. Konačne vrijednosti prikazane u sljedećoj tablici su karakteristične srednje vrijednosti bušotina za svaki sloj posebno sa određenim iznimkama pojedinih parametara gdje su se na temelju iskustva procijenili određeni parametri.

Tablica 6.: Iskustveni odnos karakteristične i srednje vrijednosti (Izvor: [15])

Parametar tla (X)	Simbol	$X_k/X_{srednje}$
Tangens efektivnog kuta trenja	$\tan \Phi$	0,95
Efektivna kohezija	c'	0,80
Nedrenirana čvrstoća	C_u	0,85
Edometarski modul	E_{oed}	0,80
Gustoća	ρ	1,00

Tablica 7.: Sumarna tablica karakterističnih vrijednosti parametara

Dubina	γ (kN/m ³)	C_k (kPa)	Φ'_k	$C_{u,k}$ (kPa)	M_v (kPa)	E' (kPa)	k (m/s)
Nasip (CL/SC), 0-3m	18,8	2	32,9	69,5	28780,7	21380	1×10^{-6}
Glina (CL), 3-10m	19	4	27,6	77,6	9207,6	6840	1×10^{-8}
Pijesak (SC), 10-15m	19,5	/	32,5	/	12435,1	9237,5	1×10^{-6}

3.5. Seizmičke karakteristike lokacije

Područje na kojem se nalazi nasip ima ubrzanje tla $a_{gr} = 0,15g$ za povratni period od 475, što se očitava sa karte potresnih područja Republike Hrvatske.



Slika 33.:Karte potresnog područja (Izvor: [14])

- $a_{gr} = 0,15g$
- $g = 9,81$
- Klasa C- $S = 1,15$, $r = 2,0$

$$\alpha = \frac{a_{g,r}}{g} = 0,15$$

$$k_h = \alpha \times \frac{S}{r} = 0,15 \times \frac{1,15}{2} = 0,08625$$

$$k_v = \pm \frac{1}{3} \times k_h = \pm 0,02875$$

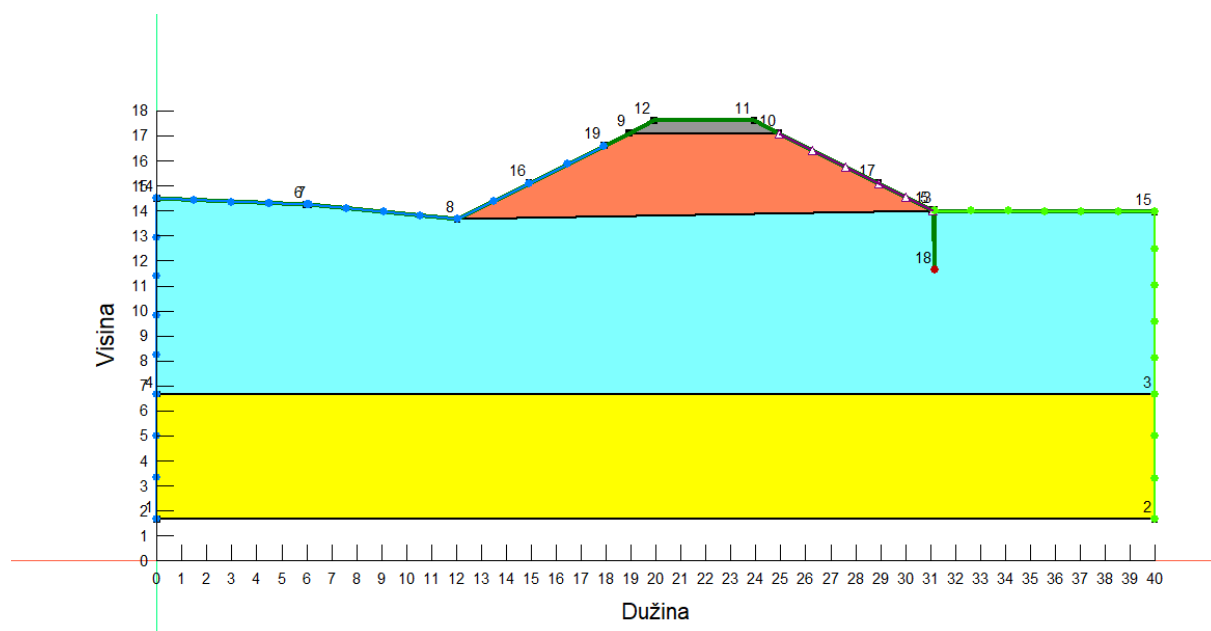
4. GEOTEHNIČKI PRORAČUN

4.1. Postojeće stanje

U postojećem stanju provedene su analize procjeđivanja kako bi se vidjelo kakvi veličine izlaznih gradijenata, te kako bi se procijenio njihov utjecaj na sam nasip. Provedene su dvije analize, prva stacionarna i druga nestacionarna. Nestacionarna (eng. *Transient*) analiza je zadana kako bi se analiziralo ponašanje nasipa tijekom varijacije razine vode u rijeci.

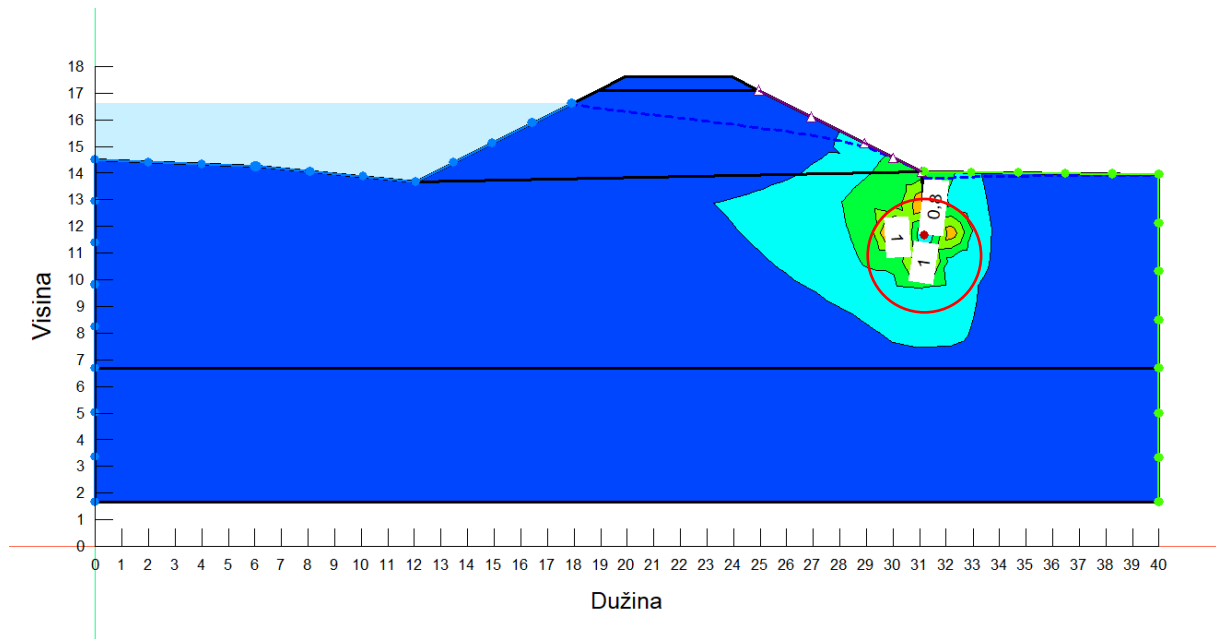
4.1.1. Stacionarna analiza

Rubni uvjeti za stacionarnu analizu zadan je „water total head“ odnosno hidraulički potencijal na visini od 16,6 metara. Na desnoj strani do točke 18 je simulirana likvefakcijska pukotina sa uvjetom „zero pressure“ odnosno piezometarska visina u toj točki ima vrijednost 0 kako bi se simulirao izlaz vode na tom dijelu gdje je pukotina.

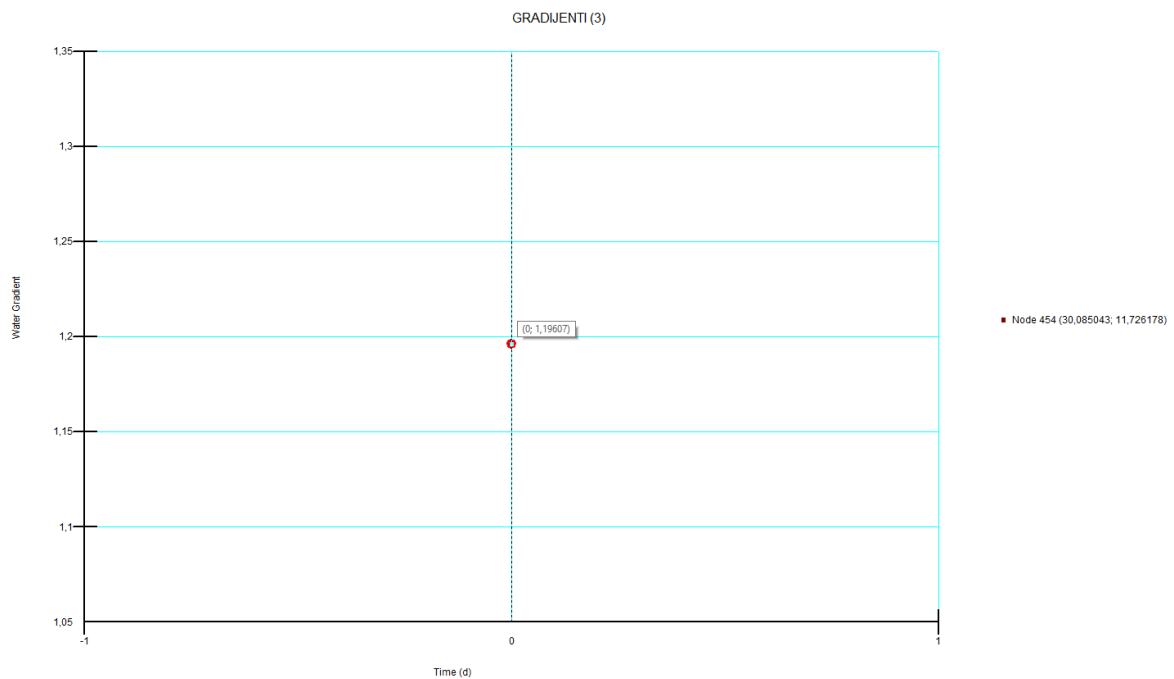


Slika 34. Zadavanje materijala-postojeće stanje, analiza procjeđivanja

Na sljedećoj slici jasno je vidljivo da se najveći gradijenti, nalaze oko likvefakcijske pukotine koju smo simulirali, a na grafu je jasno vidljivo da je najveći gradijent točno 1,19 zbog likvefakcijske pukotine označene crvenom kružnicom.



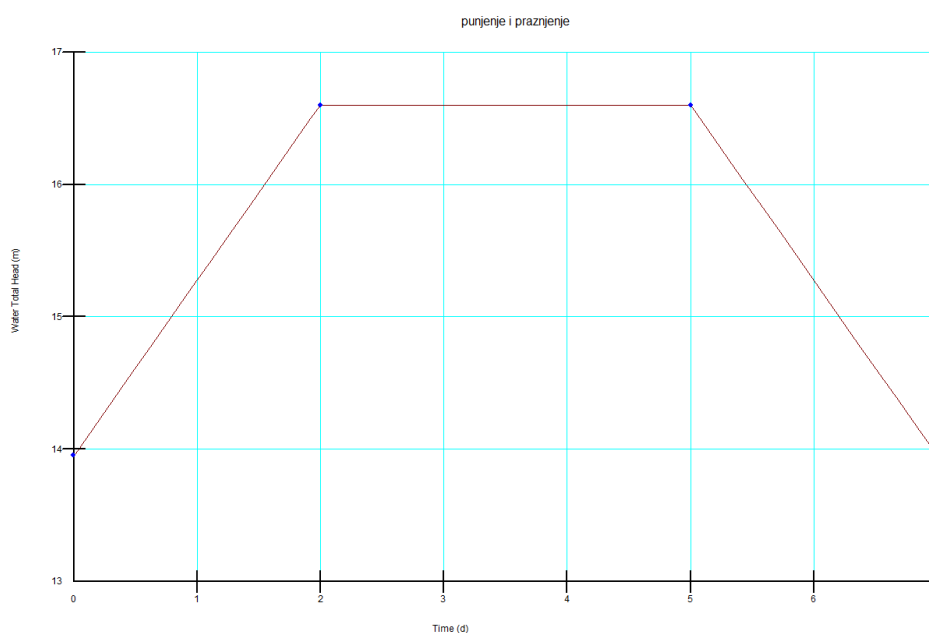
Slika 35. Prikaz kontura hidrauličkih gradijenata pri visokoj vodi, stacionarna analiza



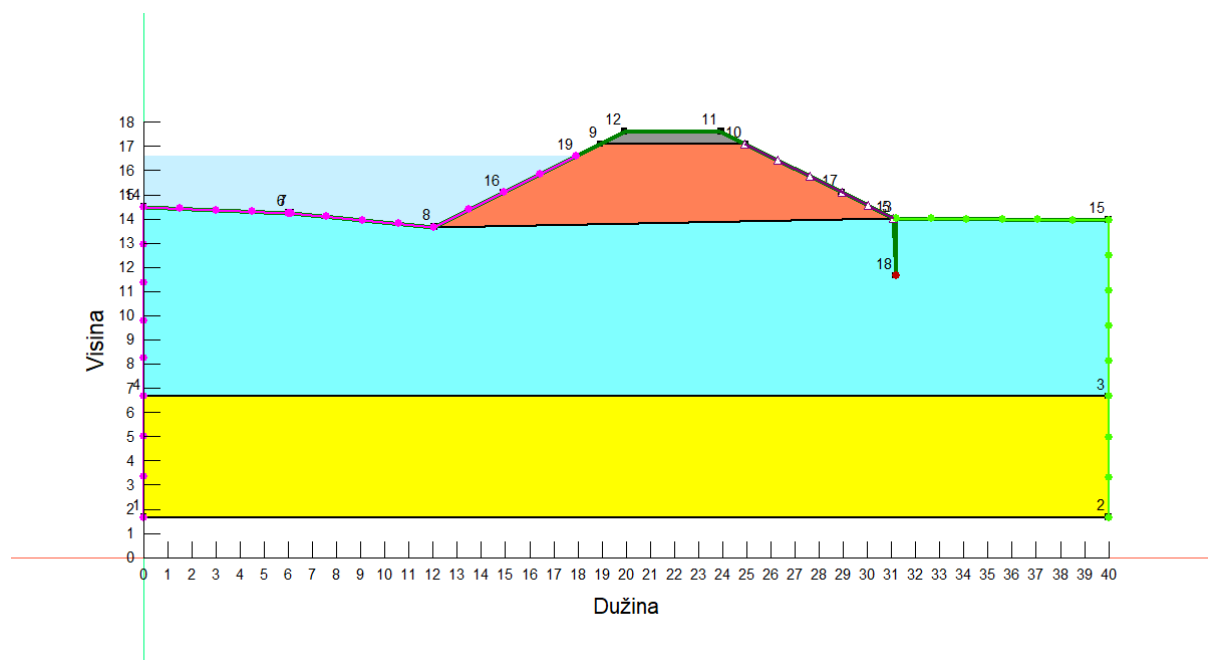
Slika 36. Graf hidrauličkih gradijenata, stacionarna analiza

4.1.2. Nestacionarna analiza

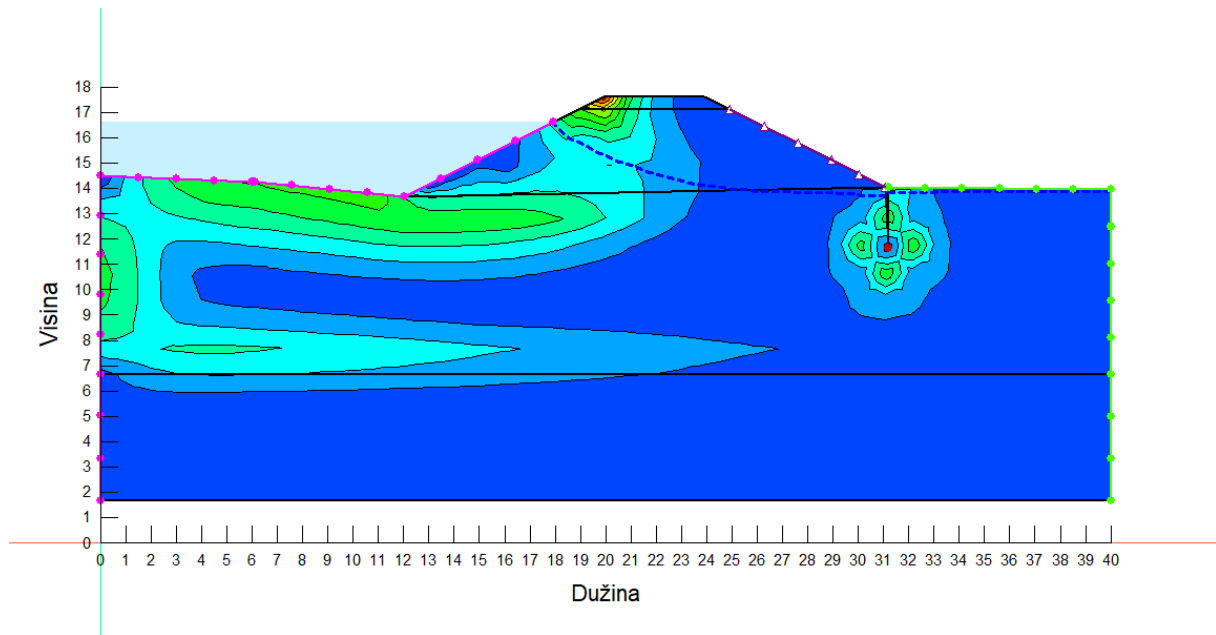
U nestacionarnoj analizi zadan je rubni uvjet pomoću funkcije punjenja i pražnjenja. U tim rubnim uvjetima zadan je početak funkcije, nultog dana visina vode je 13,95 m. Drugog dana voda dolazi na visinu od 16,6 metara da bi se tamo zadržala do petog dana i nakon toga tijekom dva dana se spustila ponovno na 13,95 metara odnosno početnu visinu.



