

Primjena tehnologije šljunčanih stupova za projektiranje sanacije državne ceste DC 44, dionica 002, lokacija Ponte Porton - Buzet

Vižintin, Alessia

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:812501>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Alessia Vižintin

**PRIMJENA TEHNOLOGIJE ŠLJUNČANIH STUPOVA ZA PROJEKTIRANJE
SANACIJE DRŽAVNE CESTE DC 44, DIONICA 002, LOKACIJA PONTE
PORTON - BUZE**

Diplomski rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva
Urbano inženjerstvo
Temeljenje**

**Alessia Vižintin
JMBAG: 01140341055**

**PRIMJENA TEHNOLOGIJE ŠLJUNČANIH STUPOVA ZA PROJEKTIRANJE
SANACIJE DRŽAVNE CESTE DC 44, DIONICA 002, LOKACIJA PONTE
PORTON - BUZE**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Alessia Vižintin

U Rijeci, 10. rujna 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se tvrtki Rijeka projekt d.o.o. na ustupljenoj dokumentaciji i podršci tijekom izrade ovog diplomskog rada. Posebnu zahvalnost upućujem gospodinu Dinu Zuljani iz navedene tvrtke na pruženoj pomoći.

Također, veliko hvala mom mentoru, izv. prof. dr. sc. Leu Matešiću, dipl. ing. građ., s Katedre za geotehniku na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, na stručnoj podršci, korisnim sugestijama i vodstvu tijekom cijelog procesa izrade rada.

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad bavi se primjenom šljunčanih stupnjaka za poboljšanje tla ispod nasipa državne ceste DC44 koja prolazi kroz područje loših geotehničkih uvjeta. Cesta je ključna za prometno povezivanje sjevernog i zapadnog dijela Istre, no problem nestabilnog tla uzrokuje deformacije kolnika i prijeti dugoročnoj stabilnosti. Kroz numeričke analize u softveru Settle3, istražena je učinkovitost šljunčanih stupnjaka u smanjenju deformacija i povećanju nosivosti tla. Analize su pokazale da primjena šljunčanih stupnjaci značajno smanjuje sljeganje i poboljšava stabilnost nasipa, čime se osigurava dugovječnost kolničke konstrukcije. Rad također prikazuje druge metode poboljšanja tla i uspoređuje njihovu učinkovitost u sličnim geotehničkim uvjetima. Zaključno, šljunčani stupnjaci predstavljaju ekonomski isplativo i učinkovito rješenje za sanaciju slabonosivih nasipa.

Ključne riječi: šljunčani stupnjaci, poboljšanje tla, DC44, nasipi, geotehnički uvjeti, Settle3, deformacije, nosivost

ABSTRACT

This thesis focuses on the application of aggregate columns for soil improvement beneath the embankment of the state road DC44, which passes through an area with poor geotechnical conditions. The road is crucial for the traffic connection between the northern and western parts of Istria, but unstable soil causes pavement deformations, threatening long-term stability. Through numerical analyses in the Settle3 software, the effectiveness of aggregate columns in reducing deformations and increasing soil bearing capacity was investigated. The analyses showed that the use of aggregate columns significantly reduces settlement and improves embankment stability, ensuring the longevity of the pavement structure. The thesis also presents other soil improvement methods and compares their effectiveness in similar geotechnical conditions. In conclusion, aggregate columns represent a cost-effective and efficient solution for stabilizing weak embankments.

Key words: aggregate columns, soil improvement, DC44, embankments, geotechnical conditions, Settle3, deformations, bearing capacity

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1.MJERE POBOLJŠANJA TLA.....	3
1.1. Povijesni pregled mjera poboljšanja tla.....	4
1.2. Podjela i opis mjera poboljšanja.....	5
1.3. Primjenjivost mjera poboljšanja tla.....	6
2. ŠLJUNČANI STUPNJACI.....	8
2.1. Opis i vrste stupnjaka	8
2.2. Primjena stupnjaka.....	8
2.3. Nosivost stupnjaka.....	10
2.3.1. <i>Povećanje nosivosti temeljnog tla</i>	11
2.3.2. <i>Smanjenje i/ili ubrzanje slijeganja</i>	12
2.4. Tehnike izvođenja radova.....	12
2.5. Oprema koja se koristi pri izvedbi agregatnih stupnjaka	13
2.6. Korišteni agregat i alternativa agregatu	14
2.7. Projektiranje.....	16
2.7.1. <i>Postupak projektiranja</i>	17
2.7.2. <i>Koncept jedinične ćelije</i>	18
2.7.3. <i>Omjer naprezanja</i>	19
2.7.5. <i>Priebova metoda za projektiranje šljunčanih stupnjaka</i>	24
2.7.5. <i>Povećanje posmične čvrstoće</i>	32
2.8. Provjera poboljšanja tla.....	33
3.1. Uvod.....	36
3.2. Tehnički opis	36
3.2.1. <i>Općenito</i>	36
3.2.2. <i>Oblik i veličina građevne čestice</i>	37
3.2.3. <i>Namjena građevine</i>	37
3.2.4. <i>Smještaj građevine</i>	37
3.2.3. <i>Postojeće stanje</i>	38
3.2.4. <i>Kategorizacija trase obzirom na oštećenje i prijedlog tipa sanacije</i>	39
3.3. Terenski istražni radovi.....	42
3.3.1. <i>Istražno bušenje</i>	42
3.3.2. <i>Standardni penetracijski test - SPT</i>	43
3.3.3. <i>Uzorkovanje neporemećenih (NU) i poremećenih (PU) uzoraka</i>	44
3.3.3. <i>Geotehnička klasifikacija jezgre bušenja</i>	45

3.4. Laboratorijski istražni radovi.....	46
3.5. Inženjersko-geološka istraživanja.....	51
3.5.1. Osnovne geološke značajke istraživanog područja	51
3.5.2. Inženjerskogeološke značajke istraživanog područja	52
3.6. Geotehničke karakteristike tla	53
3.7. Geotehnički proračuni pomoću programa Settle 3	55
3.7.1. Opis programskog softvera SettI3	55
3.7.2. Ulazni podaci modela	55
3.7.3. Rezultati provedene analize	57
3.7.4. Rezultata analize iz projekta sanacije DC 44	60
3.7.4. Zaključak provedenih analiza	63
4. ZAKLJUČAK.....	64
5.1. Sondažni profili	67
5.1.1. Sondažni profil S-1	67
5.1.2. Sondažni profil S-2	69
5.1.3. Sondažni profil S-3	71
5.1.4. Sondažni profil S-4	73
5.1.5. Sondažni profil S-5	75
5.1.6. Sondažni profil S-6	77
5.2. Situacije s prikazom izvedenih istražnih radova od km 0+000 do km 5+200 te od km 5+200 do km 10+100	79

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrsta odabrane sanacije pod duljini trase	41
Tablica 2. Pregled izvedenih istražnih bušotina	43
Tablica 3. Rezultati standardnog penetracijskog testa.....	44
Tablica 4. Ispitivanja koja su vršena na uzorcima tla.....	46
Tablica 5. Ulazni podaci za model 1 i 2.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjenjivost stupnjaka na različite vrste tla[1].....	10
Slika 2. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja ϕ' , kohezije c' i kohezije u nedreniranom stanju c_u u ovisnosti o konzistentnom stanju za vezana tla[4]	11
Slika 3 Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja ϕ' u ovisnosti o gustoći i obliku zrna za nevezana tla[4]	11
Slika 4. Okvirne vrijednosti modula stišljivosti E_s za nevezana tla i vezana tla[4].....	12
Slika 5. Top feed vibro-replacement (desno) i bottom feed vibro-displacement tehnike....	13
Slika 6. Poprečan presjek tipičnog vibratora	13
Slika 7.Postupak izvođenja nabijenih agregatnih stupova	14
Slika 8. Trokutni raspored stupnjaka[1]	18
Slika 9. Jedinična ćelija[1].....	18
Slika 10. Tlocrt stupnjaka s aproksimiranom površinom (lijevo) i pretpostavka proračuna (desno)[1]	19
Slika 11. Vrste sloma tla pojedinačnog stupnjaka u homogenom mekom tlu-bačvasti slom, posmični slom i slom probojem[1].....	21
Slika 12. Vrste sloma tla pojedinačnog stupnjaka u nehomogenom kohezivnom tlu - bačvasti ili posmični slom, lokalna pojava bačvastog sloma u tankom sloju i debljem sloju tla.....	21
Slika 13. Vrste sloma tla grupe stupnjaka - lokalno bočno kretanje i kružna klizna ploha, bačvast slom male grupe stupnjaka, slom probojem kratkih stupnjaka u grupi.....	22
Slika 14. Usporedba elastičnih teorija i terenskog iskustva	23
Slika 15. Prikaz analize metodom prosječnog naprežanja.....	32
Slika 16. Sanirani segmenti kolnika[Google karte].....	38
Slika 17. Deformacije na kolniku[Google karte]	38
Slika 18. Deformacije na rubu kolnika[Google karte]	39
Slika 19. Uređenje temeljnog tipa tla - TIP 1	39
Slika 20. Uređenje temeljnog tla - TIP 2	40
Slika 21. Uređenje temeljnog tla - TIP 3	40
Slika 22. Prikaz granulometrisjkog sastava nasipa/podinskih glina.....	47
Slika 23. Graf s brojem udaraca SPTa	47
Slika 24. Prirodna vlažnost, granica tečenja, granica plastičnosti	48
Slika 25. Dijagram plastičnosti	48
Slika 26. Izravni posmik.....	49
Slika 27. Indeks plastičnosti.....	49
Slika 28. Edometarski modul stišljivosti	50
Slika 29. Isječak iz OGK list Trst s prikazanom lokacijom istraživanja označenom crvenom bojom.....	52

UVOD

U geotehničkom inženjerstvu, stabilnost tla predstavlja izazov pri izgradnji cestovne infrastrukture koja često prolazi kroz područja s nepovoljnim geološkim uvjetima. Tla koja imaju nisku nosivost i visoku stišljivost, poput glina ili aluvijalnih sedimenata, sklona su prekomjernom sljeganju, što može dovesti do deformacija kolničkih konstrukcija i smanjenja njihove trajnosti. Ovaj problem posebno je izražen u izgradnji nasipa, gdje dinamičko opterećenje od prometnih vozila doprinosi postupnom pogoršanju stanja tla. S obzirom na to, razvijene su različite metode za poboljšanje nosivosti i stabilnosti tla, a jedna od metoda je primjena šljunčanih stupnjaka.

Mjere poboljšanja tla obuhvaćaju širok spektar tehnologija koje se primjenjuju ovisno o specifičnim uvjetima tla te mogu biti kategorizirane na različite načine. Među njima se izdvajaju metode poput predopterećenja tla, metode kemijske stabilizacije, metode zbijanja tla, te metode primjene drenažnih sustava. Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i specifična područja primjene. Na primjer, predopterećenje je učinkovito u smanjenju budućeg sljeganja tla, ali zahtijeva dulje vremensko razdoblje i velika opterećenja, dok se kemijska stabilizacija koristi kada je potrebno promijeniti svojstva tla dodavanjem vezivnih tvari, kao što su cement ili vapno. Međutim, kada je potrebna brza i učinkovita intervencija, posebice u slučaju prometne infrastrukture, najčešće se koriste metode ojačanja tla, među kojima su šljunčani stupnjaci[1].

Šljunčani stupnjaci su vertikalne strukture izrađene od zbijenog šljunka ili drobljenog kamena, koje se ugrađuju u tlo radi povećanja nosivosti, smanjenja deformacija i ubrzanja konsolidacije tla. Ovi stupnjaci stvaraju kompozitni sustav u kojem stupnjaci preuzimaju veći dio opterećenja, dok okolno tlo pruža bočnu stabilnost. Time se poboljšavaju mehanička svojstva tla, smanjujući ukupno i diferencijalno sljeganje, te povećava otpornost tla na smicanje. Zbog svoje sposobnosti poboljšanja tla bez potrebe za dubokim temeljenjem, šljunčani stupnjaci često se koriste u situacijama gdje su druge metode, poput predopterećenja ili zamjene tla, tehnički ili ekonomski neizvedive.

Primjena šljunčanih stupnjaka pokazala se posebno učinkovitom u situacijama gdje je potrebno poboljšati tlo ispod cestovnih nasipa. Kroz vibracijske metode, stupnjaci se postavljaju u tlo i zbijaju, čime se postiže veća gustoća i nosivost temeljnog tla. Osim toga, stupnjaci omogućuju bržu drenažu tla, što ubrzava proces konsolidacije i smanjuje rizik od likvefakcije tla u seizmički aktivnim područjima. Ova metoda poboljšanja tla koristi se ne samo za izgradnju cestovne infrastrukture, već i za stabilizaciju građevinskih platformi, mostova i drugih objekata smještenih na slabonosivom tlu.

Ovaj diplomski rad usmjeren je na primjenu šljunčanih stupnjaka kao metode poboljšanja tla ispod nasipa na trasi državne ceste DC44. Problematika loših geotehničkih uvjeta na toj trasi, uključujući nestabilnost tla i deformacije nasipa, zahtijevala je primjenu inovativnih rješenja kako bi se osigurala stabilnost i dugovječnost cestovne konstrukcije. Rad istražuje učinkovitost šljunčanih stupnjaka kroz numeričke analize, koristeći softver Settle3 za simulaciju stanja tla prije i nakon poboljšanja.

Cilj ovog istraživanja je analizirati utjecaj šljunčanih stupnjaka na smanjenje sljevanja i povećanje nosivosti nasipa, te procijeniti koliko se ta metoda pokazala učinkovitom u odnosu na druge metode poboljšanja tla. Rezultati simulacija omogućit će procjenu učinkovitosti šljunčanih stupnjaka u specifičnim geotehničkim uvjetima, te će poslužiti kao smjernice za primjenu ove metode u budućim projektima.