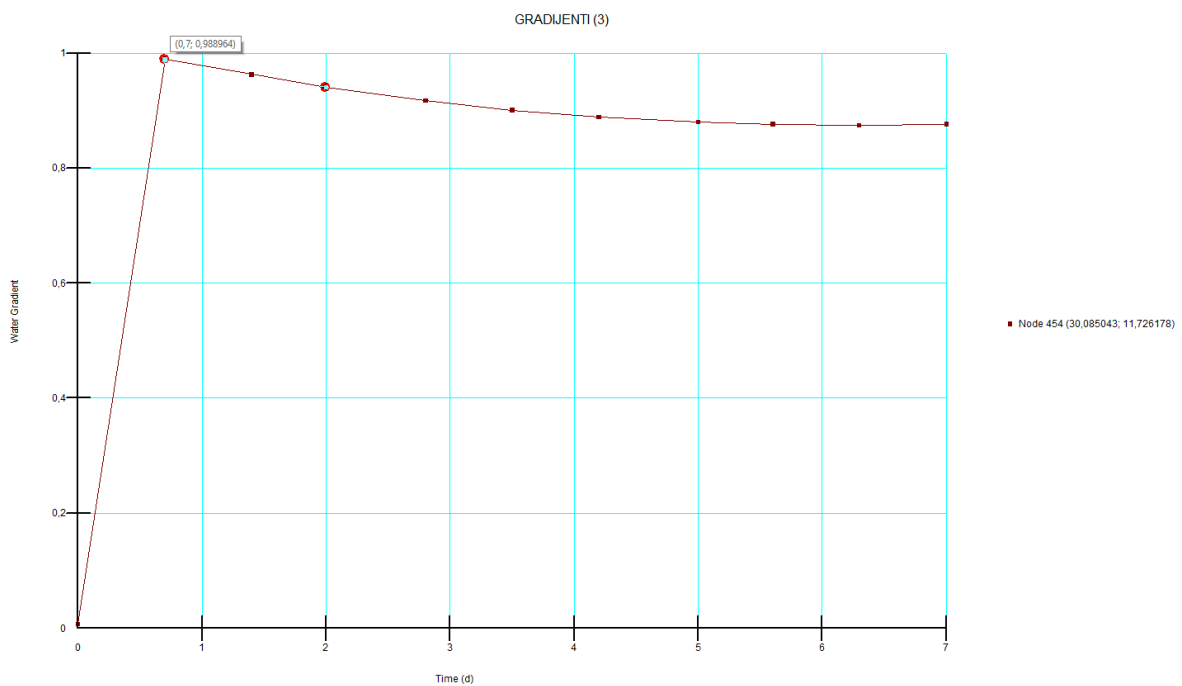
Slika 37. Graf punjenja i pražnjenja



Slika 38. Zadavanje rubnih uvjeta



Slika 39. Prikaz kontura hidrauličkih gradijenata pri nestacionarnom strujanju, tijekom trećeg dana

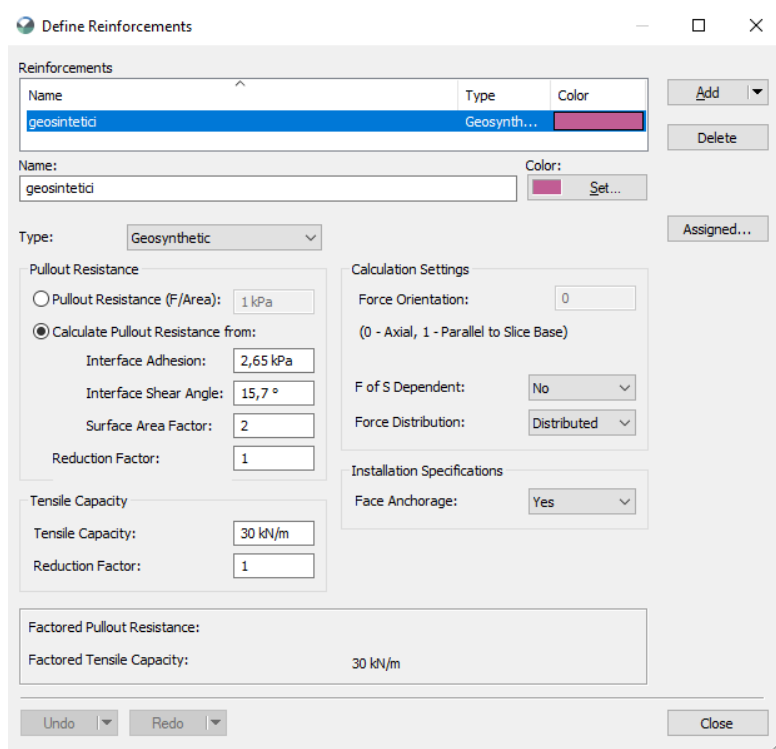


Slika 40. Graf hidrauličkih gradijenata u vremenu, nestacionarna analiza

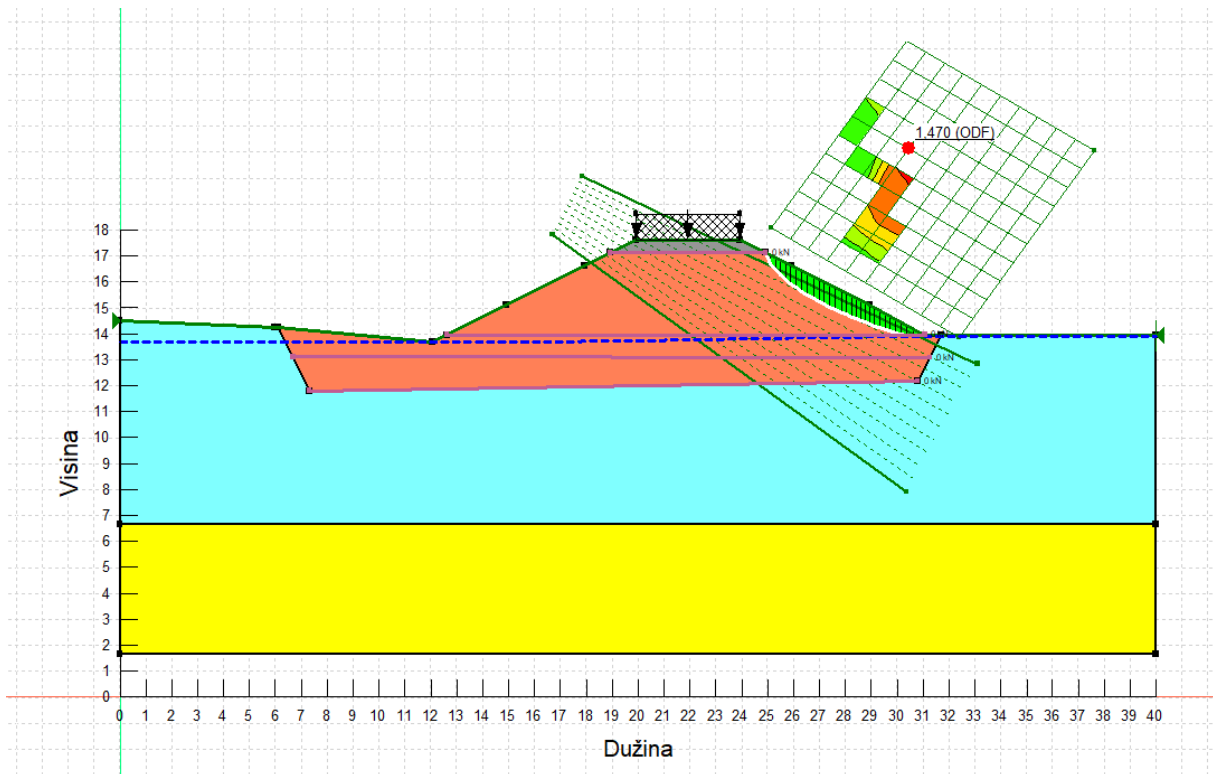
4.2. Sanacija nasipa

4.2.1. Analize stabilnosti

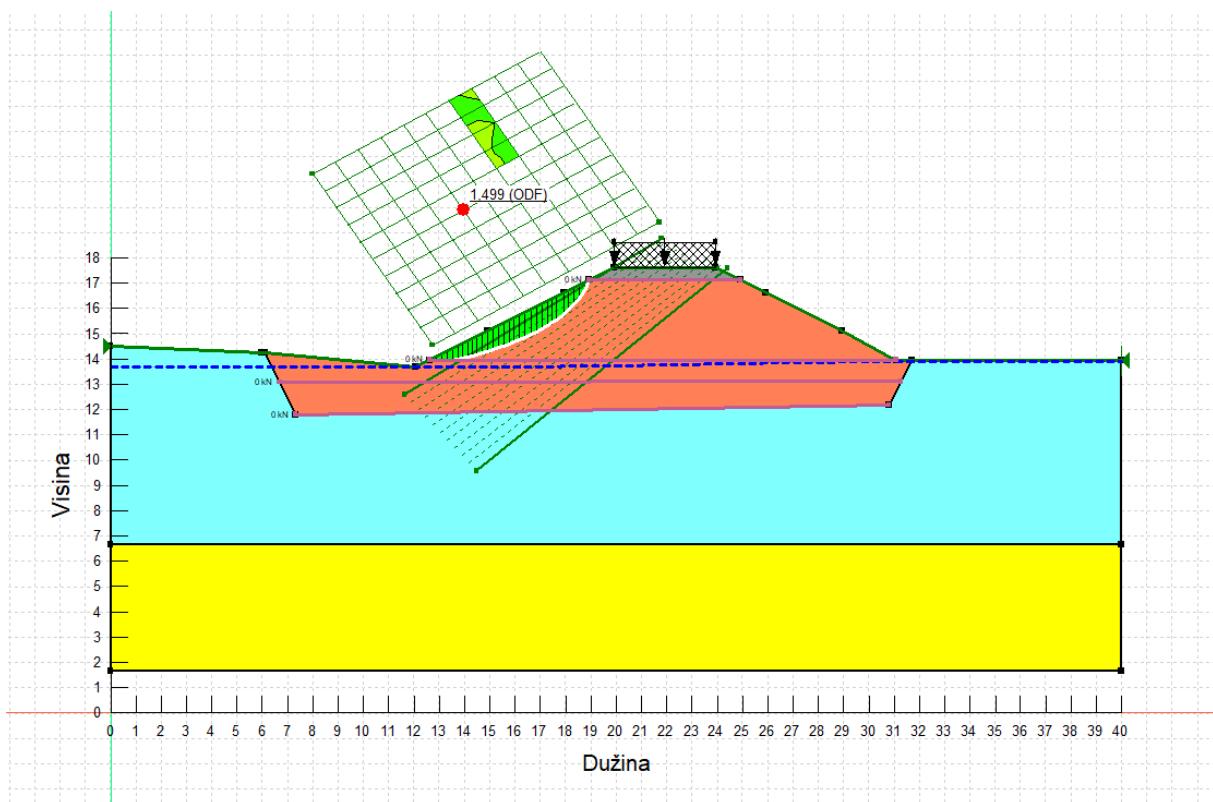
Analize stabilnosti provedene su u različitim geotehničkim uvjetima kako bi se što bolje vidjelo funkcioniranje nasipa. Zbog same uloge nasipa provjeravane su dvije strane, uzvodna i nizvodna, a na samoj kruni nasipa stavljeno je opterećenje od 15 kPa koje simulira približno opterećenje od pješaka i vozila na nasipu. Nasip je ojačan geomrežama koje imaju zadane karakteristike koje su definirane u samom projektu [12].



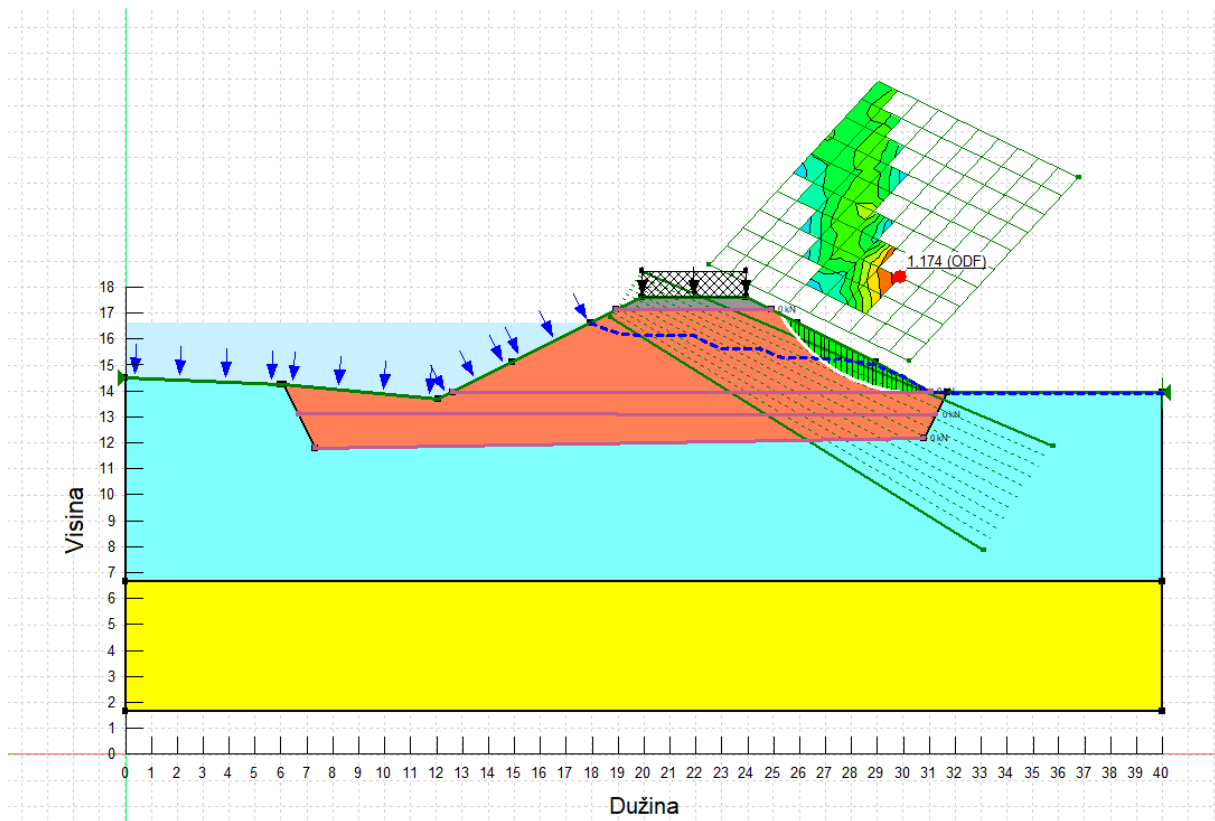
Slika 41. Karakteristike geomreža



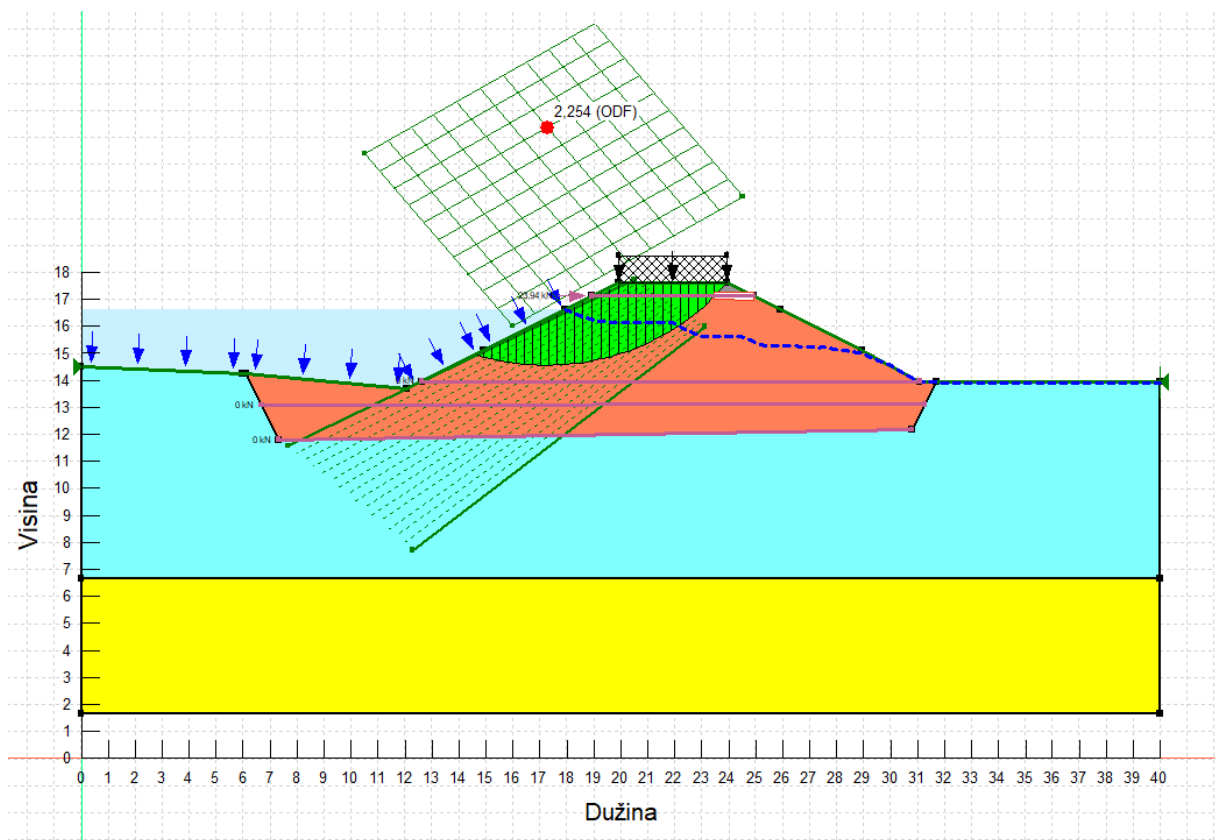
Slika 42. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima niske vode