1.MJERE POBOLJŠANJA TLA

Poboljšanje tla provodi se kod slabo nosivog tla kako bi se povećala mehanička svojstva tla ili kako bi se postigla lokalno povoljna hidraulička svojstva poput povećanja propusnosti pomoću drenova te brtvljenje pomoću nepropusnih zavjesa ili barijera [2]. Razne su mogućnosti koje se mogu implementirati kod postizanja projektnih ciljeva kod tla slabe nosivosti. Jedna od mogućnosti podrazumijeva promjenu odabrane lokacije projekta pozicioniranjem građevine na tlo boljih karakteristika i veće nosivosti. Također, neke od mogućnosti projektiranja koje osiguravaju bolju nosivost su korištenje metode dubokog temeljenja ili zamjena slabo nosivog tla s tlom bolje nosivosti. Ukoliko se provodi zamjena slabo nosivog tla potrebno je prilagoditi se vrsti tla na lokaciji zahvata te modificirati odnosno poboljšati tlo na lokaciji na način da se tlo odstrani ili ostavi, poboljša i zamjeni postojeće tlo. U upotrebi je razna terminologija kao što je poboljšanje tla, poboljšanje terena, obrada tla ili modifikacija tla[1].

Za poboljšanje tla može se koristiti razna tehnologija i razne geotehničke metode na mjestima gdje nije moguće ukloniti i zamijeniti tlo iz ekonomskih, tehničkih ili ekoloških razloga. Funkcije mjera za poboljšanje tla su razne, a mogu se izdvojiti [1]:

1. Povećanje gustoće
2. Povećanje posmične čvrstoće i nosivosti temeljnog tla
3. Smanjenje propusnosti
4. Kontrolu deformacija – slijeganje, bubrenje, distorzija
5. Povećanje drenaže
6. Ubrzanje konsolidacije
7. Povećanje bočne stabilnosti
8. Smanjenje nametnutog opterećenja
9. Povećanje otpornosti na likvefakciju
10. Prijenos opterećenja nasipa na bolje nosive slojeve tla

Prema općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu radovi na poboljšanju tla podijeljeni su na tri grupe koji uključuju više postupaka. Prva grupa odnosi se na fizičke modifikacije i stabilizaciju pomoću povećanja gustoće koja se postiže predopterećenjem, dinamičkim nabijanjem teškom opremom, miniranjem,

vibronabijanjem i vibrozamjenom, zbijenim pješčanim ili šljunčanim stupnjacima (drenovima), stupovima od kamena ili grijanjem tla. Druga grupa odnosi se na kemijske modifikacije i stabilizaciju korištenjem stupova od vapna i cementa te dubinskog miješanja – injektiranje tla, mlazno injektiranje. Treća skupina odnosi se na armiranje tla koje se postiže tako da se u tlo stavljaju građevinski elementi ili proizvodi kao što su geosintetici, fašine, mikropiloti, sidra te „čavljanje“ tla[2].

1.1. Povijesni pregled mjera poboljšanja tla

Industrijskom revolucijom krenuo je razvitak raznih strojeva koji su omogućili napredak u vidu poboljšanja kvalitete i kvantitete građevinskih radova. Razvojem mehanike tla u 20. stoljeću omogućeno je bolje razumijevanje ponašanja tla. Kombinacija razvoja strojeva i razumijevanja ponašanja tla doprinijela je razvoju novih tehnika poboljšanja koje uključuju miješanje tla, povećanje zbijenosti, injektiranje te metode ojačanja za ublažavanje problematičnih uvjeta tla.

Tehnike poboljšanja tla krenule su se razvijati u Europi i Bliskom istoku te su se s vremenom razvile i u Sjedinjenim Američkim Državama. Izvođači radova su bili ti koji su unapređivali tehnike poboljšanja tla jer su se morali suočavati sa uvjetima na terenu što je dovelo do poboljšanja tehnologija. Takva poboljšana tehnologija dovela je do učinkovitijih i isplativijih zahvata na poboljšanju tla. *Federal Highway Administration (FHWA)* zabilježila je da je tehnikama poboljšanja tla uvijek prethodilo istraživanje osnovnog učinka i razvoj inženjerskih direktiva te su zamijetili napredak kod uporabe jeftinijih sustava temeljenja, smanjenju zaštite intelektualnih prava, manjih zahvata u okolišu, smanjenju vremena izgradnje te poboljšanu kontrole prometa kroz građevinske zone.

Kroz godine su tehnike poboljšanja dosegle toliko razinu kvalitete i široko su prihvaćene na polju geotehnike da se u današnje vrijeme gotovo rutinski koriste kod nestabilnog tla. U geotehničkom pogledu modifikacija tla odnosi se na poboljšanje pripadajućeg inženjerskog svojstva kao što su čvrstoća na smicanje, tlačna čvrstoća i propusnost tla te isto tako prijenos opterećenja na dublje slojeve tla ili slojeve tla odgovarajuće nosivosti, dok bi izvođaču poboljšanje tla predstavljalo smanjenje vremena izgradnje i/ili smanjenje troškova izgradnje[1].

1.2. Podjela i opis mjera poboljšanja

Široki je spektar geotehničke tehnologije koji je raspoloživ za poboljšanje tla te je moguće napraviti nekoliko različitih kategorizacija tih tehnologija. Prema odboru za poboljšanje tla International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) razlikuju se pet kategorija poboljšanja tla : poboljšanje bez smjesa u nekohezivnom tlu, poboljšanje sa smjesama u kohezivnom tlu, poboljšanje sa smjesama, poboljšanje pomoću injekcijskih masa te armiranje tla. Prema općim tehničkim uvjetima za radove u vodnom gospodarstvu radovi na poboljšanju tla podijeljeni su na tri grupe koji uključuju više postupaka kao šta je navedeno u poglavlju mjera poboljšanja tla. U ovom radu koristiti će se podjela prema FHWA gdje su mjere podijeljene u nekoliko primarnih funkcija : povećanje gustoće, povećanje posmične čvrstoće i nosivosti temeljnog tla, smanjenje propusnosti, kontrolu deformacija – slijeganje, bubrenje, distorzija, povećanje drenaže, ubrzanje konsolidacije, povećanje bočne stabilnosti, smanjenje nametnutog opterećenja, povećanje otpornosti na likvefakciju i prijenos opterećenja nasipa na bolje nosive slojeve.

Povećanjem posmične čvrstoće i nosivosti modifikacijom tla povećava se nosivost temelja i tla. Takva se povećanja mogu postići povećanjem gustoće rastresitih nevezanih tla, konsolidacijom mekih glinenih tla ili dodavanjem vezivnih sredstava u tlo. Kod povećanja gustoće razlikuje se način povećanja gustoće za različita tla. Za nekoherentna tla poput rastresitog pijeska povećavanje gustoće postiže se korištenjem vibracijskih i dinamičkih tehnologija koje povećavaju energiju i tako zbijaju rastresit pijesak. Kod kohezivnih tala proces zbijanja je nešto složeniji te se to postiže uklanjanjem vode iz pora. Na taj način se smanjuje količina slijeganja do kojega bi došlo uslijed opterećenja tla. Kako bi se smanjila propusnost treba smanjiti količinu vode koja protječe kroz tlo povećanjem gustoće tla ili korištenjem veziva i smjesa koje popunjavaju pukotine i čine tlo donekle nepropusnim. Diferencijalno slijeganje uzrokovano je ukupnim slijeganjem, bubrenjem tla i iskrivljenjem koje se treba kontrolirati na način da se ojača tlo pomoću veziva i smjesa, zatim tako da s temeljnom tlu poveća gustoća i čvrstoća ili korištenjem stupnjala kako bi se opterećenje prenijelo na bolje nosivo tlo. Povećanjem drenaže gotovo sva tla imaju povećanje čvrstoće i krutosti stoga je učinkovito otklanjanje vode iz temeljnog tla vrlo bitno. Ubrzanjem konsolidacije smanjuje se vrijeme potrebno da se ono u temeljnom tlu odvija prirodnim

putem. U koherentnom tlu se ubrzanje konsolidacije postiže skraćanjem drenažnog puta u kombinaciji s opterećenjem nasipa ili predopterećenjem. Bržu drenažu postizemo korištenjem predfabriciranih drenova ili pomoću stupnjaka koji omogućuju vodi lakši tok. Kod smanjenja korisnog opterećenja koriste se materijali koji tvore laku ispunu kao što je geopjena (eng. *geofom*), a smanjuju slijeganje i povećavaju stabilnosti konstrukcije. Korištenjem raznih sistema za bočnu stabilnost tla na terenu kod iskopa i u slučaju vertikalnih i kosih nagiba povećava se stabilnost. Korištenjem vibracijskih i dinamičkih metoda povećava se gustoća nekoherentnih tala te se povećava otpornost na likvefakciju. Osim povećavanja zbijenosti, otpornost na likvefakciju može se povećati korištenjem smjesa za injektiranje i veziva u tlo koje pospješuju drenažu tla i izolaciju tla zbog kojih se smanjuje mogućnost pojave likvefakcije tla. Gradnjom stupova koji vertikalno opterećenje prenose do bolje nosivog tla kod konstrukcija poput nasipa i potpornih konstrukcija može se bolje kontrolirati slijeganje, a osobito nejednoliko slijeganje[1].

1.3. Primjenjivost mjera poboljšanja tla

Poboljšanje tla i tehnologije koje se primjenjuju za poboljšanje tla najčešće se koriste kod izgradnje nasipa, potpornih konstrukcija, kod proširenja nasipa, donjeg ustroja kolnika te kod platformi na kojima se odvijaju građevinski radovi.

Mostovi su konstrukcije koje je neizbježno koristiti kod premošćenja rijeka, željezničkih pruga, autocesta i drugih infrastruktura. Kada se mostovi koriste za premošćenje rijeka na aluvijalnom tlu, temeljenje konstrukcije je jako zahtjevno s obzirom da na tom području naslage tla variraju od mekih glina do rastresitog i zbijenog pijeska te su ti slojevi neujednačeni i pomiješani. Taj se problem rješava korištenjem metode dubokog temeljenja za osiguravanje obalnih upornjaka i pristaništa. Poboljšanje tla u ovom slučaju omogućava bolje uvjete na terenu korištenjem jeftinijih plitkih načina temeljenja.

Nasipi se najčešće koriste kod izgradnji autocesta jer omogućavaju visinsku promjenu duž jednog pravca te lakši način pristupanja mostovima. Takve se konstrukcije najčešće rade na tlu slabe nosivosti te se poboljšanje tla u ovom slučaju koristi kako bi se smanjilo slijeganje, povećala stabilnost i smanjio trošak izgradnje uslijed iskopa tla i odvoza tla na deponij[1].

Kod proširenja nasipa na stišljivom tlu uslijed širenja autoceste radi povećanja prometnog opterećenja može doći do neravnomjernog slijeganja između postojećeg nasipa i novog nasipa, nestabilnosti cijele konstrukcije i drugo. Korištenjem mjera poboljšanja tla, stišljivo tlo može se poboljšati ugradnjom laganih materijala u nasip kao što su klinker, blokovi od ekspandiranog polistirena i sličnih materijala kako se ne bi koristili standardni zemljani ili kameni materijali. Osim takvog načina smanjenja neželjenih slijeganja moguće je koristiti i stupnjake ili metode koje povećavaju nosivost tla[1,2].

Kada je tlo na kojem se nalazi kolnička konstrukcija izuzetno loše nosivosti da ne može podnijeti mehanizaciju ono se može stabilizirati korištenjem alternativnih ili recikliranih materijala zatim povećavanjem drenaže radi smanjenja negativnih utjecaja vode te mehaničkim i kemijskim postupcima za povećanje čvrstoće. Na sličan se način modificira tlo za radne platforme koje su privremeni zahvat u prostoru, ali koje moraju biti sigurne kako bi mogle podnijeti opterećenje strojeva te kao mjesto odlaganja i pohrane alata, strojeva i materijala[1].

2. ŠLJUNČANI STUPNJACI

2.1. Opis i vrste stupnjaka

Zbog razvoja novih tehnologija temeljenja izbrisala se granica između nosivih i čvrstih tijela, pilota i poboljšanja temeljnog tla pomoću mikro pilota, šljunčanih stupova i mlazno injektiranih pilota. Kod pilota je djelovanje jasno, međutim kod novih tehnologija dolazi do miješanja učinaka te više nije jasno što su to piloti, a što je poboljšanje tla[3].

Šljunčani se stupnjaci često koriste kod izgradnje autocesta gdje se uslijed ekoloških ograničenja i troškova održavanja ne isplate primjenjivati konvencionalne metode predopterećenja, rada s bagerom i zamjena tla. Pokazali su se pogodnima za primjenu u glinenim tlima, rastresitim muljevitim pijescima i kod nekompaktnih ispuna. FHWA razlikuje dvije vrste šljunčanih stupnjaka odnosno dijeli ih na nabijene agregatne stupove i šljunčane stuonjake.

Šljunčani stupnjaci izvode se vibracijskim tehnikama koje uključuju korištenje dodatnog materijala za ispunu. Vibracijom se materijal ispune zbije i čvrsto poveže sa okolnim tlom. Razlikujemo dvije vibracijske tehnike, dubinsko vibracijsko zbijanje u nevezanom tlu i izvođenje šljunčanih stupnjaka u vezanom i mješovitom tlu.

Nabijeni agregatni stupovi vrsta je stupnjaka koja se izvodi tako da se buše rupe veličine od 45 do 90 cm te dubine od 2 do 10 m zatim se u bušotine ubacuje dobro graduirani agregat koji se nabije tako da se formira kruti stupnjak visoke gustoće [1].

2.2. Primjena stupnjaka

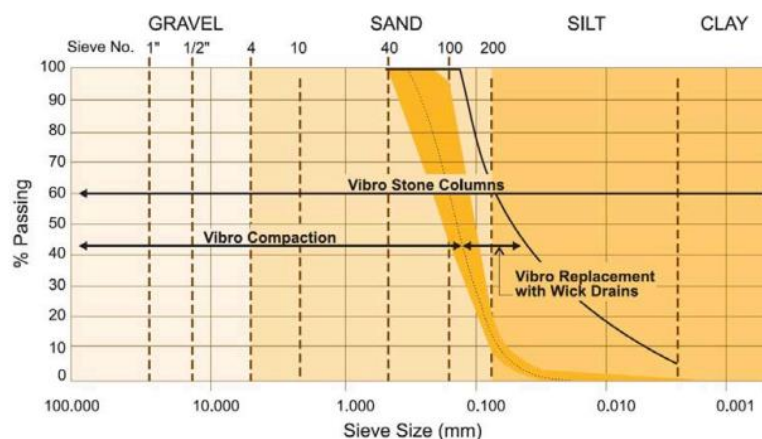
Šljunčani se stupnjaci primjenjuju kada se želi povećati nosivost tla, smanjiti ukupno i diferencijalno slijeganje, ubrzati proces konsolidacije, povećati stabilnost pokosa te smanjiti mogućnost za nastanak likvefakcije tla. Često se primjenjuju kod poboljšanja temeljne konstrukcije autocesta, skladišta te lakih industrijskih građevina [1], željeznica, hidrotehničkih objekata, nasutih brana, nasipa i drugih objekata[4].

Korištenje šljunčanih stupnjaci kod stabilizacije nasipa autocesta pruža alternativu kod izrade klasičnih nasipa koji se ne mogu primijeniti kad postoji velika mogućnost nestabilnosti. Također, šljunčani se stupnjaci mogu koristiti kod povećanja stabilnosti prilaza mostovima. Ovom primjenom moguće je smanjiti trošak održavanja uslijed pojave slijeganja. Korištenjem stupnjaka moguće je postići i veću visinu nasipa od normalne na mekom tlu što isto omogućuje skraćenje dužine mosta povećanjem pristupa. Šljunčani stupnjaci omogućuju bržu drenažu i konsolidaciju te samim time i bržu izvedbu slojeva nasipa.

Kada na mjestu izvođenja projekta nije moguće izvesti plitke temelje za temeljenje upornjaka moguća je upotreba šljunčanih stupnjaka. Na ovakvim zahvatima primjenjuje se i tehnika stabilizacije tla MSE (mechanically stabilized earth ili reinforced soil) gdje se na umjetan način koristi geosintetik ili čelik za izradu zida s ispunom od tla.

Na potresno ugroženim područjima gdje je nekohezivno tlo moguće je koristiti šljunčane stupnjake na kojima su temeljeni nasipi i upornjaci kako bi se smanjila mogućnost pojave likvefacije tla. Moguća je i njihova primjena u blizini već izvedenih stupnjaka, a ova se tehnika uvelike koristi za smanjenje likvefakcije tla na pacifičkom sjeverozapadu.

Prednosti šljunčanih stupnjaka naspram dubokog temeljenja je što su ekonomičniji te pružaju dovoljnu stabilnost tla za izvođenje plitkog temeljenja. U slučaju kada se treba ukloniti veliki sloj lošeg tla osobito na velikom području zahvata gdje je podzemna voda blizu površine pokazala se ekonomičnija upotreba šljunčanih stupnjaka. Na područjima zahvata gdje nije moguće koristiti metode poput pobijenih pilota, dinamičkog zbijanja ili miniranje moguća je upotreba stupnjaka. Kada je rok za dovršetak projekt kratak umjesto da se tlo predoptereti moguće je koristiti šljunčane stupnjake jer omogućuju brže slijeganje. U seizmički aktivnom području stupnjaci omogućuju smanjenje dinamičkog slijeganja na prihvatljivu razinu te uslijed povećanja gustoće tla povećati otpornost na pojavu likvefakcije tla. Djeluju kao vertikalni i radijalni dren i omogućuju disipaciju porednog tlaka u slučaju da se koristi sitno zrnasti agregat. Vrijeme izvođenja radova je relativno kratko. Betoniranje je moguće izvesti odmah nakon poboljšanja tla što investitoru smanjuje troškove i vrijeme rada. Granice primjenjivosti mogu se vidjeti na slici 1.



Slika 1. Primjenjivost stupnjaka na različite vrste tla[1]

Kada je na području zahvata tlo od treseta, drugih organskih materijala i vrlo mekih glina gdje je debljina sloja tla veća od promjera stupnjaka tada nije prikladno izvesti šljunčane stupnjake. Zbog tako mekog tla stupnjak ne pruža dovoljnu bočnu stabilnost te je teško dobiti pravilni stupnjak i osigurati dugotrajnu izdržljivost. Postoji li mogućnost nailaska na kamene gromade, kaldrme ili debeli humusni sloj potrebno je prethodno bušiti prije ugradnje stupnjaka. Kod izvedbe šljunčanih stupnjaka koji zahtijevaju korištenje vode u procesu izgradnje može predstavljati problem u postojanju vodovodnog priključka odnosno na koji način osigurati vodu ukoliko ona nije u blizini. Problem može predstavljati uklanjanje tla iz bušotine ako je potrebno napraviti bušotinu prije izvedbe šljunčanog stupnjaka. Kod izvedbe nabijenih agregatnih stupova u slučaju da se koristi obloga povećava se cijena troška izvedbe, a problem kod korištenja obloge je što sprječava povećanje gustoće tla.[1]

2.3. Nosivost stupnjaka

Kod korištenja vibro-sistema postignuta gustoća ovisiti će o vrsti tla, količini mulja i gline, plastičnosti tla, relativnoj gustoći prije vibriranja, korištenom vibratoru, utrošenoj energiji, o obliku kamena i njegovoj izdržljivosti, površini stupnjaka te razmaku stupnjaka. Glinovita tla imaju loš odziv kod vibriranja te se poboljšanje tih tla mjeri u količini ugrađenog i/ili potisnutog materijala.

Dozvoljeno opterećenje šljunčanog stupnjaka treba biti jednolično raspoređeno te je ograničeno bočnim otporom koje tlo može razviti. Jedan stupnjak može podnijeti približno 489 kN. Najveće poboljšanje moguće je postići u lako stišljivom silitu i glini gdje posmična čvrstoća doseže vrijednost od 14 do 48 kN/m². U tlima koje sadrže

organske tvari i treset ili gdje ima slojeve tla čija je nedrenirana posmična čvrstoća manja od 14 kN/m² nije moguće ostvariti dovoljni bočni otpor tla. Zbog slabe čvrstoće i visokog stupnja kompresije u takvim tlima moguća su vertikalna odstupanja promjera stupnjaka. Ako su slojevi tla veći za jedan ili dva promjera stupnjaka nije moguće postići jednolik promjer u vertikalnom smjeru. Kod šljunčanih stupnjaka slijeganje se može smanjiti za 50 do 70 posto te diferencijalno slijeganje za 5 do 15 posto u odnosu na prethodno stanje tla. Kod nabijenih agregatnih stupova moguće je smanjiti slijeganje za manje od 2,54 cm za neka opterećenja i tla. Korištenje vibratora moguće je za tla čija je maksimalna granica nedrenirane čvrstoće od 48 do 96 kN/m² te je moguće da vibrator pruža otpor u jačim tlima stoga je potrebno napraviti bušotinu. U tlima koja su jako rastresita i zrnata te meka i kohezivna moguće je da se bušotina urušava što iziskuje uporabu kalupa(košuljice) koji smanjuje brzinu rada i povećava trošak izvedbe. Stupnjake se isplati izvesti kada su u rasponu od 10 – 30 m[1].

2.3.1. Povećanje nosivosti temeljnog tla

Kod koherentnih tla ovisi o posmičnoj čvrstoći, a ona se sastoji od unutrašnjeg trenja i kohezije. Columbova jednadžba za posmičnu čvrstoću glasi:

$$\tau = \sigma' * \tan \varphi' + c' \quad (1)$$

gdje su τ posmična čvrstoća izražena u [kN/m²], σ' je efektivni normalni napon u kliznoj plohi izražen u [kN/m²] zatim φ' je efektivni kut unutrašnjeg trenja izražen u [°] te c' je efektivna kohezija izražena u [kN/m²]. Za nevezana tla može se okvirno odrediti, prema obliku zrna i gustoći zrna, koeficijent unutarnjeg trenja[4].

Vrsta tla	Gustoća	Oblik zrna	Kut unutrašnjeg trenja φ' [°]
Pijesak	rahli	okrugli	30,0
	rahli	šiljasti	32,5
	srednje gusti	okrugli	32,5
	srednje gusti	šiljasti	35,0
	gusti	okrugli	35,0
	gusti	šiljasti	37,5
Šljunak	srednje gusti		37,5

Slika 3. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja φ' u ovisnosti o gustoći i obliku zrna za nevezana tla[4]

Vrsta tla	Stanje konzistencije	Kut unutrašnjeg trenja φ' [°]	Kohezija c' [kN/m ²]	Nedrenirana kohezija c_u [kN/m ²]
Glina	polučvrsto	25	25	50-100
	tvrd	20	20	20-50
	mekano	17	10	10-25
Ilovača	polučvrsto	27,5	10	50-100
	mekano	27,5	-	10-25
Prah		27,5	-	10-50

Slika 2. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja φ' , kohezije c' i kohezije u nedreniranom stanju c_u u ovisnosti o konzistentnom stanju za vezana tla[4]

2.3.2.Smanjenje i/ili ubrzanje slijeganja

Opterećenjem tla nekom građevinom dolazi do deformacija. Razlikujemo elastične deformacije koje nastaju uglavnom promjenom volumena čestica i plastične deformacije koje nastaju kao posljedica promjene volumena pora u tlu. Opterećenjem nekoherentnog tla slijeganje će se odmah ostvariti, dok kod koherentnih tala slijeganje se odvija u određenom vremenskom razdoblju u ovisnosti koeficijenta propusnosti k . Kod koherentnih zasićenih tala do slijeganja može doći ako se voda može istisnuti iz pora jer su čestice tla i voda gotovo ne stlačivi. Modulom stišljivosti opisuje se stlačivost temeljnog tla. Taj modul E_s uglavnom ovisi o naponu u tlu. Kod određivanja modula stišljivosti mora se definirati pripadno područje naprezanja. U tablicama su dane okvirne vrijednosti modula stišljivosti za pojedina tla[4].

Vrsta tla	Gustoća	Oblik zrna	Modul stišljivosti [MN/m ²]	Vrsta tla	Stanje konzistencije	Modul stišljivosti [MN/m ²]
Pijesak	rahli	okrugli	20-50	Glina	polučvrsto	5,0-10,0
	rahli	šiljasti	40-80		tvrd	2,5-5,0
	srednje gusti	okrugli	50-100		mekano	1,0-2,5
	srednje gusti	šiljasti	80-150	Ilovača	polučvrsto	5,0-20,0
srednje gusti	šiljasti	150-250	mekano		4,0-8,0	
Šljunak	srednje gusti		100-200	Prah		3,0-10,0

Slika 4. Okvirne vrijednosti modula stišljivosti E_s za nevezana tla i vezana tla[4]

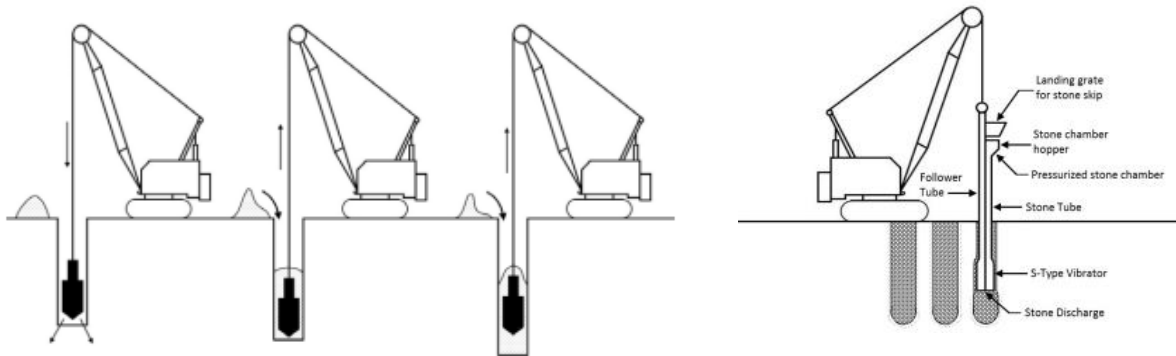
2.4. Tehnike izvođenja radova

Dvije metode koje se koriste za izgradnju šljunčanih stupnjaka su vibro-replacement(wet,top feed) i vibro-displacement (dry, top or bottom feed). Ponekad zbog ekoloških utjecaja nije moguće koristiti vibracijski uređaju uz pomoć mlazne vode iako je taj postupak ekonomičniji.

Vibro-replacement je prvotna tehnika koja se razvila ,a uključuje korištenje mlaza vode za stvaranje bušotine u koju ulazi sonda. S površine se u bušotinu ubacuje agregat zatim se sonda u pravilnim prirastima upušta u bušotinu te tako se agregat i okolno tlo kompaktira. Ova metoda pogodnija je za meka do čvrsta tla koja imaju nedreniranu posmičnu čvrstoću od 14 do 48 kN/m² te sa visokim stupcem podzemne vode.

Kako bi se riješio problem korištenja vode radi ekoloških razloga te problem kod uklanjanja i odlaganja materijala iz bušotine osmišljena je nova metoda. Tako su

nastale dry top and dry bottom feed tehnike. Vibrator se uz pomoću oscilatora, vlastite težine, upuhavanja zraka i/ili prvobitnog bušenja upušta u tlo. Ako je bušotina dosta duboka, i postoji mogućnost od urušavanja, postupak je malo drugačiji. U bušotinu se kroz cijevi na dnu vibratora dodaje agregat[1].