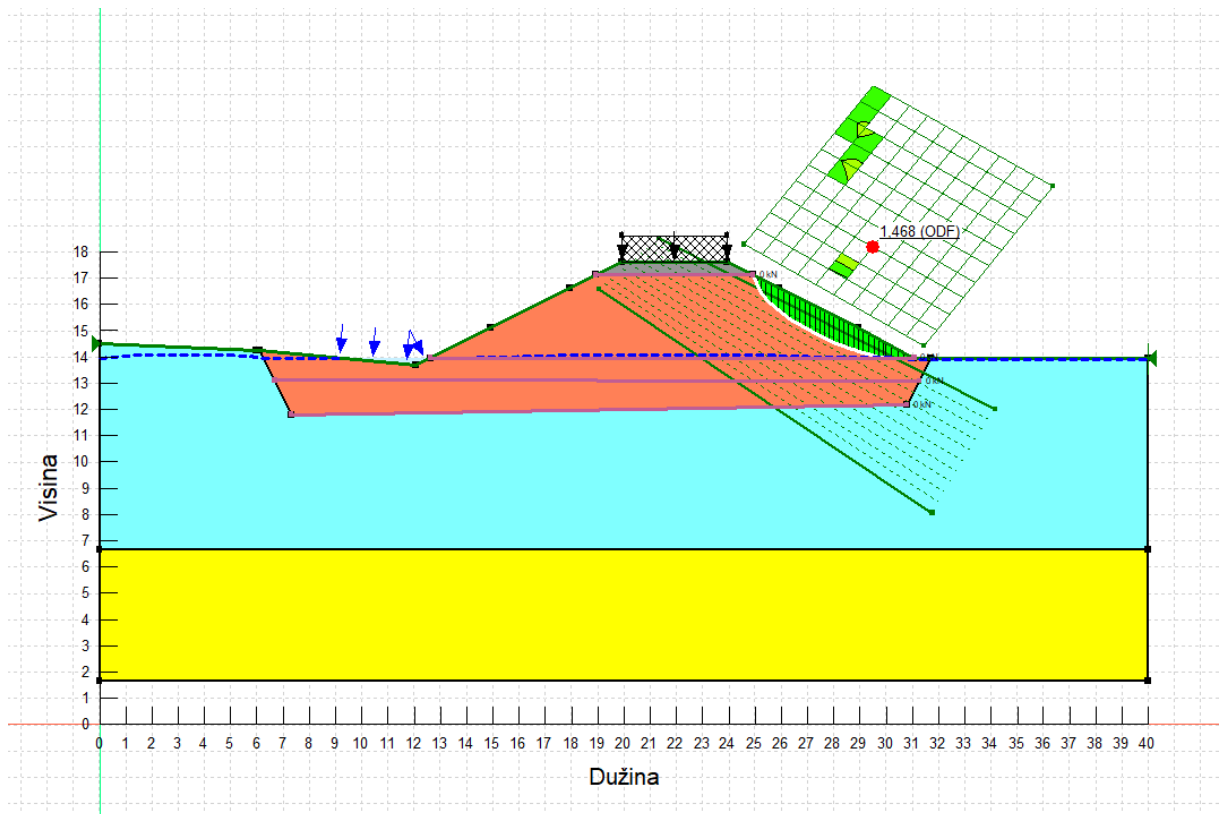
Slika 43. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima niske vode



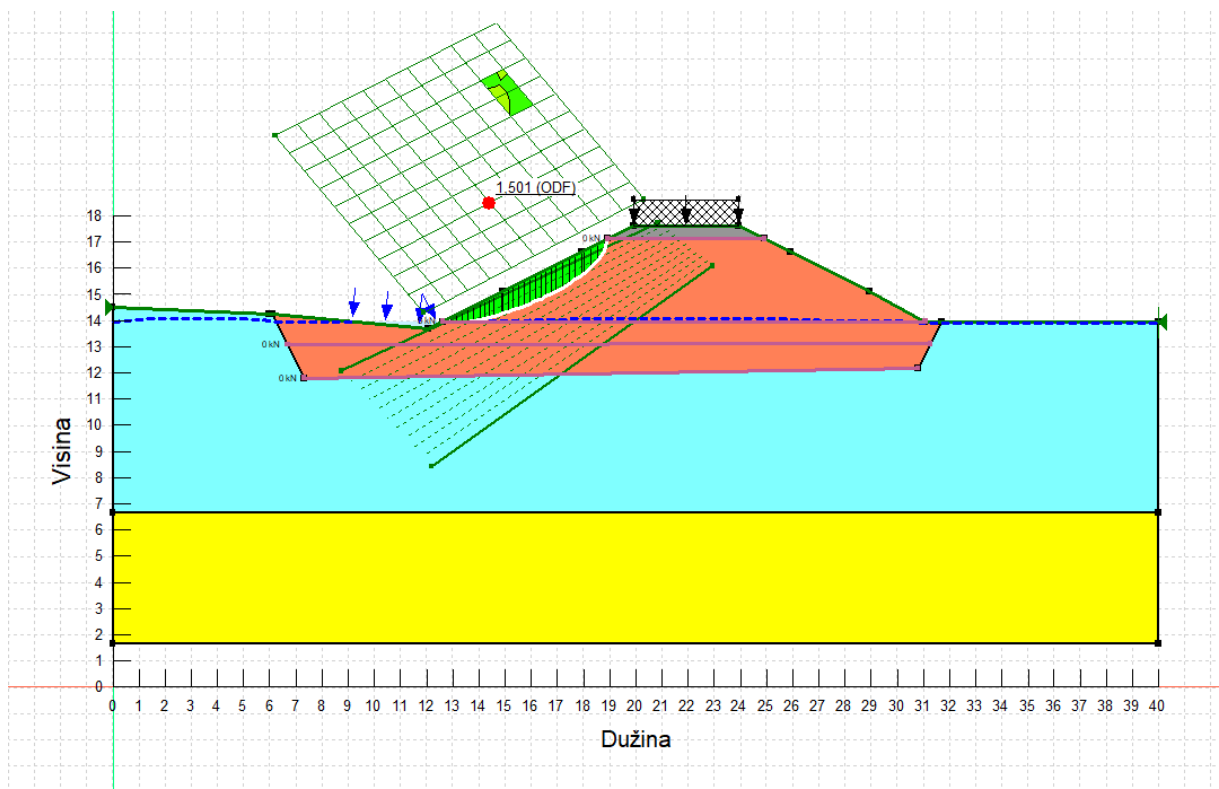
Slika 44. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode



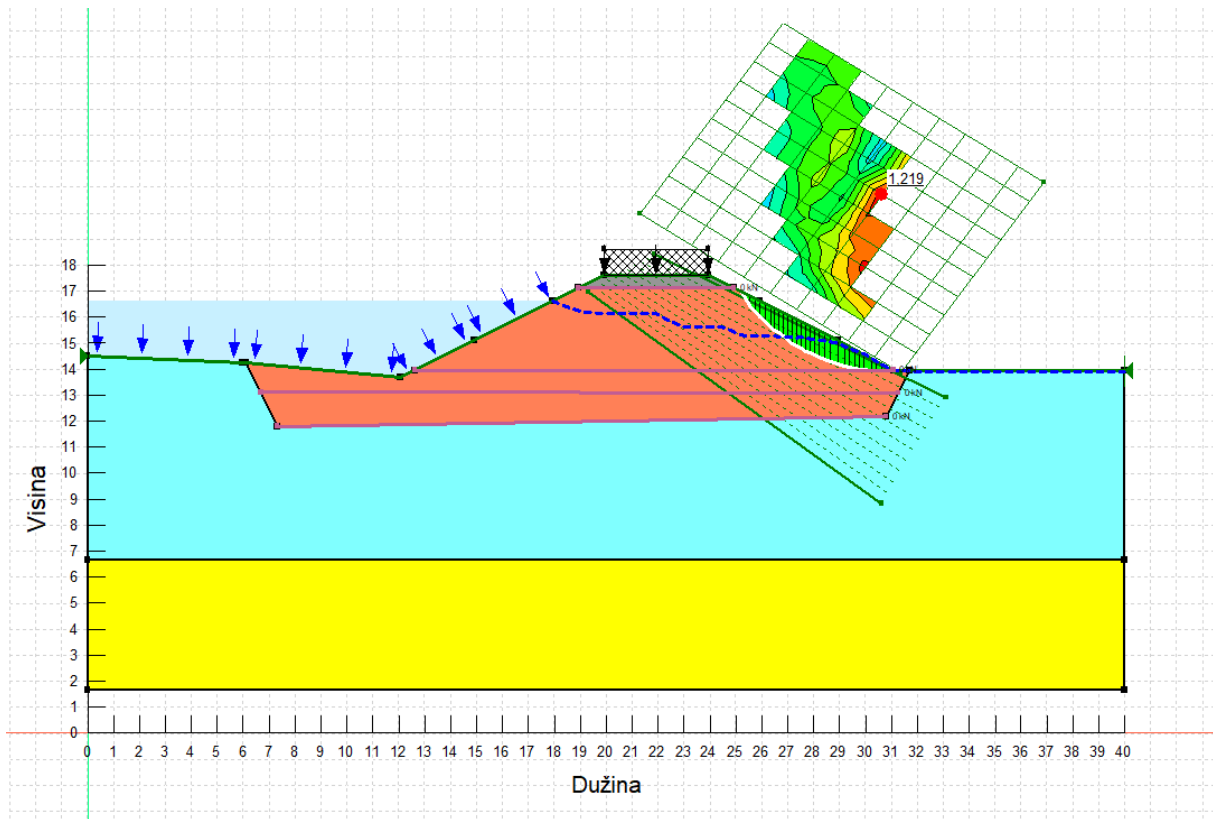
Slika 45. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode



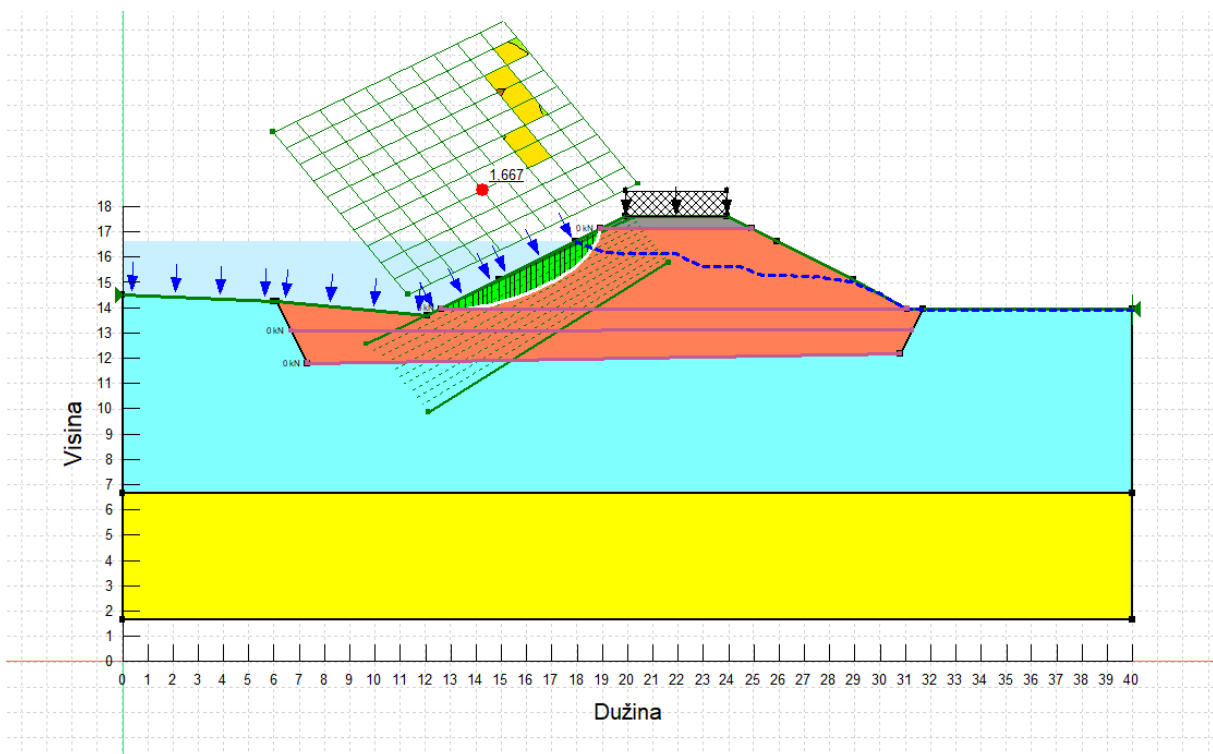
Slika 46. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima naglog sniženja vode



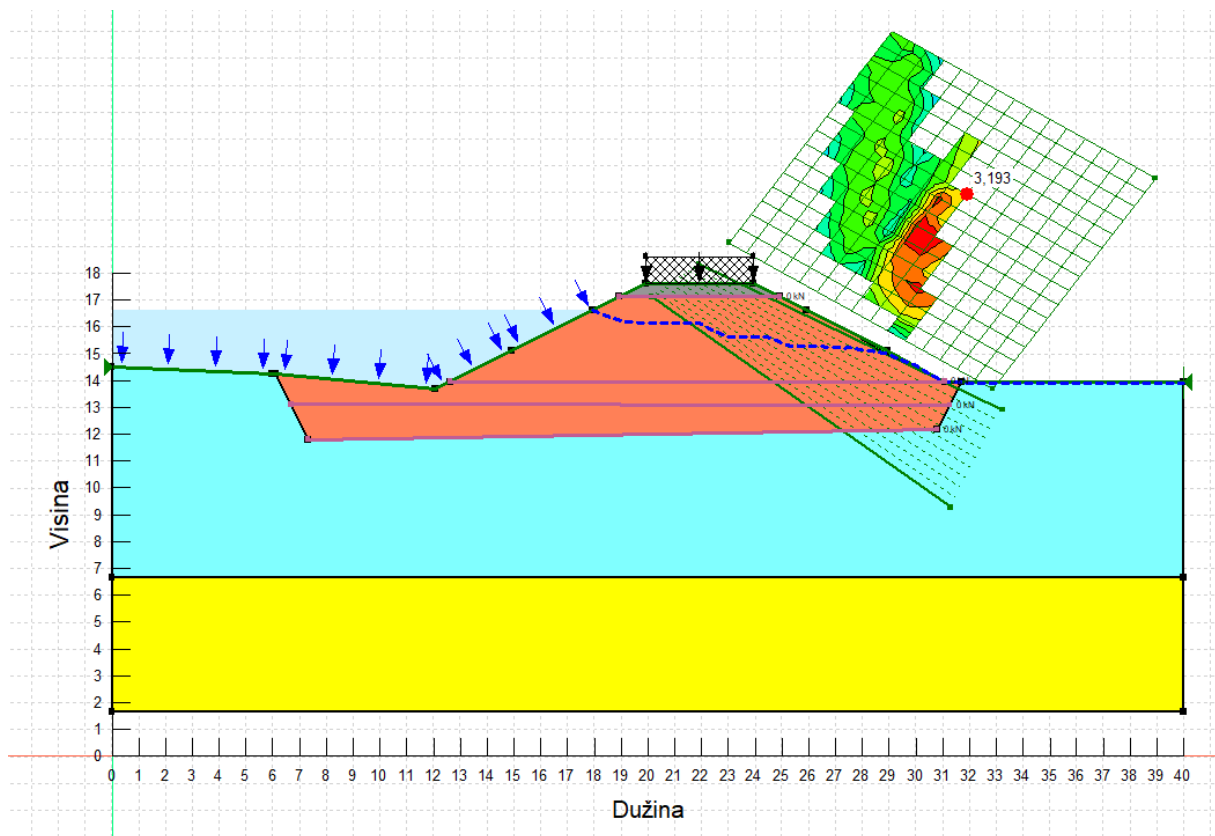
Slika 47. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima naglog sniženja vode



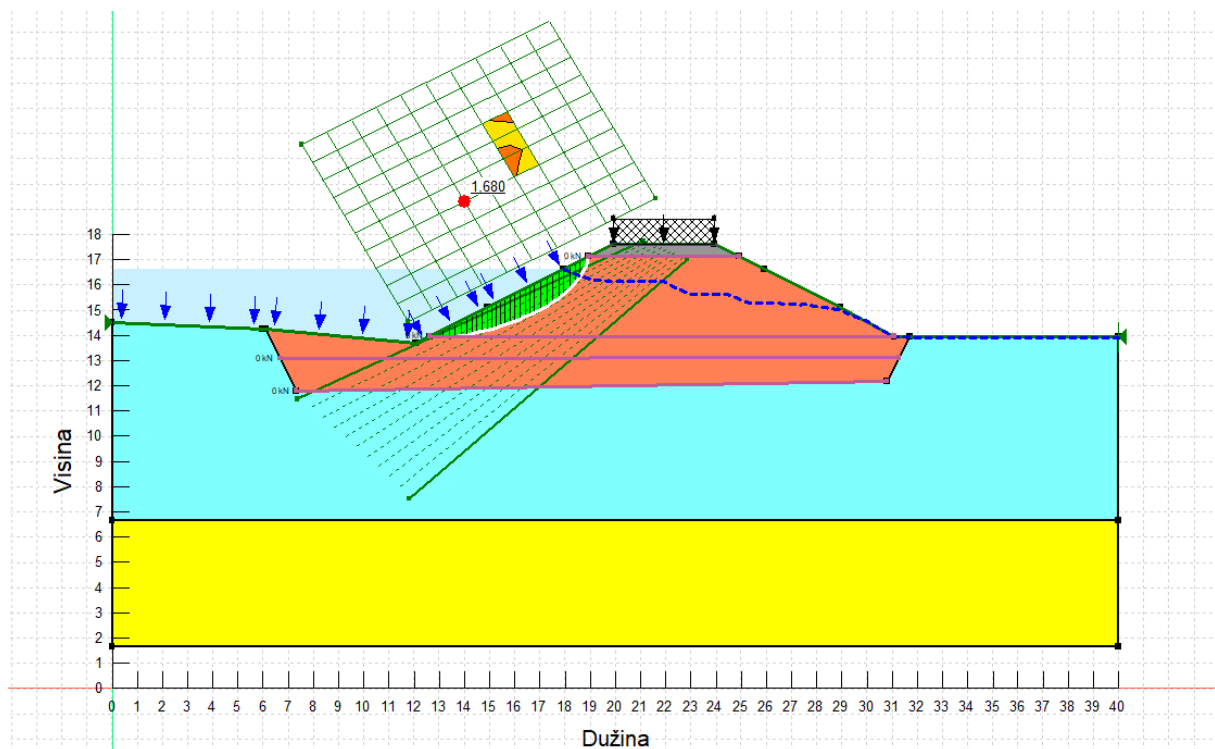
Slika 48. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode i pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja