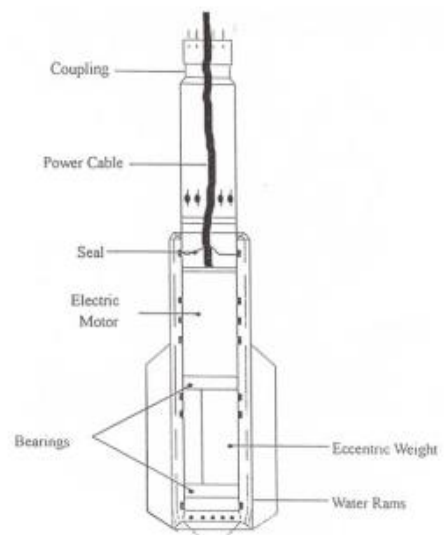


Slika 5. Top feed vibro-replacement (desno) i bottom feed vibro-displacement tehnike

2.5. Oprema koja se koristi pri izvedbi agregatnih stupnjaka

Oprema koja se koristi za izvedbu šljunčanih stupnjaka sastoji se od vibrators koji ima prikopčane cijevi za dodavanje zraka ili vode[1], stroja koji može imati slobodno viseću sondu ili sondu na jarbolu[5], sistem pomoću kojeg se upušta agregat te uređaji za kontrolu i praćenje kvalitete izvedbe[1].

Vibrator tipično ima razne dimenzije, njegov promjer je u rasponu od 30 do 40 cm te duljine od 3 do 4 m. Horizontalne vibracije proizvode se pri vrhu vibratorsa, a nastaju rotiranjem ekscentričnih utega koji su montirani na osovinu koju pokreće motor. Za pokretanje motora moguće je koristiti električni ili hidraulički pogon. Nekada su se koristili motori slabije snage, međutim današnji motori mogu imati snagu do 125 kW s centrifugalnom silom od 268 kN i od 1200 do 3000 okretaja u minuti. Kako bi vibrator što dulje izdržao kod konstantnog dizanja i spuštanja u bušotinu dodane su zaštitne ploče na površini vibratorsa. Pomoću produžnih cijevi se voda i zrak mogu prenijeti do vrha vibratorsa.

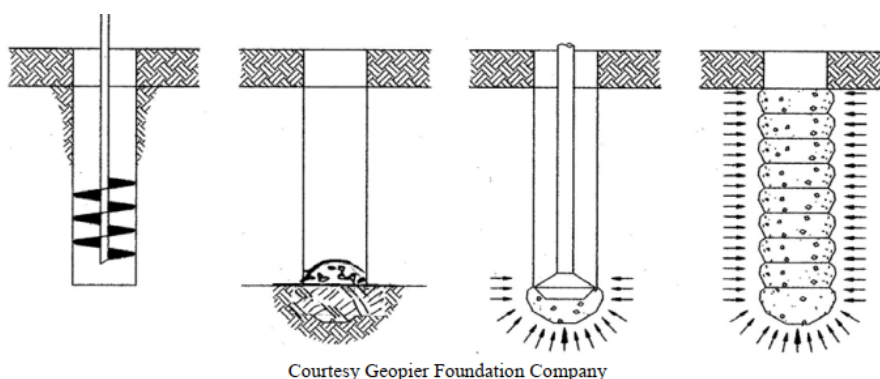


Slika 6. Poprečan presjek tipičnog vibratorsa

Voda i zrak se koriste kao pomoć kod bušenja. Debljina sloja tla koja se planira poboljšati uvjetuje dimenzije vibratora, duljinu cijevi te stroj koji će podizati vibrator.

U blizini izvedbe stupnjaka potrebno je imati rastresit materijal koji se ugrađuje. Za prijevoz agregata na gradilištu koristi se utovarivač. Kod "top feed" metode agregat se ubacuje u bušotinu, a ako se radi o "bottom feed" metodi agregat se ubacuje u ljevak kojim se pomoću cijevi materijal distribuira na dno bušotine odnosno na vrh vibratora.

Nabijeni agregatni stupovi metoda je koja se temelji na zamjeni tla. Postupak se sastoji od izrade bušotine do željene dubine uz korištenje košuljice ako dolazi do urušavanja, potom se na dno stavlja agregat te se zatim agregat nabije. Taj proces se zatim ponavlja sve do vrha bušotine. Prvim nabijanjem ispod dna stupnjaka formira se „gomolj“, dok su ostali slojevi koji se izvode sve do vrha debljine 30 cm. Za nabijanje se koristi nabijač koji svojim djelovanjem povećava gustoću i agregat gura bočno u stjenke bušotine čime se povećava bočno naprezanje te i učvršćivanje stabiliziranog tla[1]. Cjelokupan postupak dan je na slici 7.



Slika 7. Postupak izvođenja nabijenih agregatnih stupova

2.6. Korišteni agregat i alternativa agregatu

Agregat koji se upotrebljava za ispunu mora biti adekvatan te njegov odabir ovisi o tehnologiji kojom se izgrađuje stupnjak, karakteristikama tla u kojem se izgrađuje stupnjak, o svrsi samog stupnjaka te o vrsti agregata koji je dostupan u blizini lokacije izgradnje. Pravilan odabir agregata ključan je u izvedbi nekih projekta. Na seizmološki aktivnom području pri prevenciji likvefakcije bitan faktor u odabiru adekvatnog agregata biti će njegova sposobnost pružanja dostatne drenaže, dok kod stabilizacije pokosa biti će važna posmična čvrstoća agregata. Osim navedenih faktora pravilnog odabira agregata je i količina raspoloživih sredstva za izvedbu projekta.

Za izvedbu vibro-replacemat šljunčanih stupnjaka koristi se agregat oštih bridova koji je jednoliko graduiran najčešće veličine zrna 2 – 6 cm. Ovakvo zrno s lakoćom prolazi okolo vibrirajuće sonde dok se nalazi u bušotini.

Kod izrade stupnjaka mokrim postupkom ključno je da je mlaz vode konstantan kako bi se ispirale čestice tla koje se infiltriraju među agregat i na taj način pospješila stabilnost bušotine.

Kod vibro-displacement postupka koristi se granulacija od 1 do 7,6 čak i 10 cm čime se postiže mehanička krutost i ispunjenje šupljina. Ako se u bušotinu agregat dovodi kroz vibrator do dna tada je veličina zrna manje granulacije od 1 do 3,5 cm kako bi se izbjeglo začepljenje opreme[1].

Za alternativni agregat šljunku ili drobljenom kamenu moguće je koristiti zguru. Zgura je otpadni proizvod pri proizvodnji metala za vrijeme njegova legiranja i lijevanja. Korištenjem zgure reducira se korištenje prirodnih resursa te se isto tako recikliraju otpadni proizvodi. Zgura se koristi u razne svrhe kao na primjer agregat u betonu, u nasipu i slojevima prometnih konstrukcija, za izradu cementa i slično. Kako bi se koristila u šljunčanim stupnjacima potrebno je odrediti fizikalno – mehaničke karakteristike zgure. Iz tog razloga potrebno je provesti slijedeća ispitivanja[2] :

1. Visokopećna zgura bez dikalcijeva silikata i raspada željeza
2. Granulometrijski sastav i udio sitnih čestica prema HRN EN 933-1
3. Oblik zrna agregata – indeks oblika prema HRN EN 933-4
4. Određivanje gustoće i upijanje vode prema HRN EN 1097-6
5. Skupljanje uslijed sušenja prema HRN EN 1367-4
6. Otpornost na predrobljavanje (kriterij LA 50) prema HRN EN1097-2
7. Otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja (kriterij MS35) prema HRN EN1367-2
8. Sadržaj kemijskih komponenti prema HRN EN1744-1

2.7. Projektiranje

Za tehnike vibro-replacement, vibro-displacement i agregatnih stupova pristup projektiranju je jednak.

Projektiranje šljunčanih stupnjaka velikim je dijelom temeljeno na poluempirijskom pristupu. Praktične smjernice pružaju upute za projektiranje nosivosti temeljnog tla, procjenu slijeganja i analizu stabilnosti. Ove smjernice nude racionalnu osnovu za procjenu nosivosti šljunčanih stupnjaka. Teorijski rezultati trebali bi se nadopunjavati prethodnim iskustvima i inženjerskim prosudbama kako bi se osigurao pouzdan dizajn.

Trenutne metode koje se koriste za analizu i dizajn obuhvaćaju široki spektar pristupa. Metode variraju od djelomično empirijskih pristupa do naprednih analiza konačnih elemenata. One su integrirane s terenskim ispitivanjima, laboratorijskim eksperimentima i analitičkim modelima kako bi se istražile i predvidjele maksimalne nosivosti, ponašanje slijeganja, otpornost na smicanje te mehanizmi sloma stupnjaka.

Slabo nosiva tla koja su ojačana šljunčanim stupnjacima djeluju kao kompozitni medij. Ova ojačanja rezultiraju povećanjem krutosti tla, što se postiže smanjenjem razmaka između stupnjaka, povećanjem poprečnog presjeka stupnjaka i povećanjem kuta trenja ugrađenog agregata (kamena). Krutost stupnjaka, koji zamjenjuju ili pomiču prirodno tlo, veća je od krutosti tla na terenu. Osim toga, stupnjaci se za bočnu stabilnost oslanjaju na okolno tlo. Posljedično, to implicira da stupnjaci moraju osigurati odgovarajuću bočnu stabilnost kako bi se spriječio bačvasti slom. Osim toga, završetak stupnjaka trebao bi biti smješten u gušćem sloju tla kako bi se izbjeglo prekoračenje nosivosti.

Stupnjak je čvršći od okolnog tla, što rezultira manjim slijeganjem u odnosu na okolno tlo i omogućuje da se nosivo opterećenje prenosi zakrivljenjem stupnjaka. S vremenom dolazi do dodatne konsolidacije tla, što izaziva povećanje naprezanja unutar stupnjaka dok se u sustavu ne postigne ravnotežno stanje. Ovakav prijenos opterećenja na čvrsti i manje stlačivi stupnjak rezultira smanjenjem slijeganja cijelog sustava temelj-temeljno tlo[1].

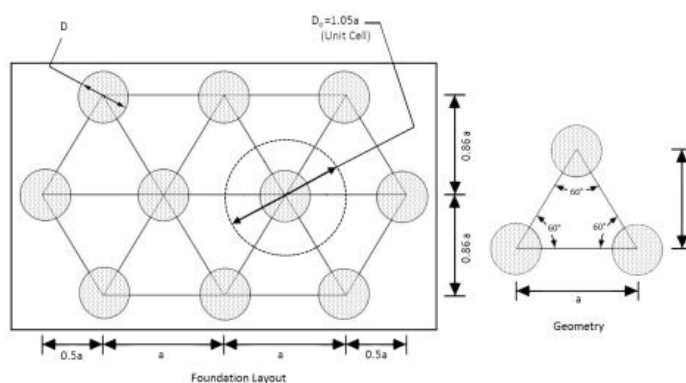
2.7.1. Postupak projektiranja

FHWA preporučuje sljedeće korake u procesu projektiranja[1]:

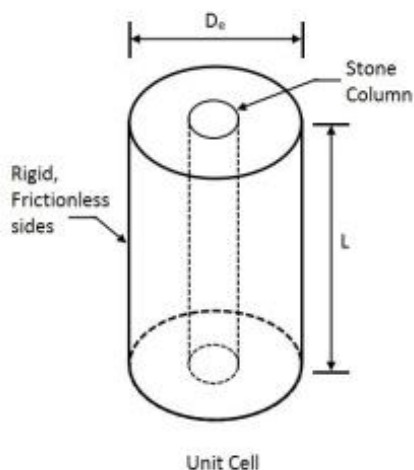
1. **Početo projektiranje nasipa:** Potrebno je započeti projektiranjem nasipa kako bi se utvrdilo ukupno slijeganje i stabilnost, što omogućuje odabir odgovarajućih mjera za poboljšanje tla.
2. **Određivanje omjera zamjene:** Pretpostavlja se omjer između zamijenjene površine i promjera stupnjaka.
3. **Određivanje udaljenosti stupnjaka:** U ovom koraku potrebno je utvrditi udaljenost između stupnjaka u odnosu na površinu koju stupnjaci zamjenjuju i njihov promjer.
4. **Provjera nosivosti stupnjaka:** Evaluira se zadovoljava li nosivost stupnjaka projektne zahtjeve. Ako stupnjak ne ispunjava zahtjeve, potrebno je vratiti se na korak 2 i prilagoditi promjer stupnjaka.
5. **Određivanje ukupnog slijeganja nasipa:** Utvrđuje se ukupno slijeganje nasipa temeljenog na stupnjacima.
6. **Provjera brzine i vremena slijeganja:** Analizira se brzina i trajanje slijeganja. Ako je vrijeme potrebno za slijeganje predugo, potrebno je prilagoditi udaljenost između stupnjaka.
7. **Ponovna provjera stabilnosti:** Nakon svih prethodnih koraka, provjerava se sveobuhvatna stabilnost sustava.

2.7.2. Koncept jedinične ćelije

Jedinična ćelija predstavlja površinu koja nastaje podjelom ukupne površine rastera stupnjaka na jednake dijelove, svaki dio obuhvaća jedan stupnjak i okolno područje utjecaja. Stupnjaci se mogu postaviti u različitim rasporedima, pri čemu su najčešći rasporedi trokutni i kvadratni (slika 8.). U trokutnom rasporedu, jedna ćelija ima oblik šesterokuta, dok u kvadratnom rasporedu ima oblik kvadrata. D_e promjer jedinične ćelije predstavlja promjer kruga čije je središte u središtu jedinične ćelije, a čija površina je jednaka površini same jedinične ćelije (slika 9.).