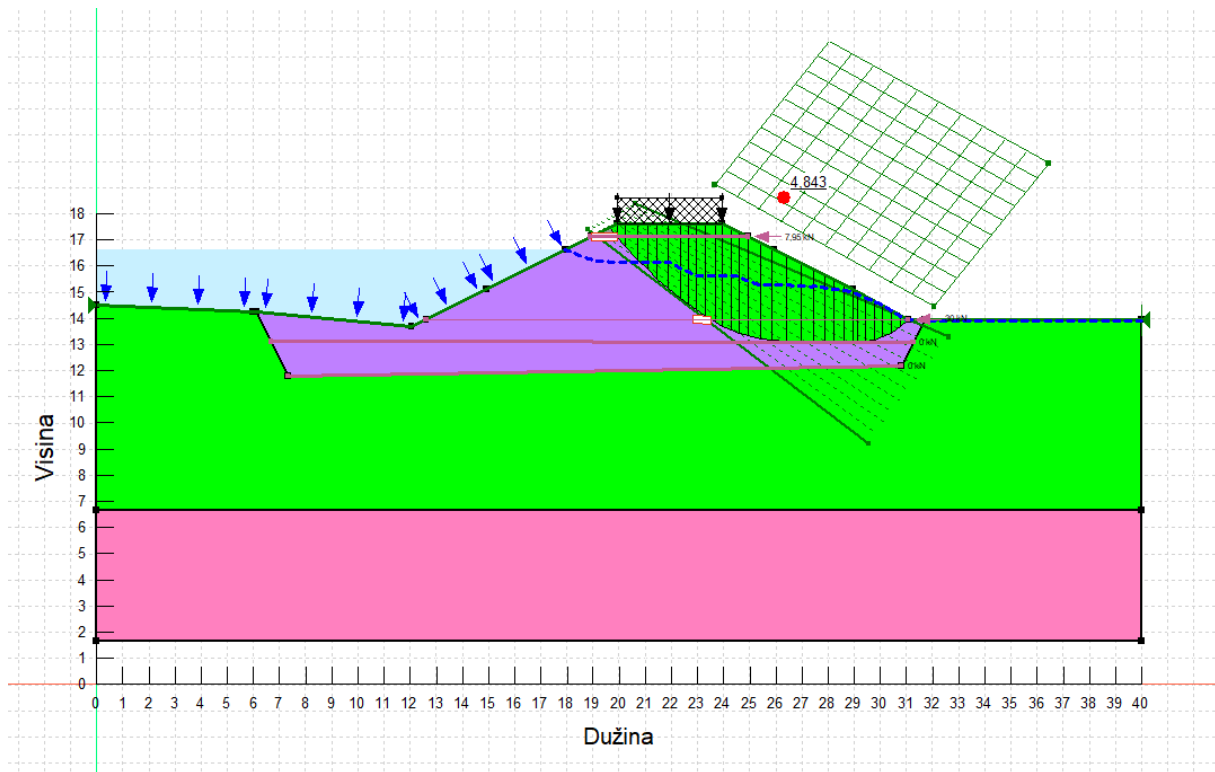
Slika 49. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode i pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja



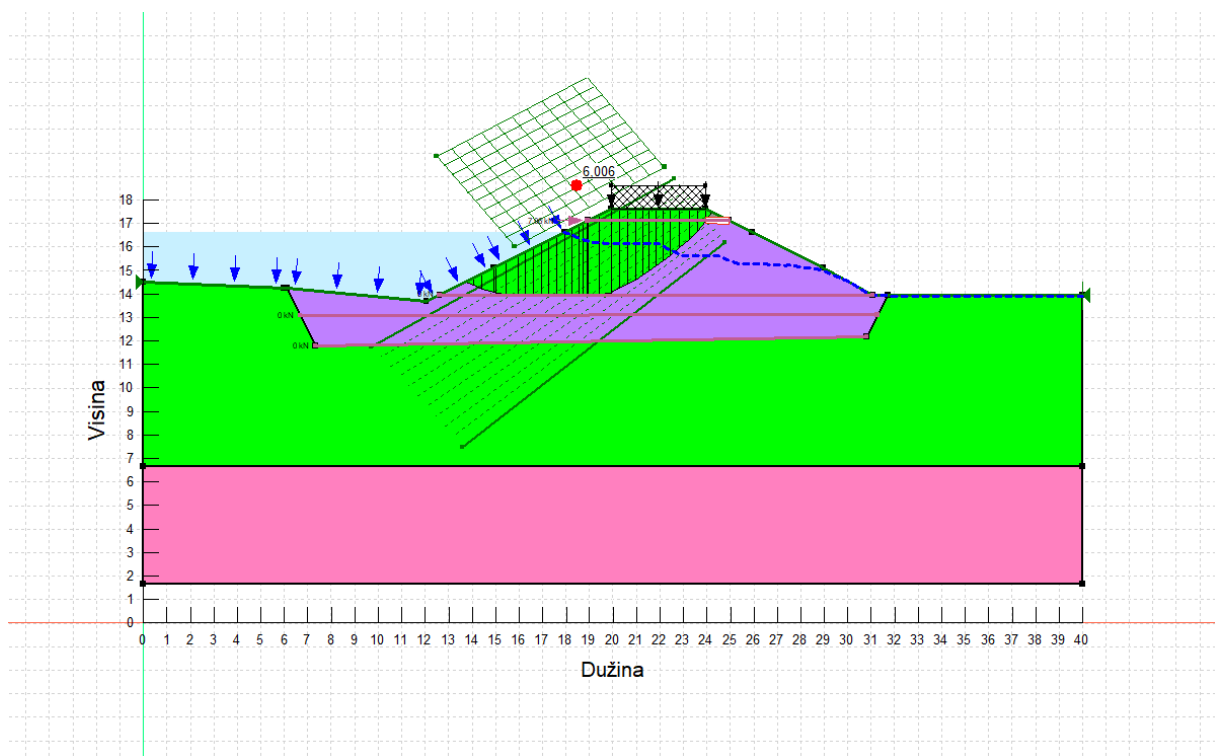
Slika 50. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja



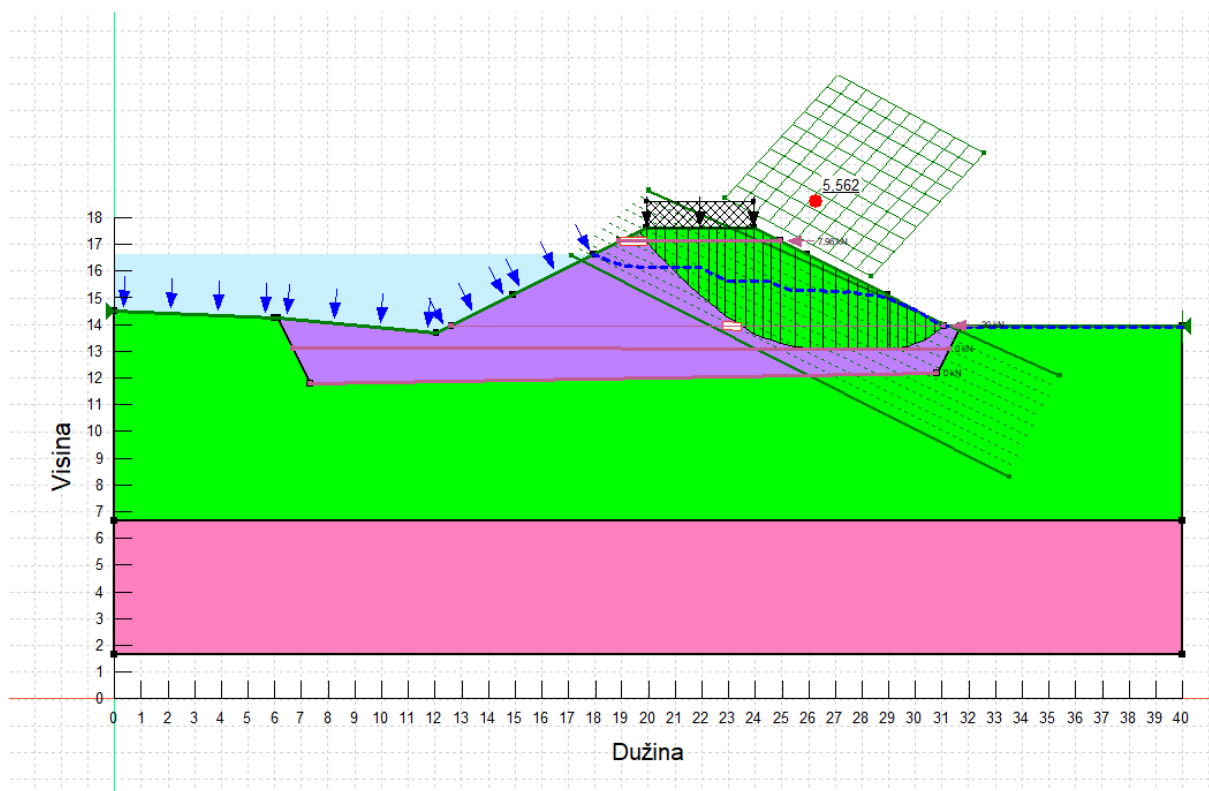
Slika 51. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja



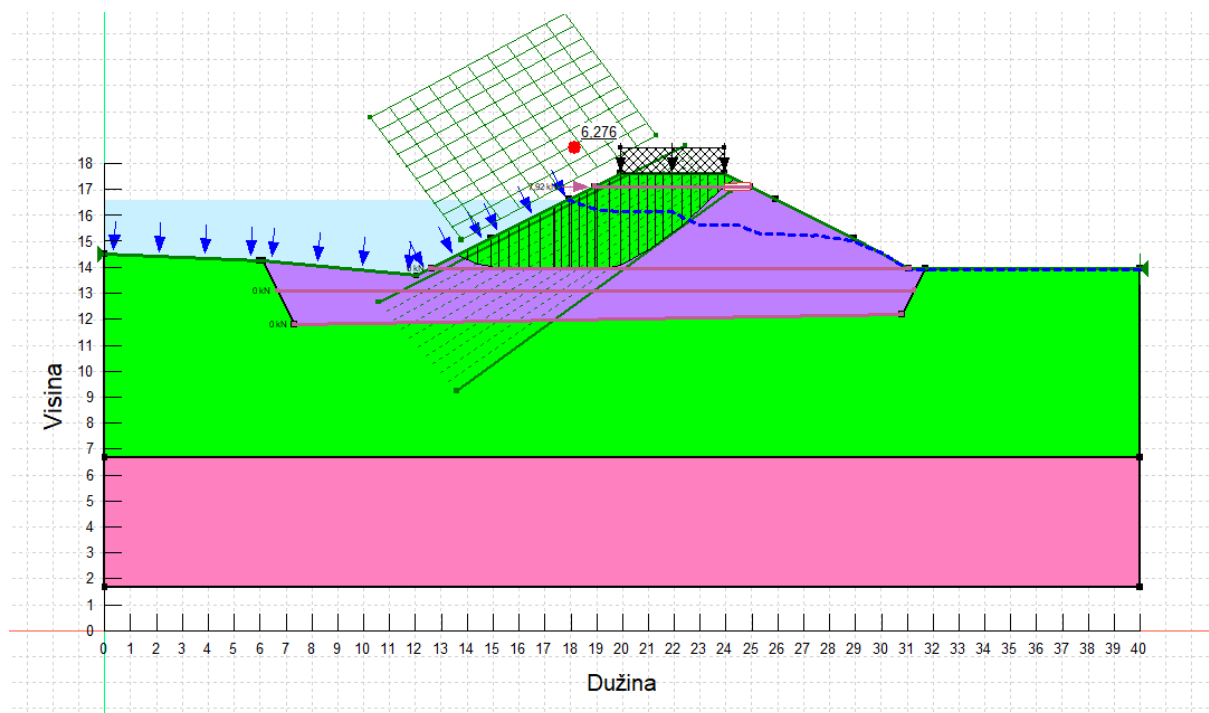
Slika 52. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode, pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima



Slika 53. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode, pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima



Slika 54. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode, negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima

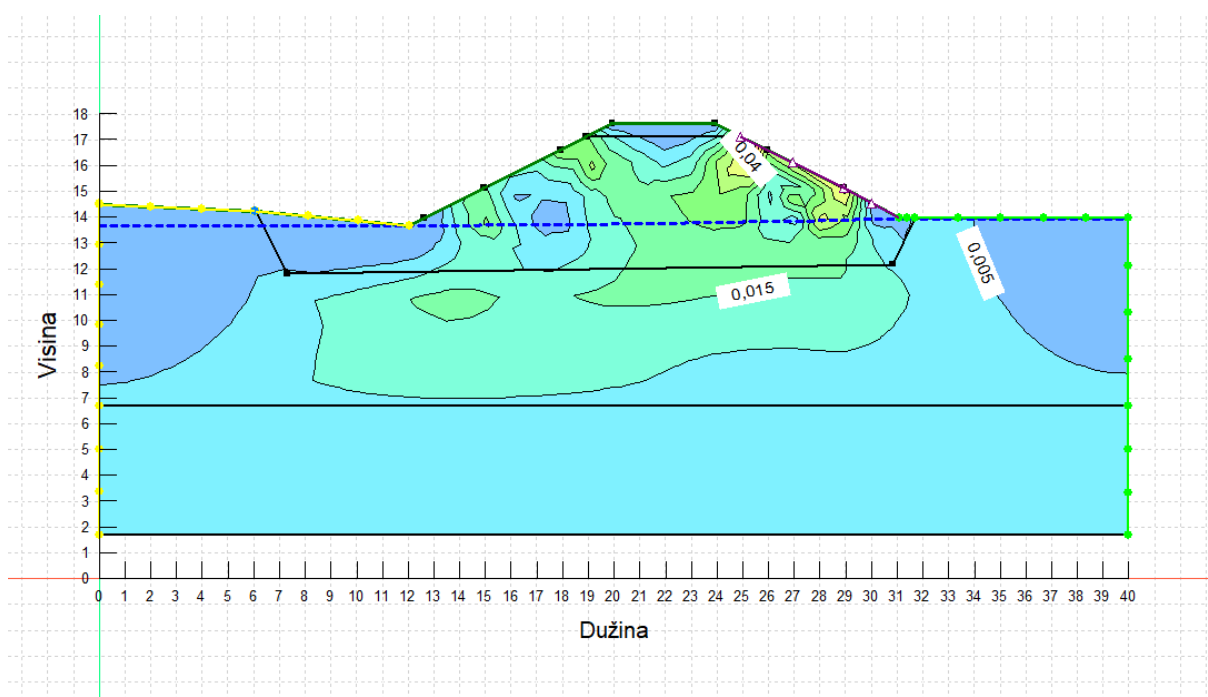


Slika 55. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode, negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima

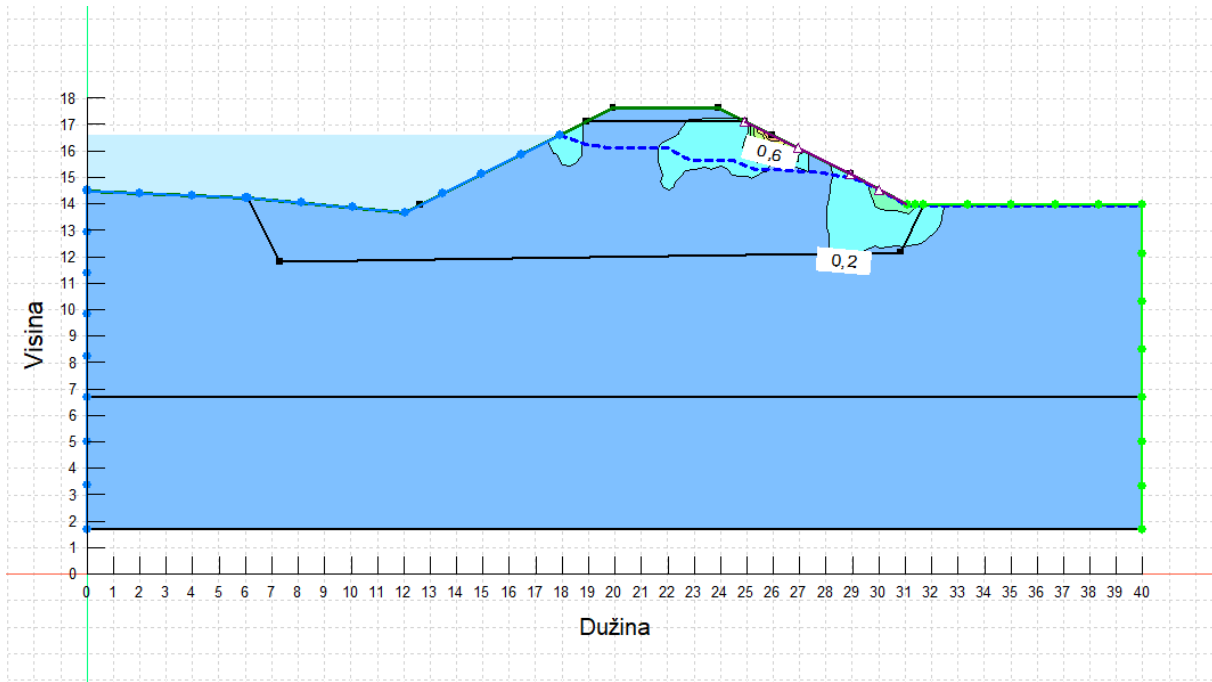
Tablica 8.: Faktori sigurnosti

Proračunske situacije	Uzvodna strana	Nizvodna strana
1.-voda nisko	1,499	1,470
2.-voda do krune	2,254	1,174
3.-naglo sniženje	1,501	1,468
4.visoka voda i potres (+)	1,667	1,219
5.visoka voda i potres (-)	1,680	3,193
6.visoka voda i potres(+)-nedrenirano	6,006	4,843
7.visoka voda i potres (-)-nedrenirano	6,276	5,562