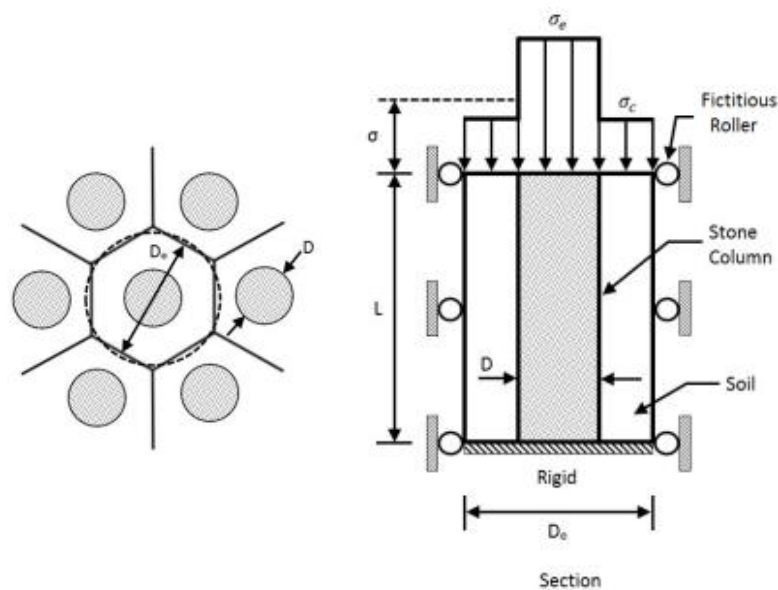
Slika 8. Trokutni raspored stupnjaka[1]



Slika 9. Jedinična ćelija[1]

Za potrebe proračuna pretpostavlja se da nema horizontalnih pomaka tla na granici između ćelija jer su naprezanja s obje strane plohe koja razdvaja ćelije jednaka. Nadalje, pretpostavlja se da baza šljunčanog stupnjaka leži na krutoj stijeni, što implicira da ne dolazi do slijeganja tla ispod stupnjaka (slika 10). Ove pretpostavke omogućuju da se ćelija promatra kao izolirani segment tla na krutoj podlozi, omeđen čvrstim vertikalnim stijenama.

Koncept jedinične ćelije primjenjiv je samo ako je duljina i širina rastera stupnjaka veća od dubine stupnjaka. U takvom slučaju, rezultati proračuna temeljeni na izoliranim jediničnim ćelijama precizno predstavljaju većinu površine prekrivene stupnjacima, dok odstupanja uzrokovana nesimetričnim naprezanjima na rubnim stupnjacima mogu se zanemariti[1].



Slika 10. Tlocrt stupnjaka s aproksimiranom površinom (lijevo) i pretpostavka proračuna (desno)[1]

2.7.3. Omjer naprezanja

Raspodjela vertikalnog opterećenja između stupnjaka i okolnog in situ tla ovisi o relativnoj krutosti stupnjaka u usporedbi s in situ tlom, kao i o promjeru i razmaku stupnjaka. S obzirom na to da je progib u oba materijala gotovo jednak, prema analiza ravnoteže naprezanje u stupnjaku mora biti veće nego u okolnom tlu. Ova pretpostavka jednakog progiba često se naziva pretpostavkom jednakog deformiranja, a terenska mjerenja i analize metodom konačnih elemenata potvrdile su njezinu valjanost.

Koncentracija naprezanja ili omjer naprezanja n , predstavlja omjer naprezanja u stupnjaku u odnosu na naprezanje u in situ tlu, i ovisi o više čimbenika. Ovi čimbenici uključuju relativnu krutost između dva materijala, duljinu stupnjaka, omjer površina te karakteristike kamenog sloja koji se postavlja iznad stupnjaka. Izmjerene vrijednosti omjera naprezanja obično su u rasponu od 2,0 do 5,0. Prema teoriji taj faktor koncentracije trebao bi rasti s vremenom.

Određivanje projektiranog omjera naprezanja ključno je za projektiranje stupnjaka. Iako postoje teorijska rješenja, ta se vrijednost uglavnom oslanja na primjenu praktičnog iskustva. Visoki omjer naprezanja (3 do 4) potreban je u slučaju kada je in situ tlo vrlo slabo te su stupnjaci postavljeni vrlo gusto. U slučaju jačeg in situ tla i većih razmaka između stupnjaka, prikladniji su niži omjeri naprezanja (2 do 2,5).

Nakon što se pretpostavi ili utvrdi omjer naprezanja, mogu se izračunati naprezanje u stupnjaku (σ_{sc}) i naprezanje u okolnom tlu (σ_{soil}) za svaki omjer zamjene (α_{sc}) i za bilo koji prosječni uvjet naprezanja q koji bi mogao biti prisutan unutar jedinice ćelije na sljedeći način:

$$n = \frac{\sigma_{sc}}{\sigma_{soil}} \quad (1.)$$

Za ravnotežu vertikalnih sila za zadani α_{sc} vrijedi:

$$q = \sigma_{sc}(\alpha_{sc}) + \sigma_{soil}(1 - \alpha_{sc}) \quad (2.)$$

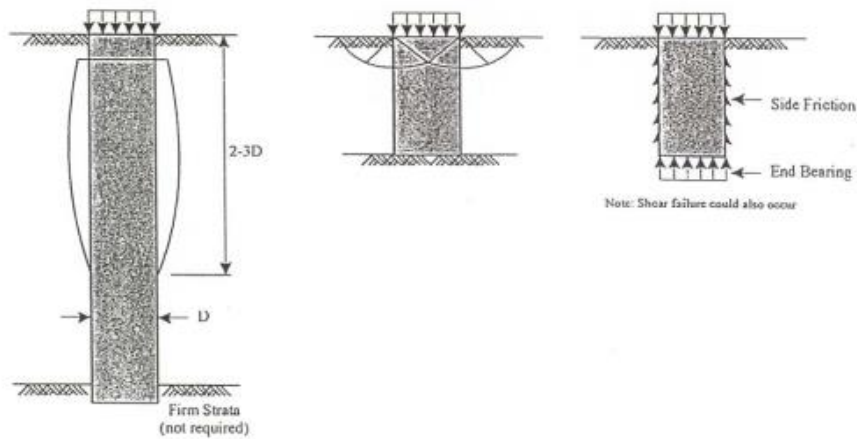
Za zadani omjer koncentracije naprezanja, naprezanje u nepoboljšanom tlu je:

$$\sigma_{soil} = \frac{q}{[1+(n-1)\alpha_{sc}]} \quad (3.)$$

Za zadani omjer koncentracije naprezanja, naprezanje u stupnjaku je:

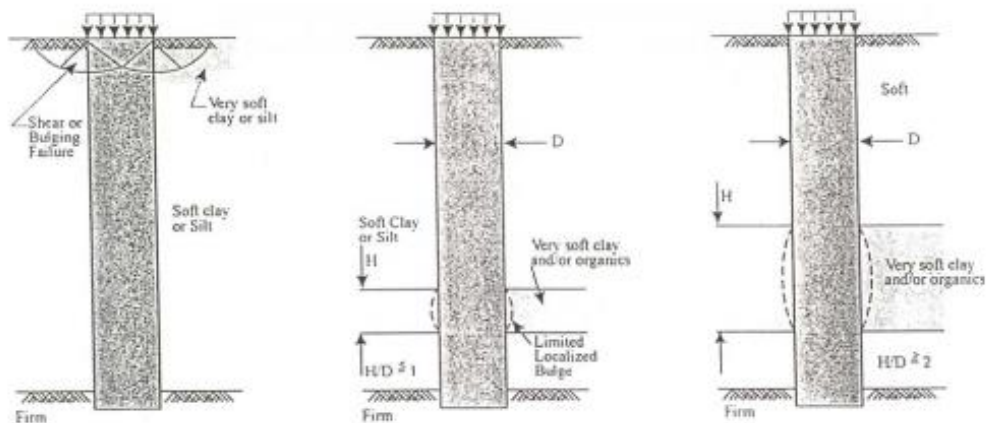
$$\sigma_{sc} = \frac{nq}{[1+(n-1)\alpha_{sc}]} \quad (4.)$$

Pri određivanju maksimalne nosivosti stupnjaka ili skupine stupnjaka, potrebno je razmotriti moguće načine sloma tla i stupnjaka koji su vidljivi na slici 11.

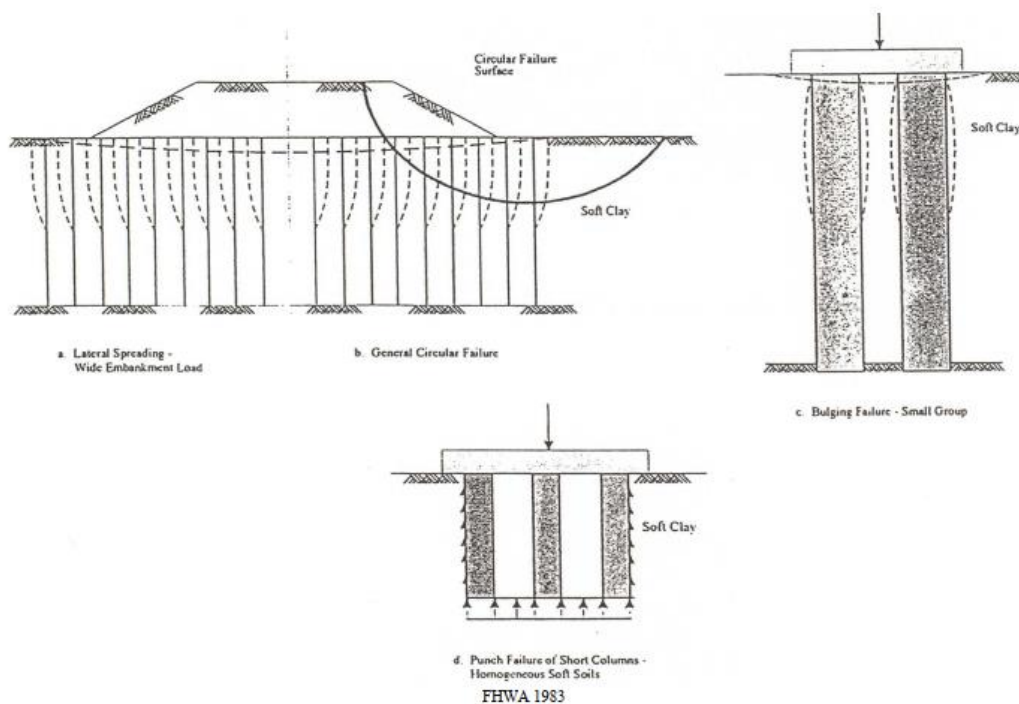


Slika 11. Vrste sloma tla pojedinačnog stupnjaka u homogenom mekom tlu - bačvasti slom, posmični slom i slom probojem[1]

Posebnu pažnju treba posvetiti izbjegavanju nastanka bačvastog sloma tla koji može nastati zbog vrlo slabih ili organskih slojeva male debljine (slika 12 i slika 13). Bačvasti slom može utjecati na brzinu i veličinu slijeganja, a posljedično tome može utjecati na stabilnosti i smanjenje otpornosti na smicanje samog stupnjaka.



Slika 12. Vrste sloma tla pojedinačnog stupnjaka u nehomogenom kohezivnom tlu - bačvasti ili posmični slom, lokalna pojava bačvastog sloma u tankom sloju i debljem sloju tla



Slika 13. Vrste sloma tla grupe stupnjaka - lokalno bočno kretanje i kružna klizna ploha, bačvast slom male grupe stupnjaka, slom probojem kratkih stupnjaka u grupi

Provjera nosivosti skupina stupnjaka koji su opterećeni krutim temeljima ili fleksibilnim opterećenjima, poput nasipa, još uvijek je u fazi razvoja. Stoga je nužno uzeti u obzir ne samo teoretske proračune, već i prethodno iskustvo i inženjersku prosudbu prilikom određivanja projektiranog opterećenja za stupnjake.

Često se nosivost grupe stupnjaka izračunava tako da se nosivosti pojedinog stupnjaka umnožava za broj grupe stupnjaka. Istraživanja na malim modelima s korištenjem krutih temelja upućuju da je ovaj pristup vjerojatno blago konzervativan za mekana kohezivna tla. Nosivost izoliranog stupnjaka ili stupnjaka unutar grupe može se izraziti na sljedeći način :

$$q_n = N_c \cdot c \quad (5.)$$

gdje je q_n predstavlja nominalnu nosivost koju stupnjak može podnijeti, c je nedrenirana čvrstoća okolnog kohezivnog tla, a N_c je faktor nosivosti za stupnjak. Za procjenu nosivosti su se faktori u rasponu od 18 do 22 pokazali adekvatnima.

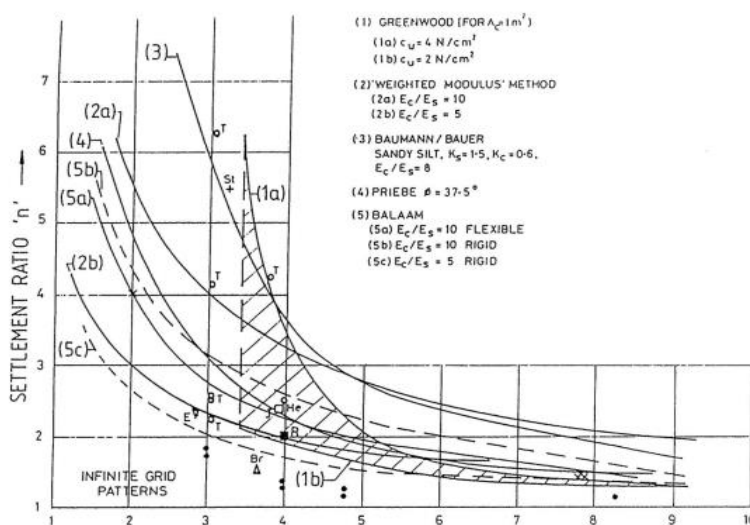
Prema teoriji širenja šupljina, krajnja nosivost, odnosno faktor N_c , ovisi o sposobnosti kompresije tla oko stupnjaka. Očekuje se da tla koja sadrže organske materijale ili mekane gline imaju manju vrijednost N_c u usporedbi s čvršćim tlima. Za tla s relativno visokom početnom krutošću preporučuje se N_c od 22, dok se za tla s

niskom krutošću preporučuje N_c od 18. Tla s niskom krutošću uključuju treset, organska kohezivna tla i vrlo meke gline s indeksom plastičnosti većim od 30, dok tla s visokom krutošću obuhvaćaju neorganske meke do čvrste gline i muljeve. Preporučene vrijednosti N_c temelje se na povratnoj analizi terenskih ispitivanja, pri čemu su uzete u obzir čvrstoće tla i stupnjaka. Za projektiranje se preporučuje faktor otpornosti od 3 ako se koristi jednadžba 5.

Za projektiranje pojedinačnih stupnjaka u mekim do srednje čvrstim glinama, uobičajeno se mogu koristiti opterećenja u rasponu od 178 do 267 kN[1].

2.7.4. Slijeganje

Procjena smanjena slijeganje se može odrediti koristeći elastičnu metodu, elasto-plastičnu metodu, pseudo-elastičnu metodu pomoću koncepta jedinične ćelije. Predviđeno poboljšanje koje se često izražava kao omjer slijeganja "n", predstavlja odnos između slijeganja prije poboljšanja i onoga nakon poboljšanja stupnjacima. Obično se povezuje s omjerom zamjene područja (α_{sc}) ili omjerom poboljšanja područja ($1/\alpha_{sc}$). Slijeganje tala prije poboljšanja određuje se standardnim analizama slijeganja. Na slici 14. su prikazana predviđanja poboljšanja koja se temelje na određenim teorijsko-analitičkim metodama i rezultatima terenskih mjerenja (Greenwood i Kirsch, 1984).



Slika 14. Usporedba elastičnih teorija i terenskog iskustva

Han (2015) predstavlja tri pristupa za izračunavanje slijeganja temelja ojačanih stupnjacima: metoda smanjenja naprezanja, metoda faktora poboljšanja i elasto-plastična metoda.

Kod omjera slijeganja "n" važno je napomenuti da je analitički određen od različitih istraživača kao funkcija omjera modula elastičnosti stupnjaka (E_{sc}) i modula elastičnosti in situ tla (E_{soil}). Može biti izražen i kao odnos otpornosti stupnjaka (N) prema čvrstoći na smicanje in situ tla (c_u).

Priebeova krivulja može se koristiti za prethodnu procjenu maksimalne učinkovitosti i troškova pri različitim razmacima stupnjaka[1].

2.7.5. Priebova metoda za projektiranje šljunčanih stupnjaka

Priebova metoda se sastoji od određivanja faktora poboljšanja, određivanje faktora poboljšanja uzimajući u obzir kompresiju stupnjaka i tlak prekoračenja, pronalazak kontrola kompatibilnosti te određivanja vrijednosti smicanja poboljšanja tla.

Metoda se temelji na sljedećim pretpostavkama:

1. Stupnjak se temelji na krutoj podlozi
2. Materijal stupnjaka je nestlačiv
3. Nasipna gustoća stupnjaka i tla je zanemariva.

Temeljem navedenih pretpostavki zbog oslonca na krutoj podlozi na krajevima stupnjak ne može popustiti stoga svakim slijeganjem nosive površine dolazi do ispupčenja stupnjaka duž njegove duljine. Pretpostavke se koriste u svrhu određivanja faktora poboljšanja n_0 te se u daljnjem nastavku projektiranja one zanemaruju[8].

Pretpostavlja se da kameni stupovi odmah podnose opterećenje smicanjem, dok se okolno tlo ponaša elastično. Prilikom instalacije stupnjaka, pretpostavlja se da je tlo oko stupnjaka već pomaknuto, te tako smanjuje njegovu otpornost koja se smatra da je na razini tekućeg stanje. Koeficijent pritiska tla je tada jednak 1, $K=1$. Osnovni faktor poboljšanja (n_0) kvantificira koliko kameni stupovi povećavaju nosivost i stabilnost tla u odnosu na stanje prije njihove ugradnje te se izražava na sljedeći način [8]:

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} * \left[\frac{0,5 + f(\mu_s, \frac{A_c}{A})}{K_{ac} * f(\mu_s, \frac{A_c}{A})} - 1 \right] (6.),$$

Gdje je funkcija Poissonovog koeficijenta i omjera poprečnog presjeka stupnjaka i površine jedinične ćelije:

$$f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right) = \frac{(1-\mu_s)\left(1-\frac{A_c}{A}\right)}{1-2\mu_s+\frac{A_c}{A}} \quad (7.),$$

a aktivan postisak tla u stupnjaku:

$$K_{ac} = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2}\right) \quad (8.).$$

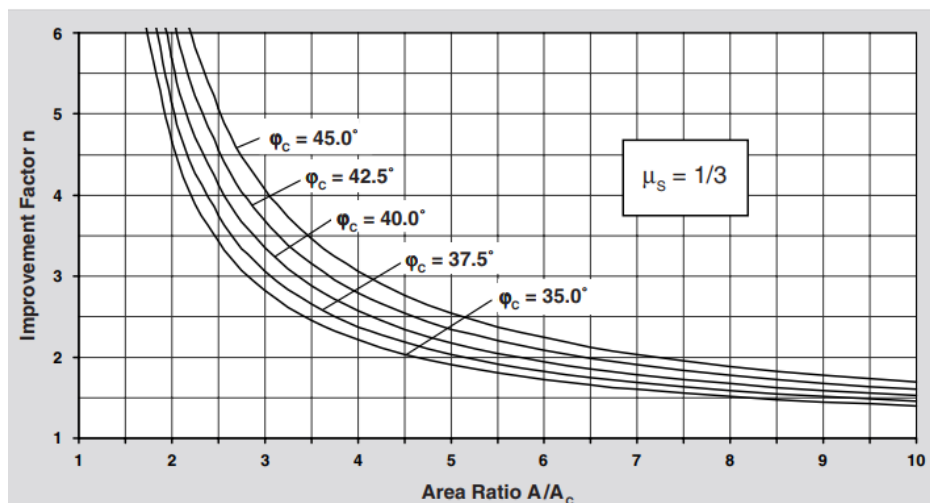
Gdje su :

- A – površina jedinične ćelije
- A_c – poprečni presjek stupnjaka
- μ_s – Poissonov koeficijent tla
- K_{ac} – aktivan postisak tla (stupnjak)
- φ_c – kut unutarnjeg trenja (stupnjak).

Uvrštavanjem Poissonovog koeficijenta $\mu_s = 1/3$, koje je adekvatan za stanje konačnog sljeganja (u većini slučajeva), u jednadžbu rezultira pojednostavljenjem izraza za osnovni faktor poboljšanja.

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} * \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4 * K_{ac} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (9.)$$

Slika 15. predstavlja dijagram koji dovodi u odnos osnovni faktor poboljšanja n_0 , recipročnu vrijednost A/A_c te unutarnji kut trenja ispune[8].



Slika 15. Grafički prikaz odnosa faktora poboljšanja, omjera površine i kuta unutarnjeg trenja ispune [8]

Materijal koji se koristi za ispunu stupnjaka i nakon zbijanja je i dalje stlačiv. To znači da će opterećenje izazvati slijeganje tla koje nije povezano s izbočenjem (širenjem) stupnjaka već je posljedica prirodne stlačivosti materijala. U slučaju zamjene tla gdje omjer zamijenjene površine iznosi $A/A_c = 1$ stvarni faktor poboljšanja ne postiže beskonačnu vrijednost kao što je to teoretski određeno za nestlačivi materijal. Stvarni faktor poboljšanja je ograničen i u najboljem slučaju jednak omjeru modula stezanja materijala stupova i tla. U ovom slučaju, modul stezanja zbijenog materijala za ispunu i tla, određuje se edometarskim pokusima velikih razmjera.

Može se lako odrediti pri kojem omjeru površine poprečnog presjeka stupa i površina područje mreže $(A_c/A)_1$ osnovni faktor poboljšanja n_0 odgovara omjeru modula stezanja stupova i tla (D_c/D_s). Za $\mu_s = 1/3$ i donji pozitivni rezultat izraza $n_0 = D_c/D_s$ daje odgovarajući omjer $(A_c/A)_1$.

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 2) + 5}{2 \cdot (4 \cdot K_{ac} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 2) + 5}{4 \cdot K_{ac} - 1}\right]^2 + \frac{16 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 1)}{4 \cdot K_{ac} - 1}} \quad (10.)$$

Za približnu procjenu stlačivosti materijala stupova može se u obzir uzeti pomoću smanjenog faktora poboljšanja n_1 . Faktor se može dobiti preoblikovanjem formule za osnovni faktor poboljšanja n_0 tako da se recipročni omjer površine A/A_c poveća za dodatnu količinu $\Delta(A/A_c)$ [8].

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[\frac{0,5 + f(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A})}{K_{ac} \cdot f(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A})} - 1 \right] \quad (11.)$$

Gdje je \bar{A}_c/A jednako

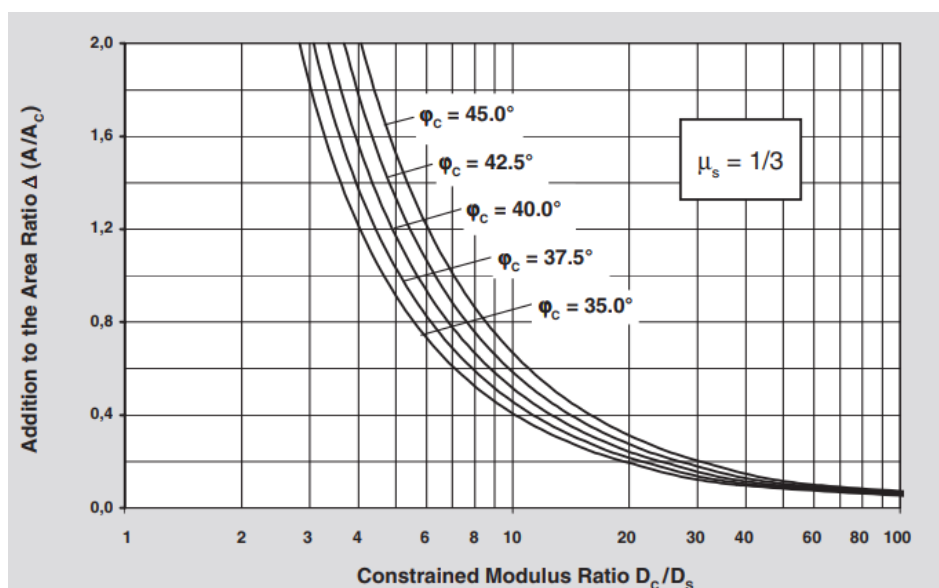
$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (12.),$$

te $\Delta(A/A_c)$ je

$$\Delta\left(\frac{A}{A_c}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A}{A_c}\right)_1} - 1 \quad (13.).$$

Za određivanje dodatne količine omjera površine $\Delta(A/A_c)$, koja predstavlja korekciju na originalni omjer površine, potrebno je uzeti u obzir omjer modula stezanja D_c/D_s (gdje je D_c modul stezanja materijala stupova, a D_s modul stezanja tla). Ova

korekcija može se jednostavno očitati s dijagrama slici 16. Dijagram pruža informaciju o promjeni omjera površine u odnosu na omjer modula stezanja te tako omogućujući preciznu prilagodbu faktora poboljšanja[8].



Slika 16. Grafički prikaz razmatranja stlačivosti stupnjaka[8]

Zanemarivanje volumnih gustoća stupova i tla znači da početna razlika u tlaku između stupova i tla, koja uzrokuje izbočenje, ovisi samo o raspodjeli opterećenja temelja p na stupove i tlo. Ta razlika u tlaku je konstantna duž cijele duljine stupa. Međutim, uz vanjska opterećenja, treba dodati težine stupova W_c i tla W_s , koje mogu značajno premašiti ta vanjska opterećenja. Uzimanje u obzir ovih dodatnih težina uzrokuje asimptotsko smanjenje početne razlike u tlaku, što dovodi do smanjenja izbočenja. Drugim riječima, s povećanjem pokrovnog sloja, stupovi dobivaju bolju bočnu podršku i mogu pružiti veću nosivost.

Razlika u tlaku predstavlja linearni parametar u formulama za faktor poboljšanja. Omjer početne razlike u tlaku i one koja ovisi o dubini, izražen kao dubinski faktor f_d koristi se za prilagodbu faktora poboljšanja n_1 do konačnog faktora $n_2 = f_d \times n_1$ zbog utjecaja pritiska pokrovnog sloja. Na primjer, ako na određenoj dubini razlika u tlaku iznosi samo 50% početne vrijednosti, dubinski faktor f_d bit će 2[8].

Izračun dubinskog faktora f_d temelji se na pretpostavci da se razlika u tlaku smanjuje linearno, na temelju linija pritiska $(p_c + \gamma_c \cdot d) \cdot K_{ac}$ i $(p_s + \gamma_s \cdot d) \cdot (KS=1)$. Međutim, važno je uzeti u obzir da se sa smanjenjem bočnih deformacija koeficijent pritiska tla

sa stupova mijenja s aktivne vrijednosti K_{ac} na vrijednost u mirovanju K_{0c} . Dubinski faktor ostaje pouzdan do dubine na kojoj se pretpostavljena ravna linija za razliku u tlaku susreće sa stvarnom asimptotskom linijom. U praksi, dubina poboljšanja tla je obično manja. Zbog sigurnosnih razloga, preporučuje se isključivanje povoljnog vanjskog pritiska na tlo p_s iz računa[8].