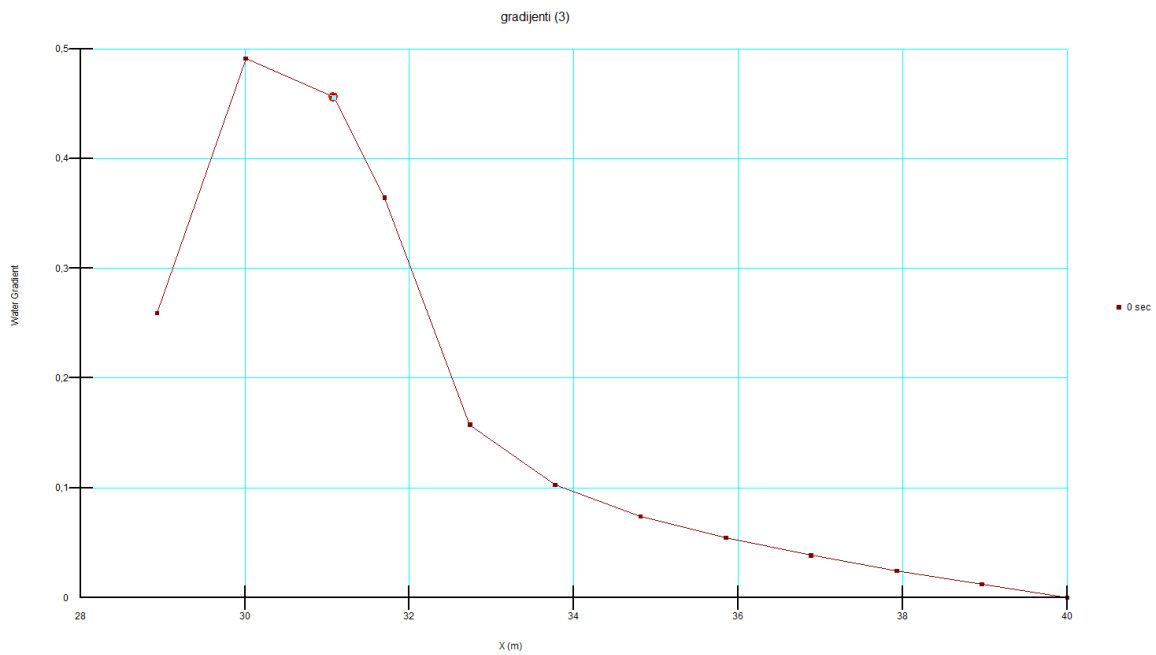
4.2.2. Analize procjeđivanja



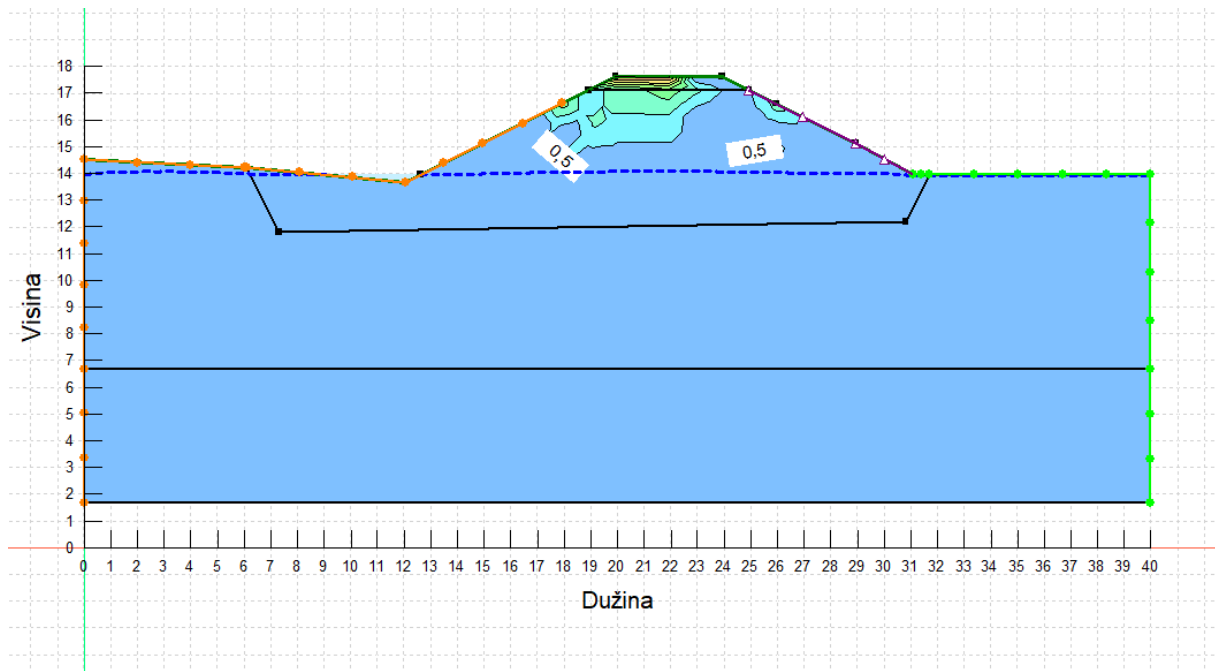
Slika 56. Konture hidrauličkih gradijenata za nisku vodu



Slika 57. Konture hidrauličkih gradijenata za visoku vodu

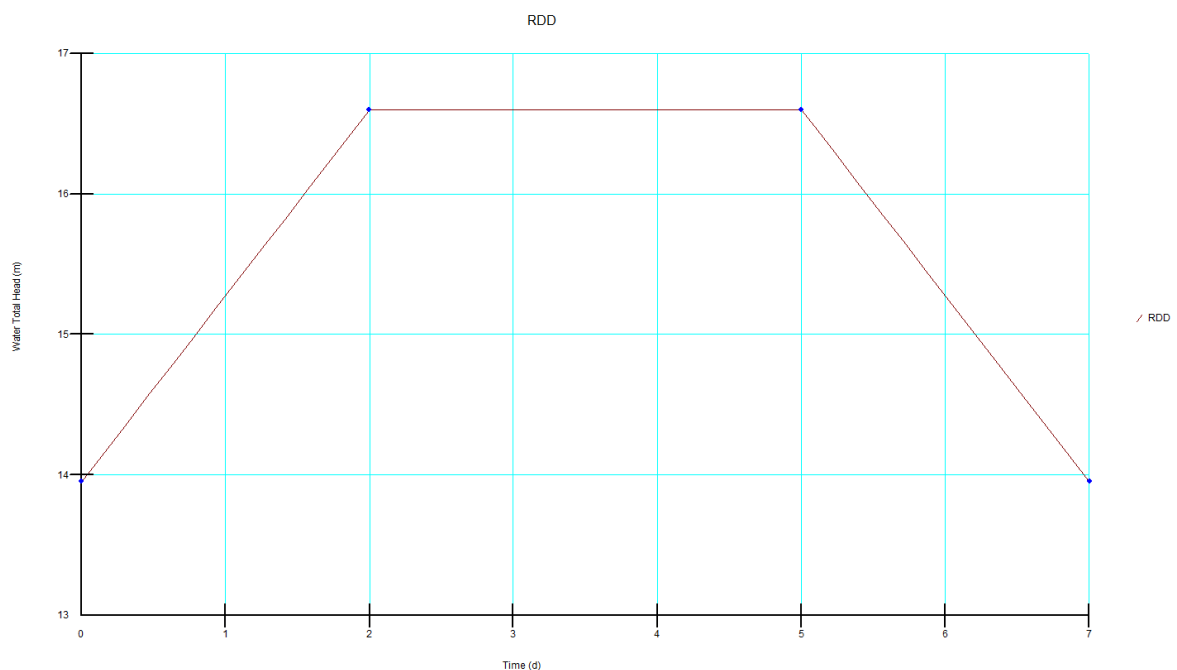


Slika 58. Graf hidrauličkih gradijenata za visoku vodu



Slika 59. Konture hidrauličkih gradijenata za naglo spuštanje vode

Zadana je funkcija za RDD, (eng. *rapid draw down*) naglo spuštanje vode. Tijekom dva dana voda se penje na visinu od 16,6 m do krune gdje se zadržava tri dana i nakon dva dana se opet spušta malo ispod 14 metara na početnu poziciju.

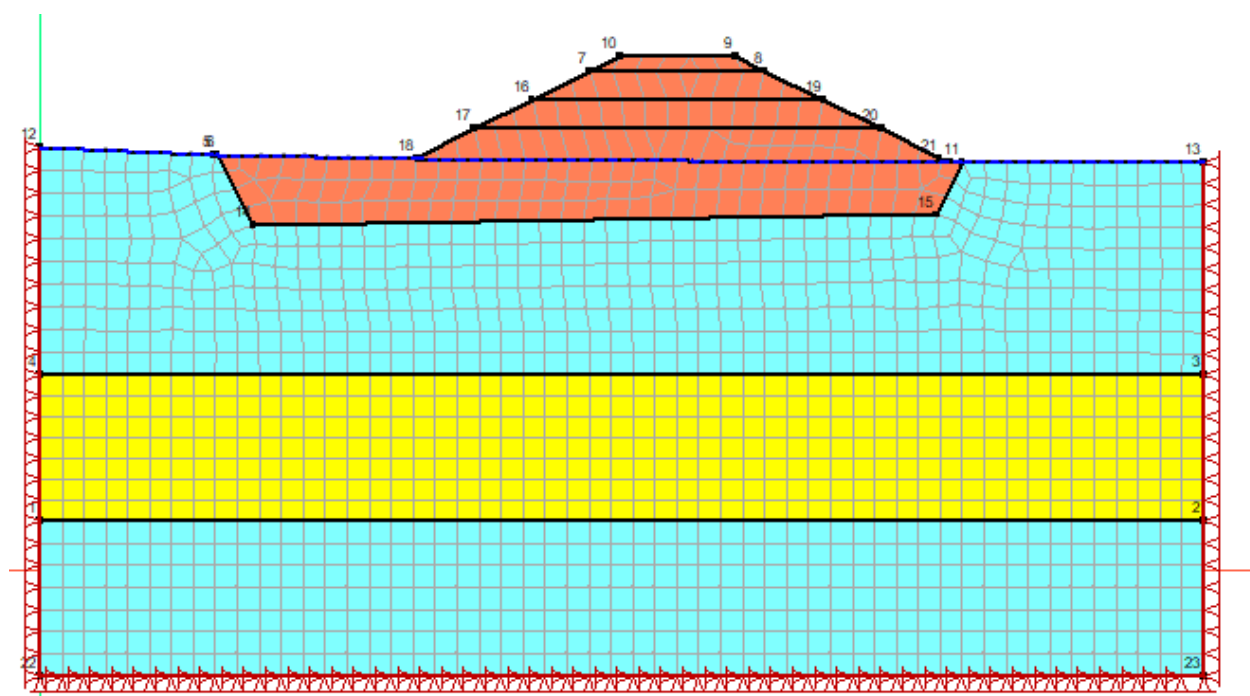


Slika 60. Funkcija zadavanja i spuštanja vode

4.3. Dinamička analiza i ojačanje stupnjacima

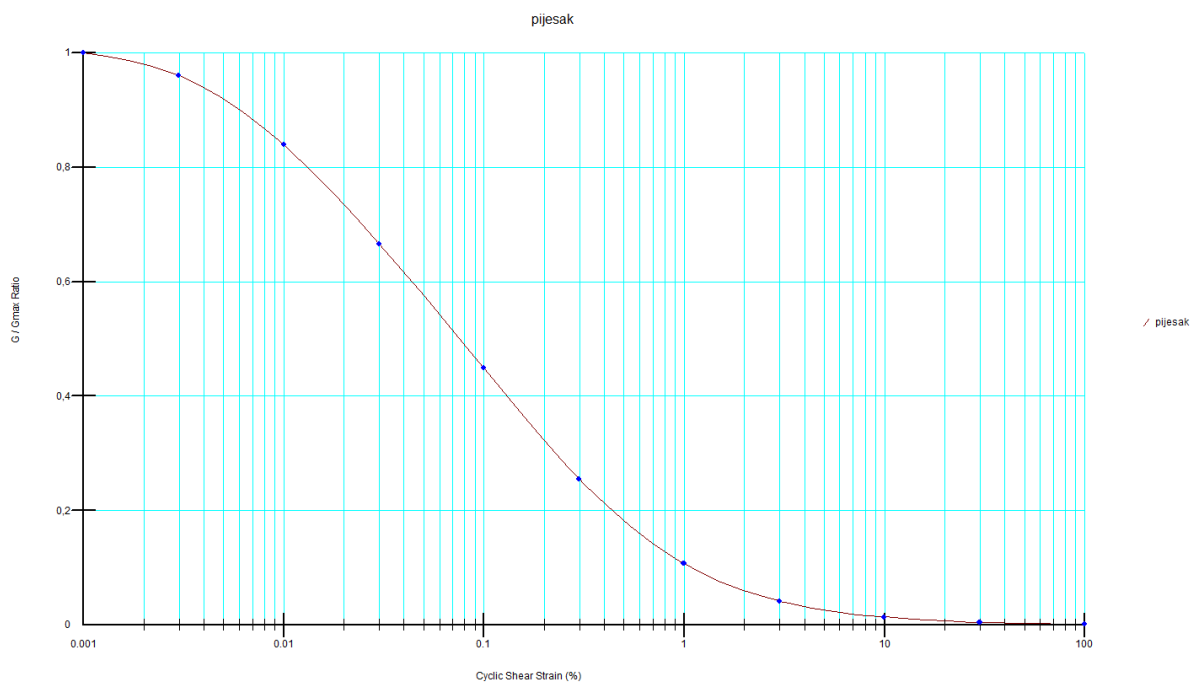
4.3.1. Prva analiza

Dinamičke analize provedene su u QUAKE modulu računalnog programa GeoStudio. Glavni zadatak bilo je pokazat koliki je utjecaj likvefakcije uzrokovane potresom na slijeganje. Stupnjaci koji su u stvarnosti mlazno injektirani, su simulirani kao zasebna regija kako bi se što točnije vidio njihov utjecaj. Korištene su proračunske vrijednosti u zadavanju materijala.

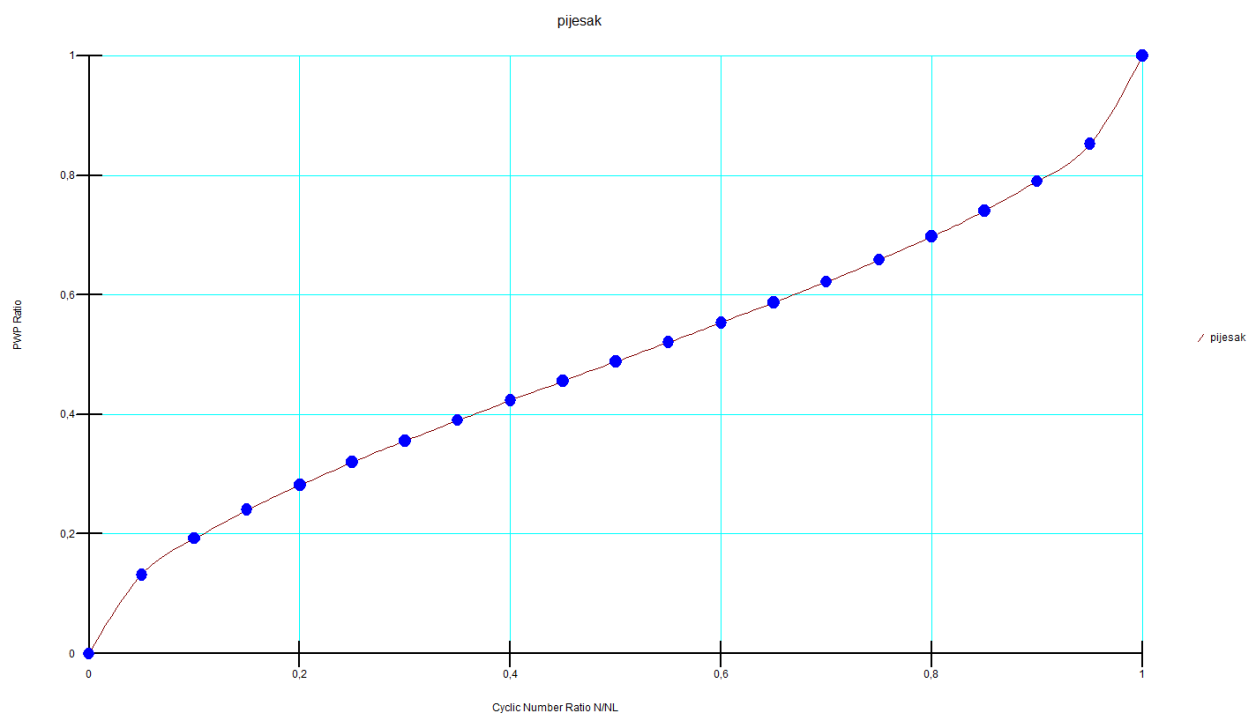


Slika 61. Zadavanje materijala u Quake-u

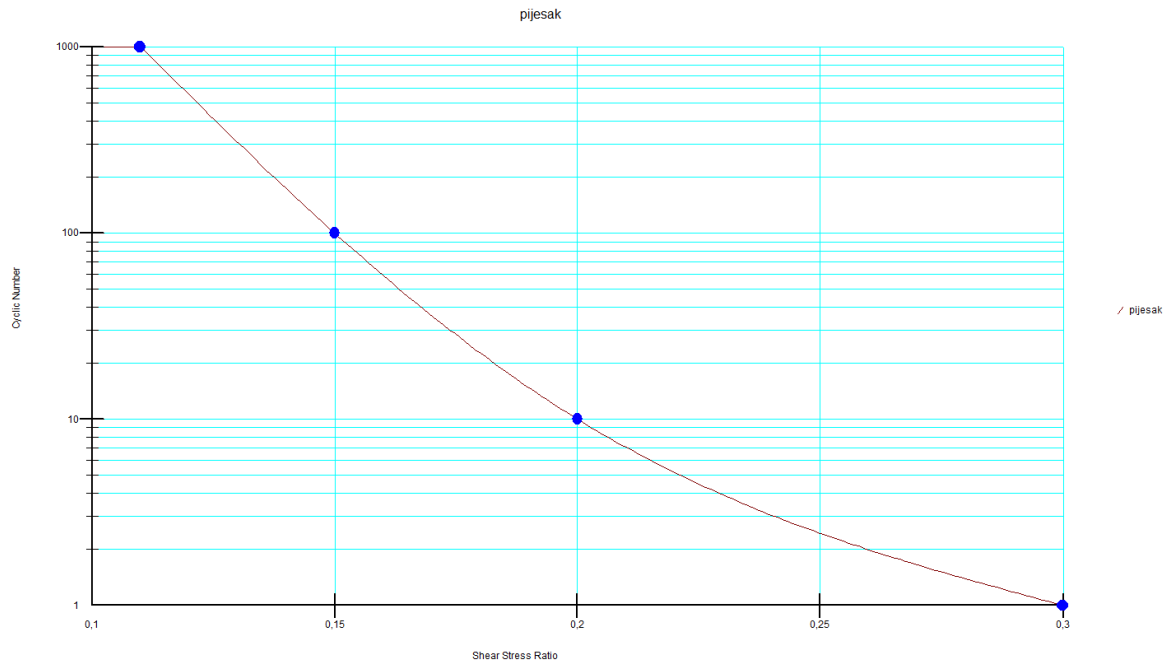
Prvi je zadatak bio zadati materijale pomoću funkcija koje će prikazivati prirodno ponašanje materijala u uvjetima potresa.



Slika 62. Krivulja redukcije modula posmika za materijal pijesak



Slika 63. Krivulja povećanja pornih tlakova za pijesak



Slika 64. Krivulja prigušenja za materijal pijeska

Define Earthquake Records (Horizontal) ? X

Imported Earthquake Information

Filename:

Peak Acc: 0,168 g

Peak Time: 8,22 seconds

Duration: 14 seconds

Import...
Paste Points

Modifiers

Modified Peak Acc: 0,175 g

Modified Duration: 14 seconds

Apply
Default

Baseline Correction

Earthquake Records (Modified)

Description:

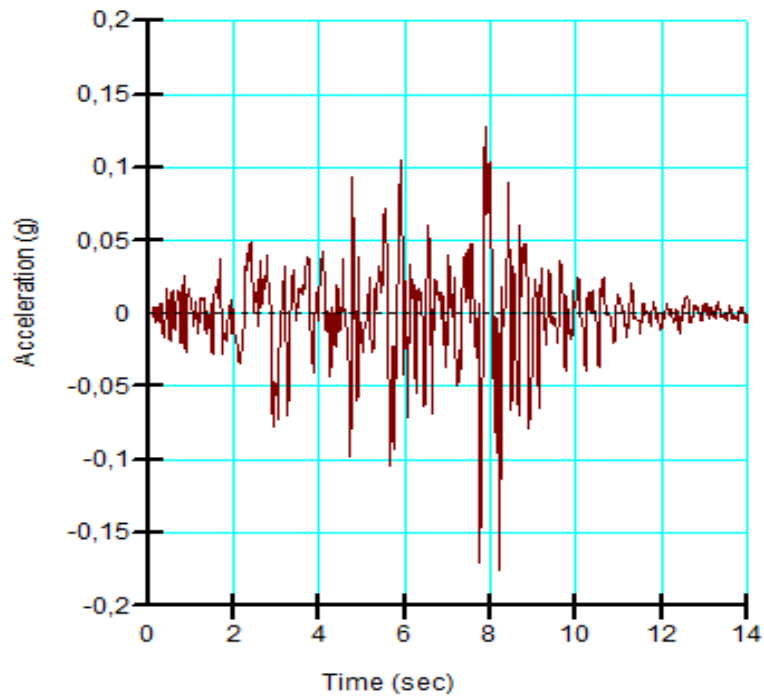
#	Time	Acc. (g)
1	0,01	3,7887623e-05
2	0,02	0,00065517095
3	0,03	0,0014058334
4	0,04	0,0011838751
5	0,05	0,00054643761
6	0,06	0,00056463761
7	0,07	0,00049971261

Delete
Delete All

Right-click for more options.

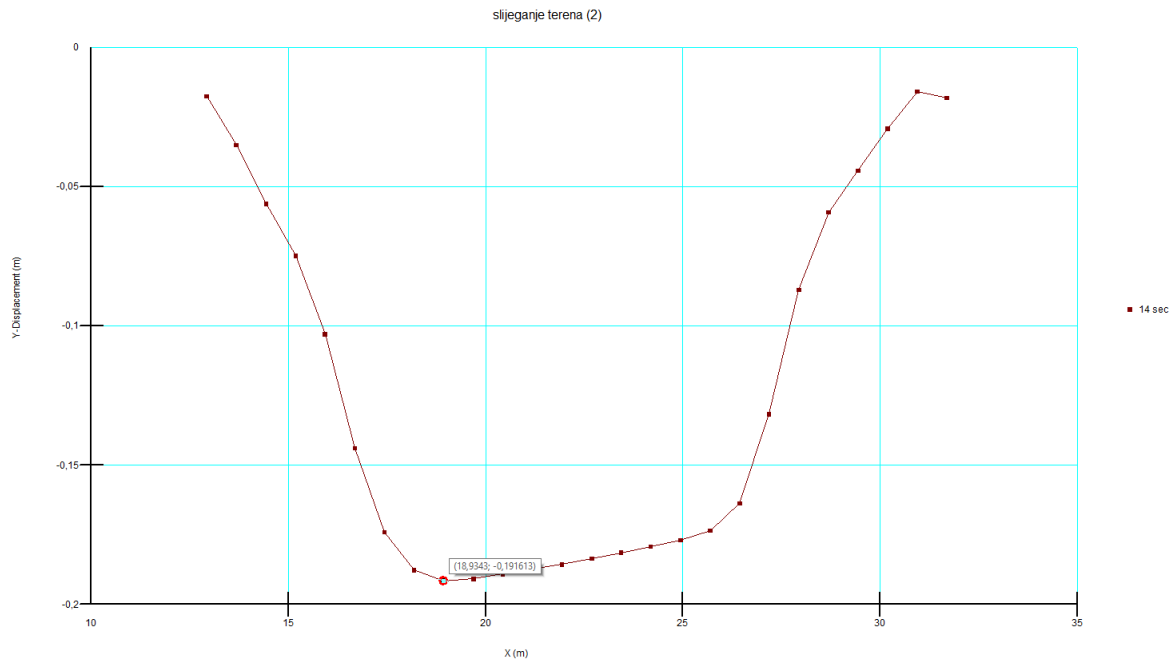
View... OK

Slika 65. Potresni zapis prilagođen seizmičkim koeficijentima predmetnog područja



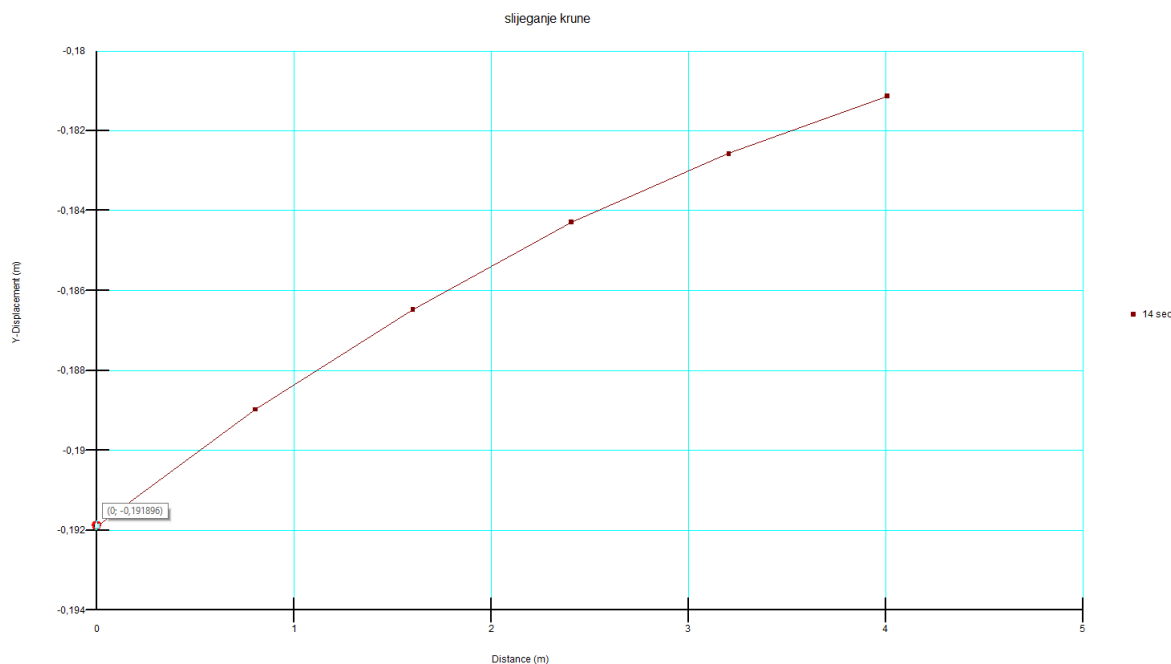
Slika 66. Potresni zapis u trajanju od 14 sekundi

Na grafu koji prikazuje slijeganje terena jasno je uočljivo da je najveće slijeganje ispod samog nasipa i da se smanjuje prema rubovima. Maksimalno slijeganje iznosi 19 cm.



Slika 67. Graf slijeganje terena bez ojačanja

Kod slijeganja krune jasno je vidljivo da je slijeganje najveće na lijevoj strani krune a da se smanjuje desnom dijelu krune, najveće slijeganje iznosi 19 cm.



Slika 68. Graf slijeganje krune bez ojačanja

Zbog većeg slijeganja se koristilo mlazno injektiranje a za simulaciju stupnjaka promijenjene su kohezija, kut trenja i modul elastičnosti u odnosu na sloj pijeska koji je prethodno bio zadan. Nakon zamjene materijala, odnosno postavljanja stupnjaka mlaznim injektiranjem jasno je vidljivo poboljšanje u vidu smanjenja slijeganja.

Stupnjaci:

$$2r = 80 \text{ cm}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,8^2 \times \pi}{4} = 0,503 \text{ m}^2$$

$$E_{\text{STUPNJAKA}} = 900 \text{ MPa}$$

$$\text{Na rasteru: } A = 3 \times 3 = 9 \text{ m}^2$$

Tlo:

$$A = 0,5 \times 1 = 0,5 \text{ m}^2$$

$$E = 9237,5 \text{ kPa}$$

$$A_{\text{TLO}} = 9 - 0,503 = 8,497 \text{ m}^2$$

Modul elastičnosti prema izrazu [20]:

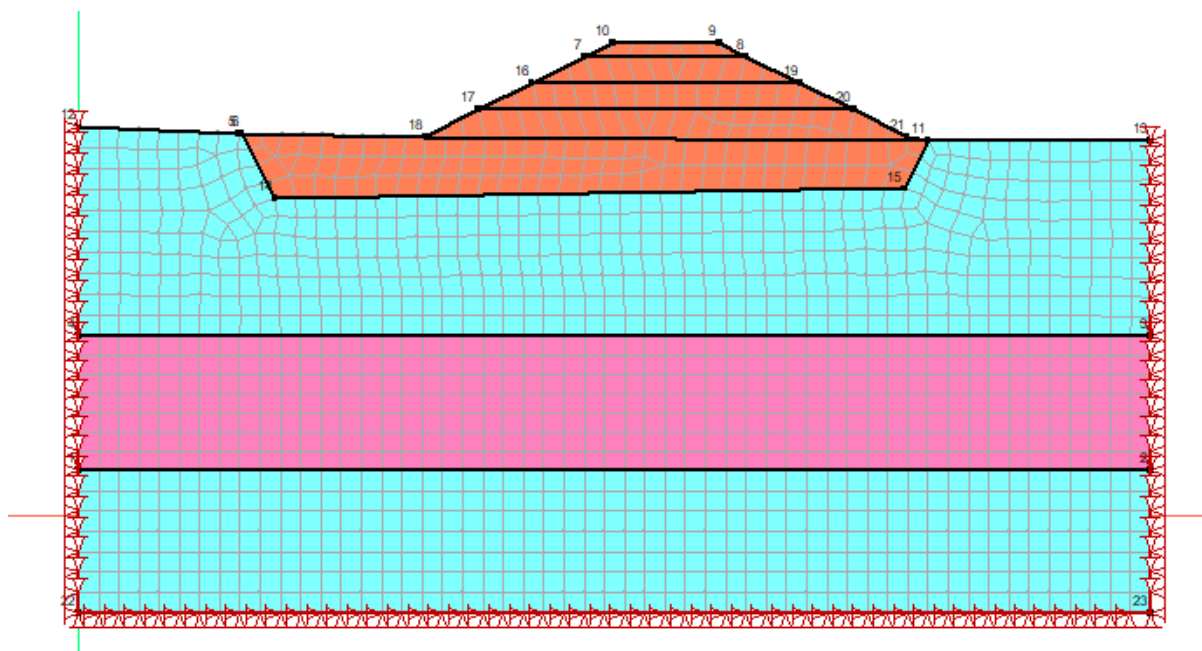
$$E = \frac{900 \cdot 0,503 + 9,2375 \cdot 8,497}{9} = 59,02 \text{ MPa} = 59021 \text{ kPa}$$

Kohezija prema izrazu [20]:

$$C = \frac{100 \times 0,503 + 1 \times 8,497}{9} = 6,5 \text{ kPa} \rightarrow C_k = 5,2 \text{ kPa} \rightarrow C_p = \frac{5,2}{1,25} = 4,2 \text{ kPa}$$

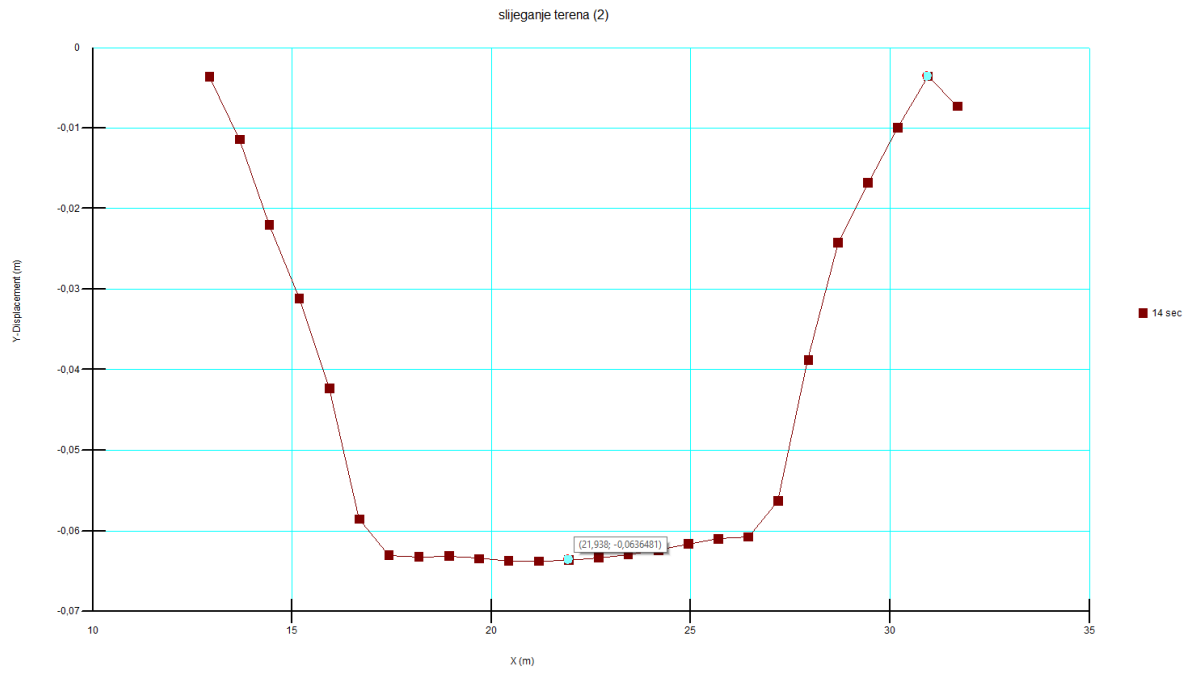
Kut trenja prema izrazu [20]:

$$\phi_k = \frac{\text{tg}(40) \cdot 0,503 + \text{tg}(32,5) \cdot 8,497}{9} = 32,96^\circ \rightarrow \phi_p = \frac{\text{tg}(32,96)}{1,25} = 27,42^\circ$$

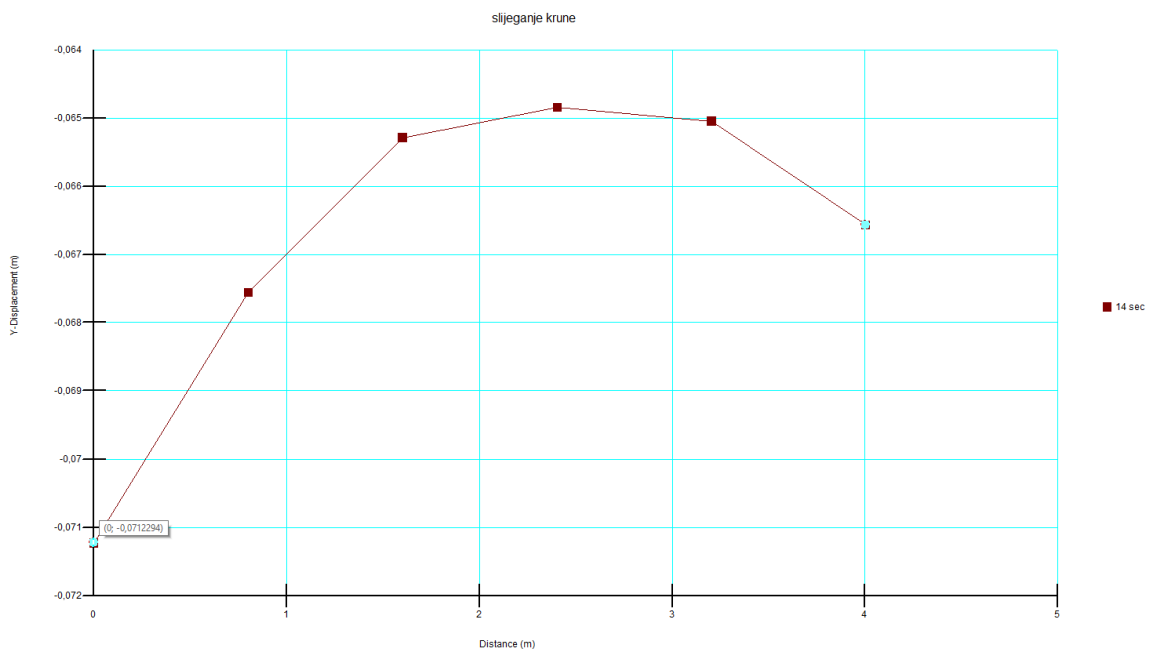


Slika 69. Simulacija stupnjaka, zamjena za materijal pijeska

Sa sljedećih slika je jasno vidljivo da je trend slijeganja terena isti kao i prethodni graf sa najvećim slijeganjem ispod sredine nasipa, a smanjuje se slijeganje prema krajevima nasipa. Razlika je u veličini slijeganja jer je najveće slijeganje sa ojačanjima 6,3 cm što je prihvatljivo u odnosu na slijeganje bez ojačanja. Kod slijeganja krune nasipa također vidimo poboljšanje u vidu smanjivanja slijeganja dok trendovi slijeganja ostaju isti, na rubovima je najveće slijeganje a smanjuje se prema sredini krune nasipa.