Formula za dubinski faktor f_d jednaka je

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - \frac{W_s}{W_c} * \frac{W_c}{p_c}}{K_{0c}}} \quad (14.)$$

Gdje je p_c jednak

$$p_c = \frac{p}{\frac{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{p_c}{p_s}}}{1}} \quad (15.)$$

a p_c/p_s je

$$\frac{p_c}{p_s} = \frac{0,5 + f(\mu_s, \frac{A_c}{A})}{K_{ac} * f(\mu_s, \frac{A_c}{A})} \quad (16.)$$

Zatim, W_c jednak je

$$W_c = \sum(\gamma_c * \Delta d) \quad (17.)$$

a W_s

$$W_s = \sum(\gamma_s * \Delta d) \quad (18.)$$

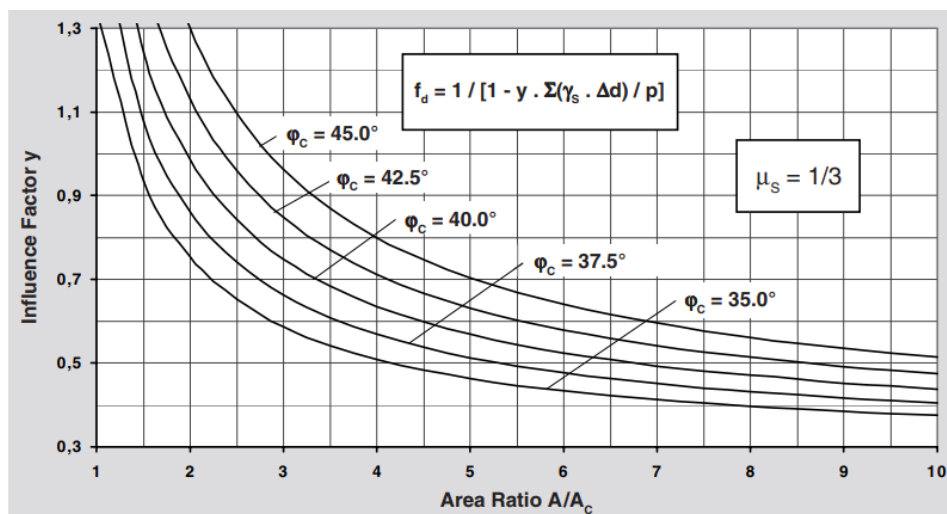
te K_{0c}

$$K_{0c} = 1 - \sin \rho_c \quad (19.)$$

U konačnici je dubinski faktor f_d jednaka je

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - 1 - \frac{\sum(\gamma_s * \Delta d)}{p_c}}{K_{0c}}} \quad (20.)$$

Pojednostavljeni dijagram prikazan na slici 17. koristi istu nasipnu gustoću γ za stupove i tlo, što nije u skladu s pravilima sigurnosti. Stoga, uvijek treba uzeti u obzir nižu vrijednost volumne gustoće tla γ_s pri korištenju ovog dijagrama.



Slika 17. Dijagram za određivanje faktora dubine [8]

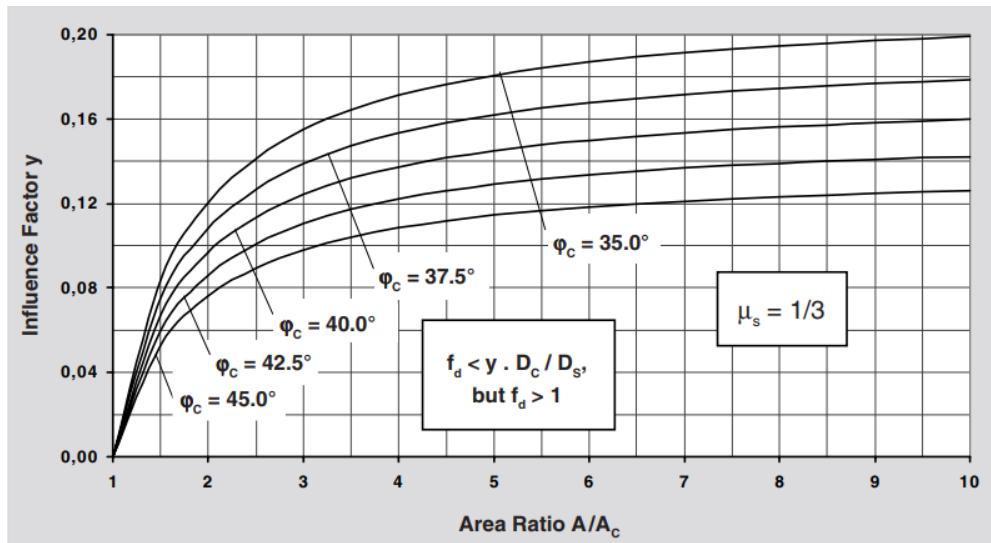
Pojedini koraci projektiranja nisu matematički povezani i uključuju pojednostavljena i aproksimacije. Zbog toga je u graničnim slučajevima potrebno provjeriti kompatibilnost kako bi se osiguralo da stupovi ne nose više opterećenja nego što mogu podnijeti.

Povećanjem dubine tlo pruža dovoljan otpor da se stupovi ne mogu izbočiti. Međutim, faktor dubine ne raste beskonačno zbog pretpostavke linearnog smanjenja razlike tlaka. Prva provjera kompatibilnosti ograničava faktor dubine i opterećenje na stupovima kako bi se osiguralo da ne dolazi do prekomjernog slijeganje. Ova provjera je posebno važna kada je tlo već prilično zbijeno ili čvrsto.

$$f_d \leq \frac{D_c/D_s}{p_c/p_s} \quad (21.)$$

Maksimalna vrijednost faktora dubine može se odrediti iz dijagrama na slici 16. Faktor dubine za kojeg vrijedi $f_d < 1$ nije poželjno uzeti u obzir iako se može pojaviti u proračunima. U tom slučaju provodi se drugu provjera kompatibilnosti koja se odnosi na maksimalnu vrijednost faktora poboljšanja. Ova provjera osigurava da slijeganje stupnjaka zbog njihove kompresibilnosti ne premaši slijeganje okolnog tla. Druga provjera je posebno važna kada je tlo rastresito ili meko[8].

$$n_{max} = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{D_c}{D_s} - 1 \right) \quad (22.)$$



Slika 18. Graf koji predstavlja krajnje vrijednosti faktora dubine [8]

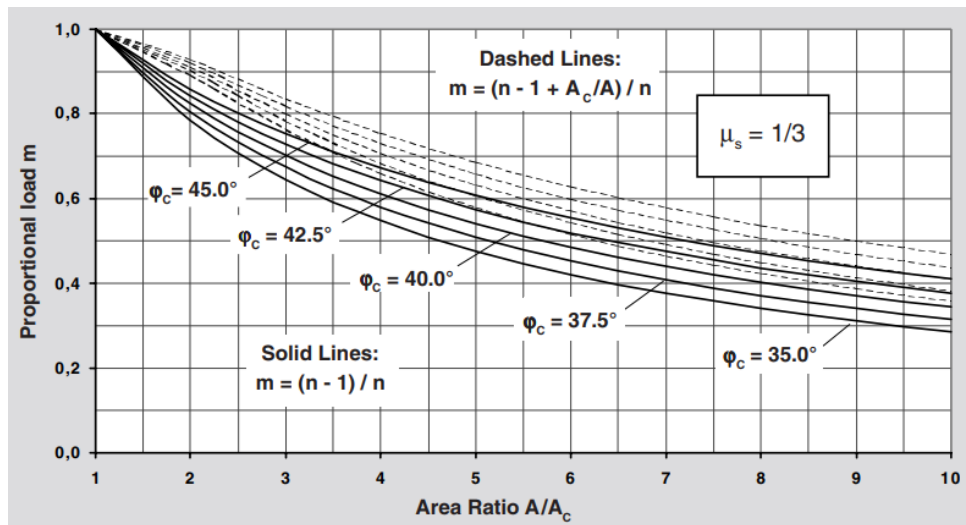
Kruti elementi opterećeni posmičnim naprezanjem sukcesivno se lome, dok stupnjaci se deformiraju sve dok se prekomjerno opterećenje ne prenese na susjedne stupnjake. Primjerice, klizište neće nastupiti prije nego što se dosegne nosivost cijele skupine stupnjaka. Stupnjaci primaju veći udio ukupnog opterećenja m , koji ovisi o omjeru površina AC/A i faktoru poboljšanja n [8].

$$m = \frac{(n-1 + \frac{A_c}{A})}{n} \quad (23.)$$

Postupak projektiranja ne uzima u obzir smanjenje volumena okolnog tla uzrokovano izbočenjem stupova. Iz tog razloga, a osobito pri visokom omjeru površina, tlo preuzima veći dio ukupnog opterećenja nego što je stvarno izračunato. Potrebno je smanjiti proporcionalno opterećenje na stupovima kako bi se izbjeglo da se procijeni veća otpornost smicanja stupova pri prosjeku temeljenom na raspodjeli opterećenja između stupova i tla. Proporcionalno opterećenje se pojednostavljuje te poprima sljedeći oblik [8]:

$$m' = \frac{n-1}{n} \quad (24.)$$

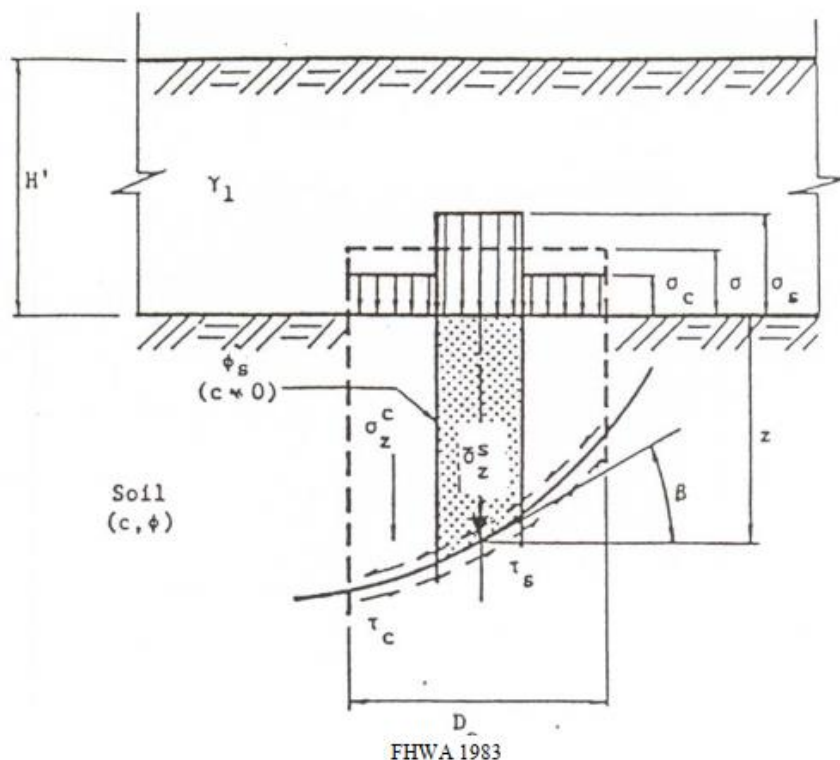
Na slici 19. prikazan je dijagram na kojem je punom linijom iscrtano proporcionalno opterećenje stupova m' , a isprekidanom linijom nereducirano opterećenje m [8].



Slika 19. Dijagram s prikazom proporcionalnog opterećenja na stupnjak [8]

2.7.5. Povećanje posmične čvrstoće

U analizama stabilnosti kosina, prosječna čvrstoća na smicanje kompozitnog materijala (tlo i stupnjak) koristi se kao pokazatelj stabilnosti nasipa. Primjena ovog pristupa prikazana je na slici 15 .



Slika 20. Prikaz analize metodom prosječnog napreznja

Nedavna su istraživanja pokazala da metodologija korištenja prosječne čvrstoće može nadmašiti faktor sigurnosti za oko 10% u nedreniranim uvjetima. Kompozitna posmična čvrstoća ovisi o nedreniranoj čvrstoći na smicanje in situ tla, trenju stupnjaka, omjeru zamjene područja, omjeru napreznja te uvjetima opterećenja. Potrebno je relativno gusto postavljanje stupnjaka i značajan nad tlak kako bi se postiglo značajno poboljšanje te mobilizacija trenja stupnjaka.

Prosječna čvrstoća na smicanje, τ , i prosječna specifična težina, γ , mogu se izračunati prema sljedećim formulama:

$$\tau = (1 - \alpha_{sc})c_u + \alpha_{sc}\sigma_v \tan \phi_{sc} \quad (25.)$$

$$\bar{\gamma} = \gamma_{sc}\alpha_{sc} + \gamma_{soil}(1 - \alpha_{sc}) \quad (26.)$$

gdje su :

τ - prosječna ponderirana čvrstoća na smicanje,

c_u - nedrenirana čvrstoća na smicanje in situ tla,

γ - prosječna specifična težina,

$\gamma_{soil}, \gamma_{sc}$ - specifična težina tla i stupnjaka,

ϕ_{sc} - kut trenja stupnjaka,

σ_v - naprezanje zbog opterećenja nasipa,

α_{sc} - omjer zamjene područja.

Kut unutarnjeg trenja kod projektiranja stupnjaka uzima se ϕ_{sc} u rasponu od 40 do 45 stupnjeva. Manji kutovi su prikladni za mješavine šljunka, dok su veći kutovi prikladni za mješavine lomljenog kamena.