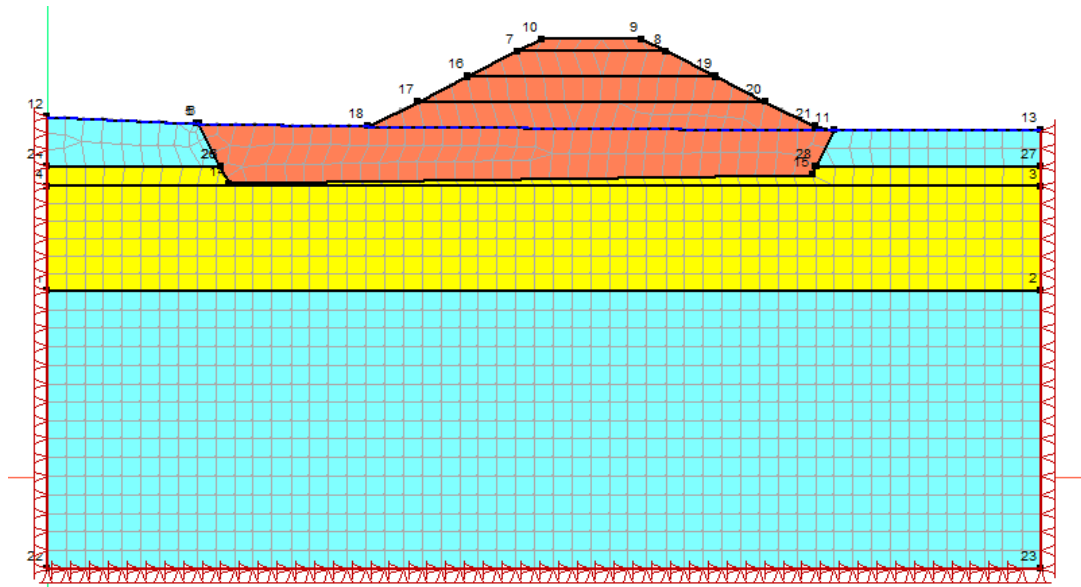
Slika 70. Graf slijeganje terena sa ojačanjem



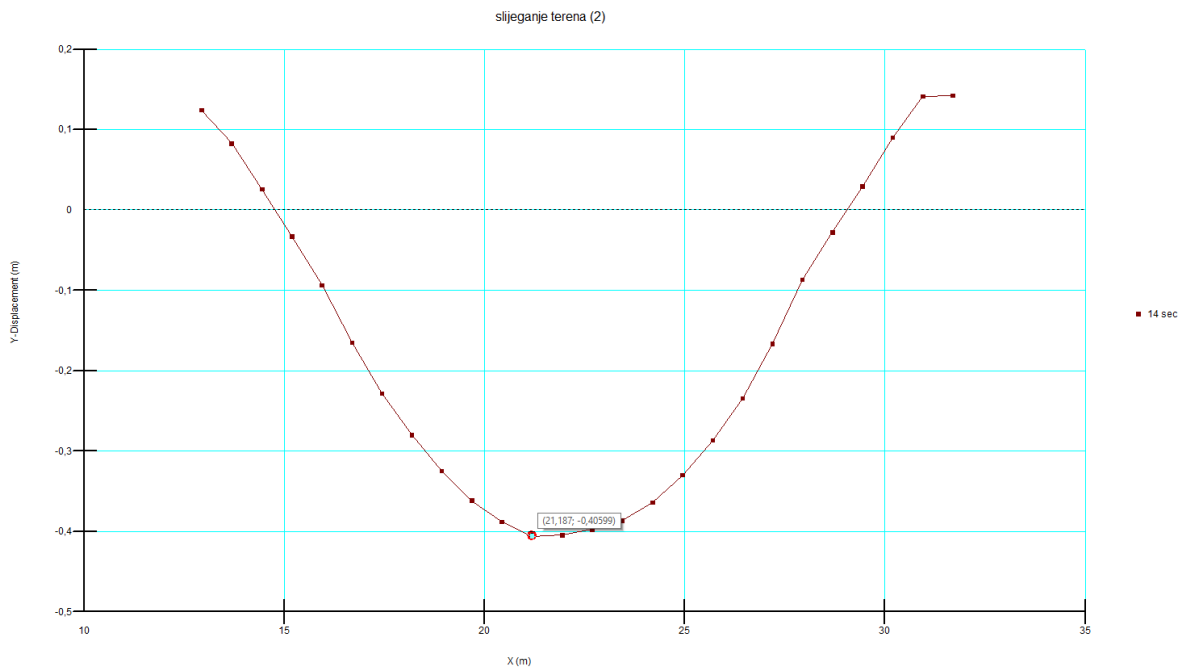
Slika 71. Graf slijeganja krune sa ojačanjem

4.3.2. Druga analiza

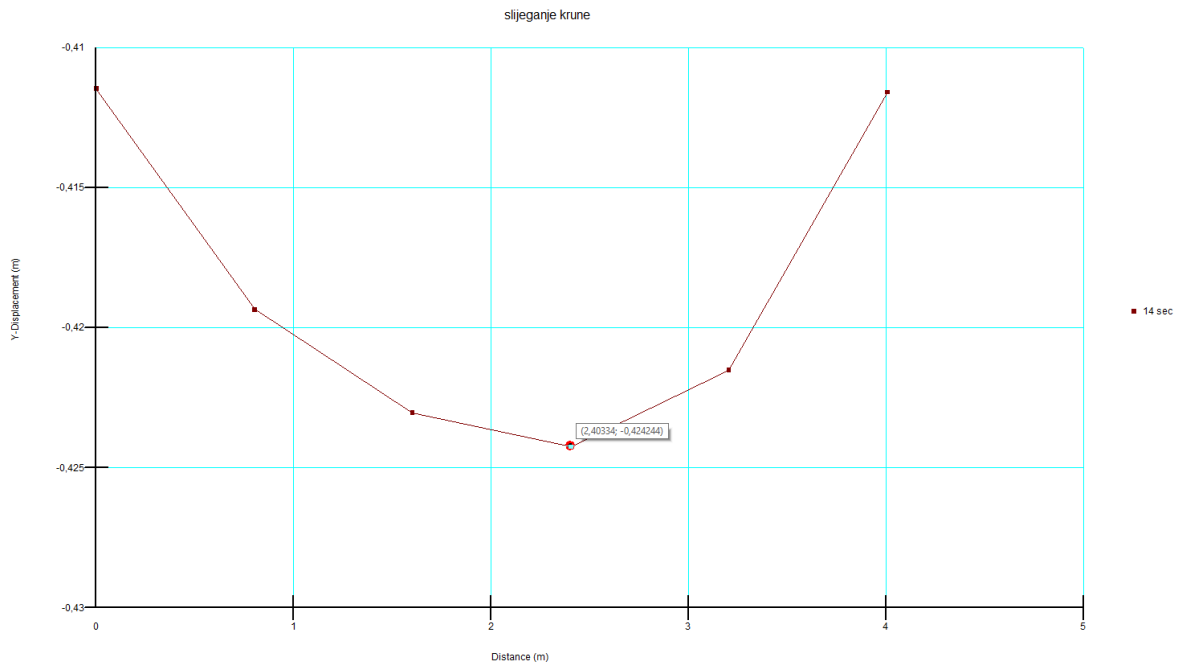
Kod druge dinamičke analize, geotehnička sredina pijeska je postavljena pliće zbog različitog položaja koja ta geotehnička sredina ima u uzdužnom profilu nasipa.



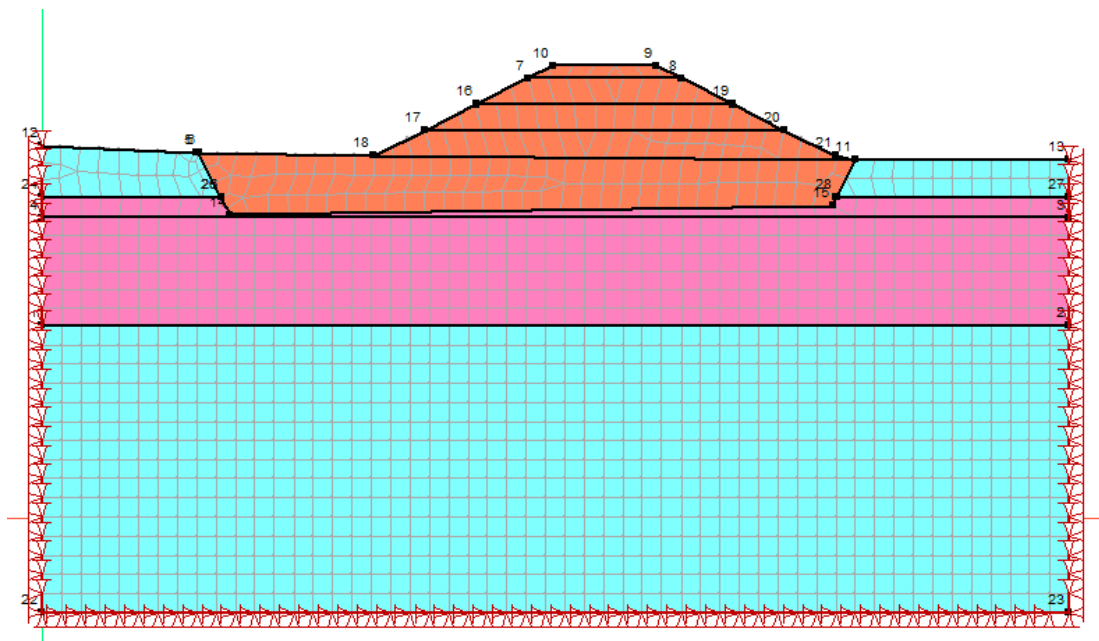
Slika 72. Zadavanje materijala-geotehnička sredina pijesak (SC) pliće položaj



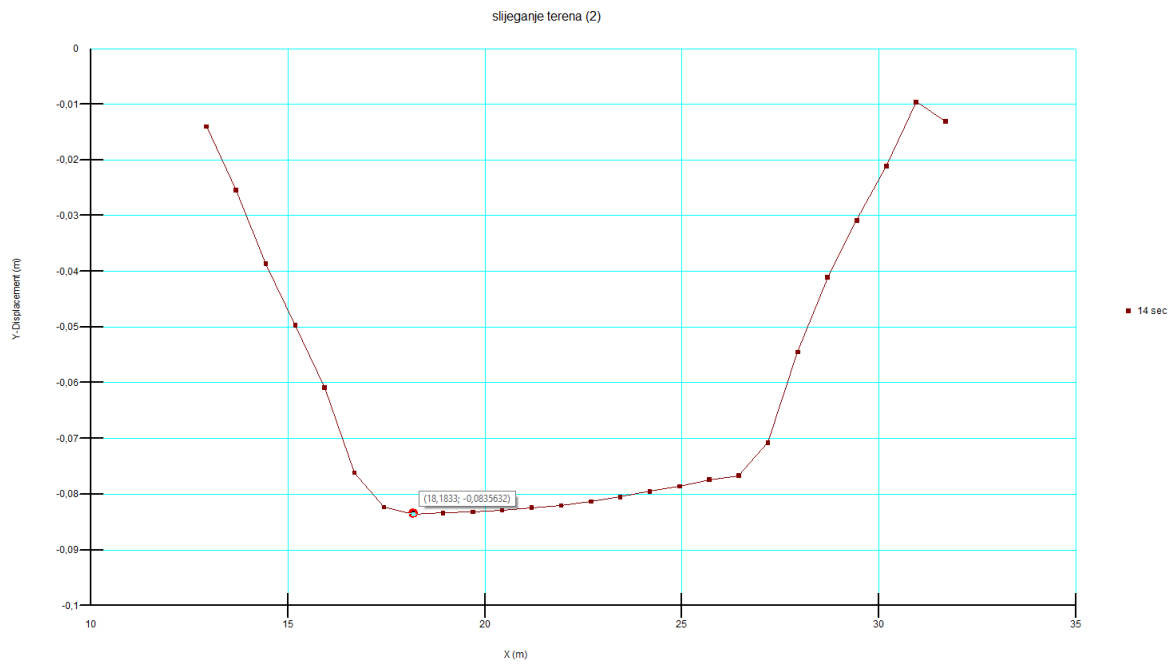
Slika 73. Slijeganje terena bez ojačanja, analiza 2



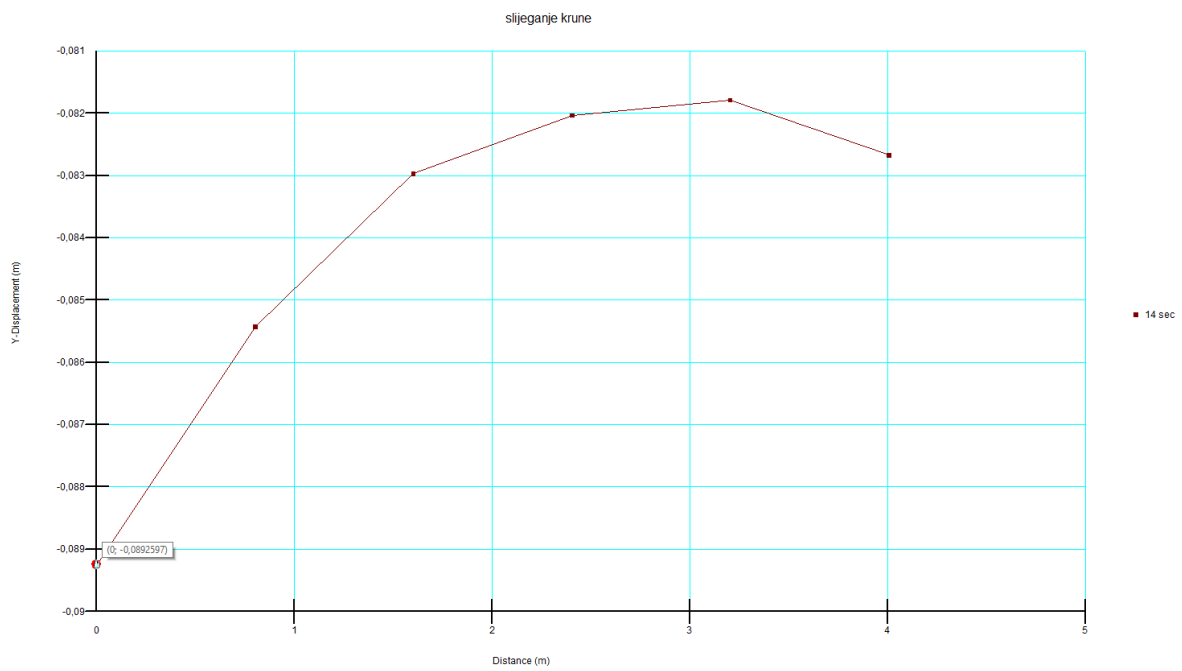
Slika 74. Slijeganje krune bez ojačanja, analiza 2



Slika 75. Simuliranje stupnjaka analiza 2



Slika 76. Slijeganje terena sa ojačanjem, analiza 2



Slika 77. Slijeganje krune sa ojačanjem, analiza 2

Tablica 9.: Slijeganja krune nasipa i temeljnog tla sa ojačanjima i bez ojačanja

1.Analiza	Slijeganje krune	Slijeganje terena
Bez ojačanja	0,19 m	0,19 m
Sa ojačanjem	0,07 m	0,06 m
2.Analiza	Slijeganje krune	Slijeganje terena
Bez ojačanja	0,42 m	0,40 m
Sa ojačanjem	0,089 m	0,083 m

5. TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE I PROGRAM KONTROLE KVALITETE

5.1. Opći uvjeti izvedbe

U ovom diplomskom radu potrebno je zadovoljiti sve uvjete rada prema zadanim standardima. Izvedba nasipa je od velike važnosti s obzirom na to da popuštanje ili oštećenje nasipa uzrokuje opasnost od poplava za lokalno područje Hrastelnice. Prema izvratku iz geotehničkog projekta [12] određeni su uvjeti izvedbe:

1. Skidanje površinskog sloja i deponiranje na privremenoj lokaciji sa strane
2. Iskop postojećeg nasipa materijala 40% frakcije pijeska i 60% koherentno tlo te zaglinjeni pijesak frakcije 50% pijeska i 50% koherentno tlo.
3. Iskop se vrši u nagibu 2:1 do dubine 2m. Materijal temeljnog tla je sličan materijalu nasipa.
4. Bušenje sa površine terena za mlazno injektiranje stupnjaka promjera 80 cm, prosječne visine 7 m na rasteru 3x3 m jednofluidnim postupkom.
5. Zbijanje temeljnog tla valjanjem do $M_s=20$ MPa
6. Nasipavanje temeljnog tla materijalom koji je nastao uslijed iskopa i to u slojevima po 30 cm.
7. Ugradnja dvoosne geomreže vlačne čvrstoće 30/30 kN/m.
8. Nasipavanje tijela nasipa materijalom koji je nastao uslijed iskopa.
9. Širina krune nasipa 4 m, a kota krune 1 m viša od 100-godišnje visoke vode.
10. Ugradnja geosintetika kao zaštita od erozije.
11. Izvedba podložnog puta.
12. Nasipavanje šljunkovitog materijala po kruni nasipa.
13. Humusiranje pokosa nasipa.
14. Sanacija okolnog terena.

Materijali iskopa nasipa i temeljnog tla su se tijekom izvođenja radova deponirali na privremenoj lokaciji na vodnoj strani nasipa, a s obzirom na obujam i vrijeme trajanja radova zaključeno je da je to prihvatljivo rješenje.

5.2. Izrada nasipa

Prema zahtjevima iz općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu izrada nasipa obuhvaća nasipavanje, razastiranje, te ovisno o potrebama sušenje ili vlaženje materijala. Slojevi materijala moraju bit razastrti vodoravno u uzdužnom smjeru ili nagibu koji je najbliži projektiranom nagibu nivelete, te se svaki sloj mora zbijati u svojoj zadanoj debljini. S obzirom na vrstu materijala koja je definirana u geotehničkom elaboratu određeno je da ovaj nasip pripada nasipima od zemljanih materijala koji uključuje gline niske do visoke plastičnosti, glinovite pijeske itd. Takva vrsta materijala se zbija mehanizacijom kao što su ježevi i VIBROploče [21].



Slika 78.:Glatki valjak (Izvor: [22])



Slika 79.:VIBROploča (Izvor: [23])

5.3. Polaganje geomreža

Prema općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu geomreže su vrsta geosintetika otvorene građe, koje preuzimaju vlačne sile u dva međusobno okomita smjera [24]. Proizvode se od polimernih vlakana:

- Polietilen
- Polipropilen
- Poliester
- Polivinilalkohol
- Polietilen visoke gustoće
- Aramid [24].

Pri izradi građevina geosintetici se koriste prilikom:

- Uređenja slabo nosivog tla
- Zaštita pokosa od erozije
- Zaštita dna pokosa
- Za izradu temeljnih madraca [24].

Prema Općim tehničkim uvjetima kod polaganja geomreža izrazito je važno da se ne smiju polagati na smrznuto tlo ili na snijeg, te da se ne postavljaju za vrijeme kišnog vremena. Strojno polaganje je uobičajeno za velika gradilišta dok se kod onih manjih uobičajeno postavlja ručno. Kad je geomreža položena na tlo ne smije se preko nje prelaziti strojevima kako ne bi došlo do oštećenja. Spajanje geomreža izvodi se preklapanjem ili spajanjem spojnica. Nakon toga polažu se u konačni položaj, a treba se obratiti pozornost da budu jednoliko napete u poprečnom i uzdužnom smjeru, a to se postiže zabijanjem klinova na rubovima [24].

Prema Općim tehničkim uvjetima iz knjige 1 navodi se da kad se spajanje izvodi preklapanjem:

- Širina preklopa ne smije bit manja od 25 cm u poprečnom smjeru
- Širina preklopa ne smije biti manja od 100 cm u uzdužnom smjeru
- U izvođenju prometnica, mora biti u zoni gdje je najveće trenje između traka [24].

Prema Općim tehničkim uvjetima iz knjige 1 navodi se da kad se spajanje izvodi pomoću spojnica:

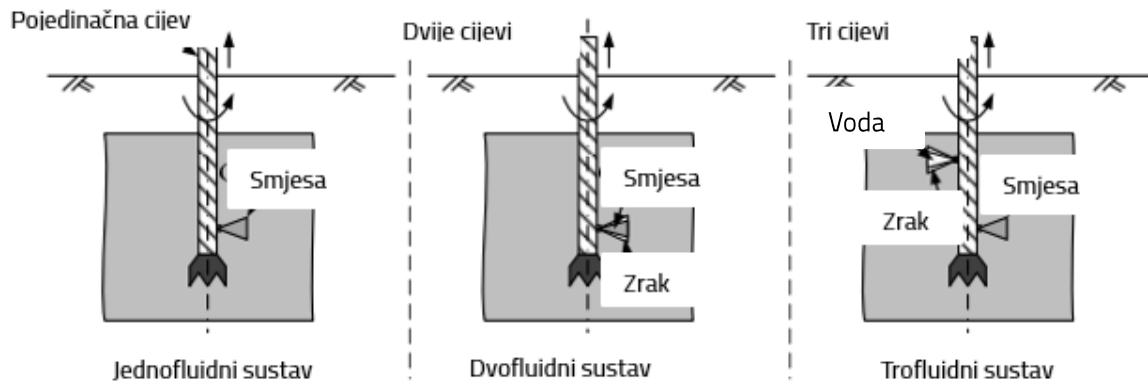
- Upotrebljavaju se nehrđajuće metalne spojnice, oblika slova „U“

- Minimalni profil spojnica 6 mm
- Udaljenost mora bit manja od 1 m
- Kad je veće od 1m potreban je preklop od 10 cm [24].

5.4. Izvedba mlazno injektiranih stupnjaka

Prema Općim tehničkim uvjetima iz 12.poglavlja mlazno injektiranje se koristi za poboljšanje mehaničkih i fizikalnih karakteristika tla, ubacivanjem materijala pod tlakom u tlo. Tri su osnovna postupka mlaznog injektiranja:

- Jednofluidni sustav
- Dvofluidni sustav
- Trofluidni sustav [25].



Slika 80.:Postupci mlaznog injektiranja (Izvor: [26])

Izvođenje mlaznog injektiranja sastoji se od dvije osnovne radnje a to su:

1. Izvedba bušotine do predviđene dubine bez injektiranja.
2. Povratna operacija koja uključuje injektiranje pod tlakom od 300–600 bara [25].



Slika 81.:Mlazno injektiranje (Izvor: [27])

Prema Općim tehničkim uvjetima iz 12.poglavlja bušenje se vrši šipkama sa nosačem mlaznica i bušačom krunom do projektirane dubine. U drugoj fazi odnosno fazi povratne operacije provodi se rezanje tla, injektiranje i proširenje [25].

Prilikom izvođenja radova iz Općih tehničkih uvjeta za geotehničke radove se zahtijevaju sljedeći postupci kontrole:

- Bilježenje podataka izvedbe
- Kontrola čvrstoće i krutosti injektiranog volumena tla
- Procjena promjera injektiranih valjaka
- Procjena poboljšanja tla
- Osiguranje kontinuiteta zavjese [25].

5.5. Kontrola kvalitete

Kontrola kvalitete radova obavlja se tekućim i kontrolnim ispitivanjima. Tekućim ispitivanjima se određuje stupanj zbijenosti u odnosu na standardni Proctorov pokus i određivanje modula stišljivosti kružnom pločom od 30 cm najmanje na svakih 1000 m² svakog sloja nasipa. Ukoliko rezultati zadovoljavaju nadzorni inženjer će odobriti kontrolna ispitivanja i nasipavanje novog sloja. Kontrolnim ispitivanjima se određuje stupanj zbijenosti u odnosu na standardni Proctorov test i određivanje stupnja stišljivosti kružnom pločom 30 cm najmanje na svakih 2000 m² svakog sloja [21].

U smislu osiguranja kvalitete prema Općim tehničkim uvjetima iz knjige 1 provode se ispitivanja sljedećih tehničkih svojstava:

- Sadržaj vode,
- Granulometrijski sastav,
- Udio sitnih čestica,
- Suha prostorna masa,
- Optimalni sadržaj vode,
- Granica tečenja,
- Indeks plastičnosti [21].

6. ZAKLJUČAK

Izgradnja nasipa za obranu od poplava jedan je od najvažnijih čimbenika za funkcionalnost određenog područja koje se nalazi u blizini vode. Nasip osim što ima primarnu funkciju obrane od poplave također može poslužiti i kao prometnica. Osim klasičnih oštećenja nasipa koje nastaju uslijed nastanka kliznih ploha kao jedan od rijetkih uzroka nestabilnosti je pojava likvefakcije. Sama likvefakcija je vezana uz potres a razorni potres koji je pogodio Sisačko-moslavačku županiju uzrokovao je velika oštećenja. Na temelju geotehničkog elaborata i rezultata iz istražnih bušotina napravljena je detaljna analiza za izračun geotehničkih parametara na temelju poznatih geotehničkih korelacija navedenih u literaturi. Na temelju geotehničkih proračuna provedenih u računalnim modelima za dinamičku analizu simulacije potresa i analize slijeganja te usporedbom analiza slijeganja sa i bez simuliranih stupnjaka jasno je ustanovljeno kako injektiranje mlaznih stupnjaka značajno smanjuje slijeganje te time osigurava sigurnost nasipa. U analizama procjeđivanja dobiven je uvid u stanje hidrauličkih gradijenata sa likvefakcijskom pukotinom i kad je ona sanirana. U analizama stabilnosti u kojima su zadane različite situacije od visoke razine vode, niske razine vode, naglog sniženja vodostaja, analizama utjecaja potresa sa pozitivnim i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja, te potresom u nedreniranim uvjetima jasno je vidljivo da sa stavljanjem geosinetika i ukopavanjem materijala nasipa 2m u temeljno tlo faktori sigurnosti su zadovoljavajući tj. $FS > 1$ što znači da je nasip siguran i da ne postoji opasnost od klizanja.

POPIS LITERATURE

- [1] Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M.S., »Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva,« *Građevinar*, pp. 944-956, 10. Studeni 2020.
- [2] Bačić, M., *Plitko temeljenje-predavanje iz kolegija Temeljenje*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [3] CIRIA, METS, USACE, *The international levee handbook*, London: CIRIA, 2013.
- [4] Bačić, M., *Blok 2-Nasute građevine, predavanje iz kolegija Nasipi i kosine*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [5] Roje-Bonacci T., *Nasute građevine*, Split, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2015..
- [6] Martinec M., »Metode prevencije likvefackije,« *Tehnički glasnik*, pp. 157-160, Veljača 2014..
- [7] Bačić, M., *Blok 1-Kosine, predavanje iz kolegija Nasipi i kosine*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [8] Kovačević, M.S., *Kolegij: Ojačanje tla i stijena, predavanje: Mlazno injektiranje*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [9] Kovačević, M.S., *Kolegij: Ojačanje tla i stijena, predavanje: Vibracijsko zbijanje, vibro-sonda, Dinamičko zbijanje, Brzo udarno zbijanje, Miniranje*, Zargeb: Građevinski fakultet, 2024..
- [10] Kovačević, M.S., *Kolegij: Ojačanje tla i stijema, predavanje: Virbracijsko punjenje-šljunčani piloti*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [11] Bačić, M., *Kolegij: Geotehnika i zaštita okoliša, predavanje: Geosintetici i njihova podjela*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024..
- [12] Centar građevinskog fakulteta d.o.o., »Projekt održavanja lijevog obalnog nasipa rijeke Save n.km 106+200 do n.mk 106+600, u naselju Hrastelnia, Sisačko-Moslavačka županija,« Građevinski fakultet, Zagreb, 2021..

- [13] Pikija, M., Osnovna geološka karta, L 33-93, Sisak, Zagreb: Geološki zavod, 1987..
- [14] Centar Građevinskog Fakulteta d.o.o., »Geotehnički elaborat za održavanje lijevoobalnog nasipa rijeke Save,« Građevinski fakultet, Zagreb, 2021..
- [15] Ivšić, T., Maranić, Z., »Geotehničko inženjerstvo, pomoćni dijagrami, tablice i formule za ispit,« Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [16] Bačić M., *kolegij: Geotehnički projekt, predavanje: 'Odabir geotehničkih parametara'*, Zagreb: Građevinski fakultet, 2024..
- [17] Weltman, A.J., Head, J.M., Site investigation manual, Construction Industry Research and Information Association, 1983..
- [18] Bowles, J.E., Foundation analysis and design, The McGraw-Hill Companies Inc, 1997.
- [19] Muromachi et al Broms, »Penetration test,« Singapore, 4th International geotechnical seminar, 1986..
- [20] Kovačević, M.S., *kolegij: Ojačanje tla i stijena, vježbe: Ojačanje stupnjacima*, Zagreb, Građevinski fakultet, 2024.
- [21] Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, »Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu, KNJIGA 2; "Gradnja i održavanje komunalnih vodnih građevina", 2.poglavlje: Zemljani radovi,« 2012.. [Mrežno]. Available: https://voda.hr/sites/default/files/2022-04/poglavlje_2-zemljani_radovi_0.pdf. [Pokušaj pristupa 25. Listopad 2024].
- [22] RO-TEHNOLOGIJA, »TVRTKA BMT-GRAĐEVINSKI STROJEVI,« [Mrežno]. Available: <http://www.rotech.hr/222/tvrtki-bmti-c-gracevinski-strojevi-international-doo-strabag-doo-isporucili-smo-novi-valjak-c-hamm-hd-90i-vv.html>. [Pokušaj pristupa 20. Listopad 2024.].
- [23] DAR, »Reverzibilna vibro ploča Wacker BPU2540,« [Mrežno]. Available: <https://dar.hr/reverzibilne-vibro-ploce/wacker-bpu2540/>. [Pokušaj pristupa 21. Listopad 2024.].
- [24] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Institut IGH d.d., »Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu; Knjiga 1: Gradnja i održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina za melioracije; 3.poglavlje: Polaganje geotekstila i geomreža,« prosinac 2010.. [Mrežno]. Available:

https://voda.hr/sites/default/files/2022-04/poglavlje_3-polaganje_geotekstila_i_geomreasa.pdf. [Pokušaj pristupa 7 Studeni 2024.].

- [25] Centar Građevinskog fakulteta d.o.o., Institut IGH d.d., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, »Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu; 12.poglavlje geotehnički radovi,« lipanj 2022.. [Mrežno]. Available: <https://voda.hr/sites/default/files/2023-02/Poglavlje%2012.%20Geotehnicki%20radovi.pdf>. [Pokušaj pristupa 9. studeni 2024.].
- [26] Shen, Ho, Wang, »Ground Improvement and Geosynthetics,« *Geotechnical Special Publication*, pp. 107-116, Svibanj 2014.
- [27] Ubanni Omina, »Deep soil mixing,« 22 Listopad 2022. [Mrežno]. Available: https://structville.com/deep-soil-mixing?utm_content=cmp-true. [Pokušaj pristupa 29 Studeni 2023].

POPIS SLIKA

Slika 1.: Likvefakcija (Izvor: [2]).....	2
Slika 2.: Likvefakcija kod nasipa (Izvor: [4]).....	3
Slika 3.: Učinak likvefakcije na nasip (Izvor: [5]).....	4
Slika 4.: Plitka klizna ploha nizvodna strana (Izvor: [4]).....	5
Slika 5.: Plitka klizna ploha uzvodna strana (Izvor: [4]).....	5
Slika 6.: Duboke klizne plohe (Izvor: [4]).....	5
Slika 7.: Translacijsko gibanje (Izvor: [4]).....	5
Slika 8.: Vanjska erozija-prelijevanje preko nasipa (Izvor: [4]).....	6
Slika 9.: Nestabilnost temeljnog tla na uzgon (Izvor: [4]).....	6
Slika 10.: Hidraulički slom uslijed prevelikog gradijenta (Izvor: [4]).....	7
Slika 11.: Postupak izvođenja mlaznog injektiranja (Izvor: [8]).....	8
Slika 12.: Princip izvođenja vibracijskog zbijanja (Izvor: [9]).....	8
Slika 13.: Princip izvođenja vibracijskog punjenja (Izvor: [10]).....	9
Slika 14.: Zbijanje čestica koherentnog i nekoherentnog tla (Izvor: [4]).....	9
Slika 15.: Postavljanje geomembrana (Izvor: [4]).....	10
Slika 16.: Bentonitni tepisi (Izvor: [4]).....	10
Slika 17.: Geomreže (Izvor: [11]).....	11
Slika 18.: Dionica za obnovu (Izvor: [12]).....	12
Slika 19.: Oštećenja nasipa (Izvor: [12]).....	12
Slika 20.: Likvefakcijske pukotine (Izvor: [12]).....	13
Slika 21.: Shematski prikaz sanacije (Izvor: [12]).....	14
Slika 22.: OGK Siska (Izvor: [13]).....	15
Slika 23.: Tektonika predmetnog područja (Izvor: [13]).....	16
Slika 24.: Inženjersko-geološki profil duž nasipa.....	18
Slika 25.: Profil bušotine B-1 (Izvor: [14]).....	19
Slika 26.: Profil bušotine B-2 (Izvor: [14]).....	20
Slika 27.: Profil bušotine B-3 (Izvor: [14]).....	21
Slika 28.: Profil bušotine B-4 (Izvor: [14]).....	22
Slika 29.: Rezultati qc iz CPT pokusa za bušotine B-1, B-2, B-3, B-4 (Izvor: [14]).....	23
Slika 30.: Koeficijent propusnosti za bušotine B-1 i B-2 (Izvor: [14]).....	24
Slika 31.: Koeficijent propusnosti za bušotine B-3 i B-4 (Izvor: [14]).....	25
Slika 32.: Dijagram ovisnosti indeksa plastičnosti i koeficijenta f_2 (Izvor: [15]).....	27
Slika 33.: Karte potresnog područja (Izvor: [14]).....	43

Slika 34. Zadavanje materijala-postojeće stanje, analiza procjeđivanja	44
Slika 35. Prikaz kontura hidrauličkih gradijenata pri visokoj vodi, stacionarna analiza	45
Slika 36. Graf hidrauličkih gradijenata, stacionarna analiza.....	45
Slika 37. Graf punjenja i pražnjenja.....	46
Slika 38. Zadavanje rubnih uvjeta.....	46
Slika 39. Prikaz kontura hidrauličkih gradijenata pri nestacionarnom strujanju, tijekom trećeg dana	47
Slika 40. Graf hidrauličkih gradijenata u vremenu, nestacionarna analiza	47
Slika 41. Karakteristike geomreža.....	48
Slika 42. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima niske vode.....	49
Slika 43. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima niske vode.....	49
Slika 44. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode.....	50
Slika 45. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode.....	50
Slika 46. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima naglog sniženja vode	51
Slika 47. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima naglog sniženja vode	51
Slika 48. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode i pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja	52
Slika 49. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode i pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja	52
Slika 50. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja	53
Slika 51. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode i negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja	53
Slika 52. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode, pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima.....	54
Slika 53. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode, pozitivnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima.....	54
Slika 54. Stabilnost desnog pokosa pri uvjetima visoke vode, negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima.....	55
Slika 55. Stabilnost lijevog pokosa pri uvjetima visoke vode, negativnim vertikalnim koeficijentom ubrzanja i u nedreniranim uvjetima.....	55
Slika 56. Konture hidrauličkih gradijenata za nisku vodu	56
Slika 57. Konture hidrauličkih gradijenata za visoku vodu	57
Slika 58. Graf hidrauličkih gradijenata za visoku vodu	57
Slika 59. Konture hidrauličkih gradijenata za naglo spuštanje vode.....	58
Slika 60. Funkcija zadavanja i spuštanja vode.....	58
Slika 61. Zadavanje materijala u Quake-u	59

Slika 62. Krivulja redukcije modula posmika za materijal pijesak	60
Slika 63. Krivulja povećanja pornih tlakova za pijesak.....	60
Slika 64. Krivulja prigušenja za materijal pijeska	61
Slika 65. Potresni zapis prilagođen seizmičkim koeficijentima predmetnog područja.....	61
Slika 66. Potresni zapis u trajanju od 14 sekundi	62
Slika 67. Graf slijeganje terena bez ojačanja.....	62
Slika 68. Graf slijeganje krune bez ojačanja	63
Slika 69. Simulacija stupnjaka, zamjena za materijal pijeska	64
Slika 70. Graf slijeganje terena sa ojačanjem	65
Slika 71. Graf slijeganja krune sa ojačanjem.....	65
Slika 72. Zadavanje materijala-geotehnička sredina pijesak (SC) plići položaj	66
Slika 73. Slijeganje terena bez ojačanja, analiza 2.....	66
Slika 74. Slijeganje krune bez ojačanja, analiza 2	67
Slika 75. Simuliranje stupnjaka analiza 2.....	67
Slika 76. Slijeganje terena sa ojačanjem, analiza 2	68
Slika 77. Slijeganje krune sa ojačanjem, analiza 2.....	68
Slika 78.:Glatki valjak (Izvor: [22]).....	71
Slika 79.:VIBROploča (Izvor: [23])	71
Slika 80.:Postupci mlaznog injektiranja (Izvor: [26]).....	73
Slika 81.:Mlazno injektiranje (Izvor: [27]).....	74

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Podaci o bušotinama (Izvor: [14]).....	17
Tablica 2.: Podaci o poziciji CPT ispitivanju (Izvor: [14]).....	17
Tablica 3.: Karakteristične vrijednosti sloja nasipa (CL/SC)	32
Tablica 4.: Karakteristične vrijednosti sloja gline (CL)	37
Tablica 5.: Karakteristične vrijednosti sloja pijeska (SC).....	42
Tablica 6.: Iskustveni odnos karakteristične i srednje vrijednosti (Izvor: [15]).....	42
Tablica 7.: Sumarna tablica karakterističnih vrijednosti parametara.....	43
Tablica 8.: Faktori sigurnosti.....	56
Tablica 9.: Slijeganja krune nasipa i temeljnog tla sa ojačanjima i bez ojačanja	69