Omjer naprezanja u projektnim sanacijama klizišta je često 1. To upućuje da su parametri čvrstoće prosječne vrijednosti. Analize stabilnosti mogu se provesti koristeći pristup ukupnom naprezanju s $\phi = 0$ za uvjete na kraju izgradnje, ili koristeći pristup efektivnim naprezanjima s $c = 0$ za dugoročne uvjete. Prema preporuci, faktor sigurnosti trebao bi biti u rasponu od 1,2 do 1,3[1].

2.8. Provjera poboljšanja tla

Program osiguranja kvalitete za stupnjake obuhvaća nekoliko ključnih metoda. Prije izgradnje provode se testovi granulacije, specifične težine, labave i zbijene gustoće kamena. Na svakih 5.000 tona materijala provodi se jedan test kako bi se osigurala usklađenost sa specifikacijama. Kvaliteta izvedenog stupnjaka ovisi o postizanju minimalnog promjera i potrebne zbijene gustoće kamena.

Tijekom izgradnje potrošnja kamena se prati s obzirom na dubinu, što omogućuje procjenu promjera stupnjaka. Smanjena potrošnja može ukazivati na probleme poput urušavanja rupe ili neadekvatnog izmicanja okolnog tla. U grupi od 50 uzastopno ugrađenih stupnjaka prosječni promjer mora odgovarati danim specifikacijama, pri čemu nijedan stupnjak ne smije imati promjer manji od 90% minimalnog promjera koji se može odrediti ugovorom [1].

Vertikalni položaj stroja i os stupnjaka također se nadziru. Svaki sloj kamena tijekom izgradnje treba biti ponovno sabijen dok se ne postigne zadana vrijednost ampermetra. Ampermetar mjeri struju koju troši elektromotor tijekom rada. Ako je tlo već dobro nabijeno, otpor koji stroj mora savladati bit će veći jer je tlo čvršće. To može rezultirati povećanom potrošnjom struje, što će se očitovati kao veće očitavanje na ampermetru. Ta vrijednost također ukazuje na adekvatan prijenos energije vibratora na agregat. Za projekte velikih područja poboljšanja, preporučuje se podjela na zone kako bi se osigurao kontinuitet radova i izbjegla potreba za kasnijim korekcijama.

Svi zapisi trebaju biti dostavljeni inženjeru, a uključuju sljedeće podatke prikupljene tijekom ugradnje stupnjaka[1]:

1. Identifikacijski broj stupnjaka.
2. Provjera vertikalnog položaja mehanizacije.
3. Nadmorska visina vrha i dna svakog stupnjaka.
4. Broj kanti kamenog materijala korištenih za ispunu svakog stupnjaka.
5. Zabilježena amperaža u odnosu na dubinu, s datumom i identifikacijom stupnjaka na svakom zapisu.
6. Vrijeme potrebno za prodiranje i izradu svakog stupnjaka.
7. Zabilješke o preprekama, kašnjenjima i neuobičajenim uvjetima tla.
8. Digitalni zapis podataka uključujući amperažu, dubinu i potrošnju kamenog materijala.

Kontrola kvalitete nakon izgradnje ovisi o specifičnoj primjeni i vrsti tla u kojem su postavljeni stupnjaci. Preporučuje se izvođenje in situ testiranja (SPT, CPT ili PMT) na središnjim točkama između stupnjaka za primjene poput stabilizacije kosina, dodatnog ojačanja konstrukcija ili nasipa, smanjenja slijeganja, ublažavanja likvefakcije i prevencije bočnog širenja u siltnim i glinenim pijescima. Uporaba iste metode testiranja prije i nakon ugradnje stupnjaka omogućava utvrđivanje poboljšanja tla[1]. Ugradnjom stupnjaka neće doći do zbijanja mekih zasićenih glina. Kada se na stupnjacima u takvom tlu temelji konstrukcija ili nasip potrebni su testovi opterećenja za utvrđivanje kratkotrajne nosivosti i slijeganja. Kratkoročni testovi trebaju se provoditi prema ASTM D1143[7]. Dugoročni testovi, koji se preporučuju ako je slijeganje ključno, trebali bi trajati tjedan dana. Testovi se provode na tri do četiri stupnjaka unutar grupe od devet do dvanaest stupnjaka. Opterećenje je potrebno

primijeniti preko doprinosećeg područja stupnjaka. Kao opterećenje mogu se koristiti materijali za izradu stupnjaka, materijali dostupni na lokaciji ili betonski blokovi[1].

Prema hrvatskim normama potrebno je vršiti kontinuirani nadzor izvedbe svakog stupnjaka i uspostaviti plan nadzora koji identificira kritične parametre izvedbe i rad strojeva (HRN EN 14731). Kontrola uspješnosti poboljšanja tla provodi se neposredno i posredno[2].

Neposredno ispitivanje se vrši probnim opterećenjem, kao što su ispitni nasip ili ploča na velikim površinama koje uključuju više šljunčanih stupova i tlo između njih. Ova ispitivanja omogućuju neizravno mjerenje parametara koji utječu na ponašanje poboljšanja tla. Može se vršiti i ispitivanjem pojedinih šljunčanih stupova pomoću probne ploče postavljene koncentrično na stup. Opterećenje se dodaje postepeno te se mjeri slijeganje ploče u odnosu na referentnu gredu[2].

Posredno ispitivanje vrši se ispitivanjem mehaničkih karakteristika tla i usporedbom podataka prikupljenih prije i nakon zahvata. Preporučuje se izvršavanje ispitivanja na istim lokacijama. Ispitivanja je potrebno odraditi u tlu između stupnjaka. Na ovaj način se mogu usporediti rezultati i procijeniti uspješnost poboljšanja tla. Odabir metoda ispitivanja treba biti prilagođen specifičnim uvjetima tla i primijenjenoj metodi poboljšanja. Rezultati ispitivanja u nekoherentnim tlima obično su precizniji, dok u glinenim tlima možda neće pružiti točne informacije o kvaliteti poboljšanja. Preporučuju se ispitivanja koja mjere horizontalna svojstva tla, poput presiometarskih i dilatometarskih ispitivanja. Moguće metode uključuju[2]:

- Presiometarska ispitivanja (PMT)
- Dilatometarska ispitivanja (DMT)
- Standardni penetracijski test (SPT)
- Ispitivanje statičkom penetracijom (CPT)
- Geofizička ispitivanja, uključujući seizmičke metode (SASW ili MASW)

3. Projekt sanacije ceste DC 44

3.1. Uvod

Tvrtka OpusGEO d.o.o. je prema narudžbenici tvrtke Rijekaprojekt d.o.o. provela geotehničke istražne radove i izradila izvedbeni geotehnički projekt za potrebe sanacije državne ceste oznake DC 44, dionica 002, lokacija Buzet – Ponte Porton.

Na predmetnoj lokaciji izvedeni su geotehnički istražni radovi koji uključuju sljedeće poslove :

- Istražno bušenje
- Geotehničku interpretaciju
- Laboratorijska ispitivanja
- Inženjerskogeološku interpretaciju postojećih podataka.

Geotehničko projektiranje odvijalo se istovremeno s istražnim radovima te je uključivalo analizu i obradu prikupljenih podataka i rezultata. S napredovanjem istražnih radova i geotehničkog projektiranja projektantu trase (Rijekaprojekt d.o.o.) dostavljen je geotehnički uvjeti prolaska trase ,odnosno geotehnički uvjeti uređenja temeljnog tla ispod kolničke konstrukcije. Na dvije lokacije unutar predmetne dionice izrađen je geotehnički elaborat koji je korišten pri izradi geotehničkog projekta [6].

3.2. Tehnički opis

3.2.1. *Općenito*

Za potrebe sanacije državne ceste DC 44, dionice 002, na potezu od Ponte Portona do Buzeta u dužini od 10,24 km izrađen je izvedbeni projekt. Projektna stacionaža 0+000,00 odgovara apsolutnoj stacionaži dionice od 3+100,00 km te je završetak na stacionaži 10+240,00 koji odgovara apsolutnoj stacionaži od 13+340,00. Kolnik ceste smješten je na nasipu. Nasip služi za obranu od poplava rijeke Mirne, a izgrađen je od glinovitih materijala. Uslijed korištenja loših materijala za izradu nasipa dolazi do deformacija na kolniku. Planiraju se mjere i radovi kako bi se podigla razina uslužnosti

na primjereno stanje za državnu cestu. Projektirano rješenje sastoji se od građevinsko – prometnog projekta trase te pratećih projekata: geotehničkog projekta i elektroničkog projekta prelaganja i izgradnje EK(električnog kruga)[6].

3.2.2. Oblik i veličina građevne čestice

Planirani radovi izvoditi će se na postojećem cestovnom tijelu prema obuhvatu koji je definiran ovom vrstom radova (sanacija kolnika) sukladno Zakonu o cestama. Građevina ne mijenja svoju površinu, položaj u prostoru i obuhvat[6].

3.2.3. Namjena građevine

Građevina je cesta državnog značaja koja povezuje više jedinica lokalne samouprave, osiguravanje tranzitnog i lokalnog transporta te motornog prometa svih standardnih cestovnih kategorija vozila. Sama cesta smještena je na nasipu čija je uloga obrana od plavljenja kod izlivanja rijeke Mirne iz korita. Na prometnici se odvija dvosmjerni promet motornih vozila, nalazi se izvan izgrađenog područja naselja te vođenje pješačkog i biciklističkog prometa uz trasu ceste nije predviđeno[6].

3.2.4. Smještaj građevine

Prometnica DC 44, dionica 002, segment Ponte Porton – Buzet smještena je u Istarskoj županiji. Nalazi se na području triju jedinica lokalne samouprave, a to su Vižinada, Motovun, Buzet.

Prometnica prolazi dolinom rijeke Mirne. Smjer asolutne stacionaže je iz pravca Ponte Portona prema Buzetu. Gledano u smjeru stacionaže s lijeve strane počinje šumski pojas i manjim dijelom kultivirane površine dok s desne strane proteže se travom obrasli pojas između rijeke Mirne i nasipnog tijela na kojem je smještena cesta.

Cesta povezuje sjeverni središnji i sjeverozapadni dio Istarskog poluotoka. Započinje kod čvora Nova Vas kao nastavak DC301 dok na sjeveroistočnom dijelu trase je povezana je sa DC 201(cesta koja je povezana s Republikom Slovenijom) , ŽC 5013 (cesta prema Cerovlju i Pazinu) i A8 (cesta prema Rijeci i Primorsko – goranskoj županiji)[6].

3.2.3. Postojeće stanje

Cilj projekta je popravak kolnika na dionici DC44. Analize, istraživački radovi i terenski pregledi pokazali su značajno propadanje kolničke konstrukcije u mnogim segmentima. Glavna deformacija duž trase je valovanje u uzdužnom smjeru, odnosno kontinuirane neravnine u obliku valova na pravilnim razmacima od nekoliko metara koji su okomiti na smjer vožnje.

Na određenim mikrolokacijama zabilježena su puknuća u asfaltnim i donjim nosivim slojevima. Puknuća su uzrokovana slijeganjem nasipnog materijala i utiskivanjem tamponskog materijala u glinenu posteljicu nasipa (šljunčane vreće). Oštećenja su sanirana izvedbom novih asfaltnih slojeva(slika 21.), no zbog nastavka deformacija donjih slojeva ponovno su se pojavile vidljive deformacije na površini kolnika.

Na pojedinim mjestima duž trase pojavljuju se ulegnuća i slijeganje ruba kolnika(slika 22.) prema kosini nasipa, uz pojavu pukotina na rubnom traku kolnika(slika 23.) . Određeni posebno oštećeni segmenti bili su sanirani tijekom proteklih godina, međutim deformacije i oštećenja nastavljaju napredovati ubrzanom dinamikom.



Slika 21. Sanirani segmenti kolnika[Google karte]



Slika 22. Deformacije na kolniku[Google karte]



Slika 23. Deformacije na rubu kolnika [Google karte]

3.2.4. Kategorizacija trase obzirom na oštećenje i prijedlog tipa sanacije

Zona sanacije primarno se odnosi na popravak postojećih nasipa. Na temelju pregleda stanja kolnika, trasa je razvrstana u tri kategorije:

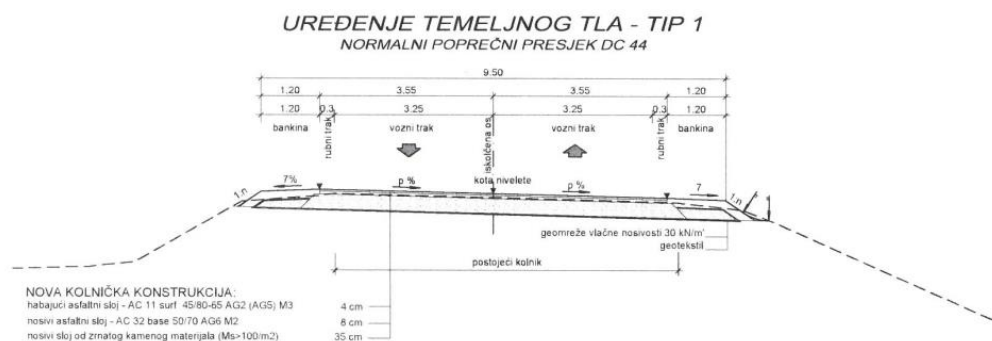
KAT1 - Neznatna oštećenja

KAT2 - Manje pukotine na kolničkoj konstrukciji i rubovima asfalta, pri čemu debljina slojeva šljunčanih vreća ne prelazi 1 m, odnosno maksimalno 1,5 m ispod površine asfalta

KAT3 - Veće pukotine na kolničkoj konstrukciji

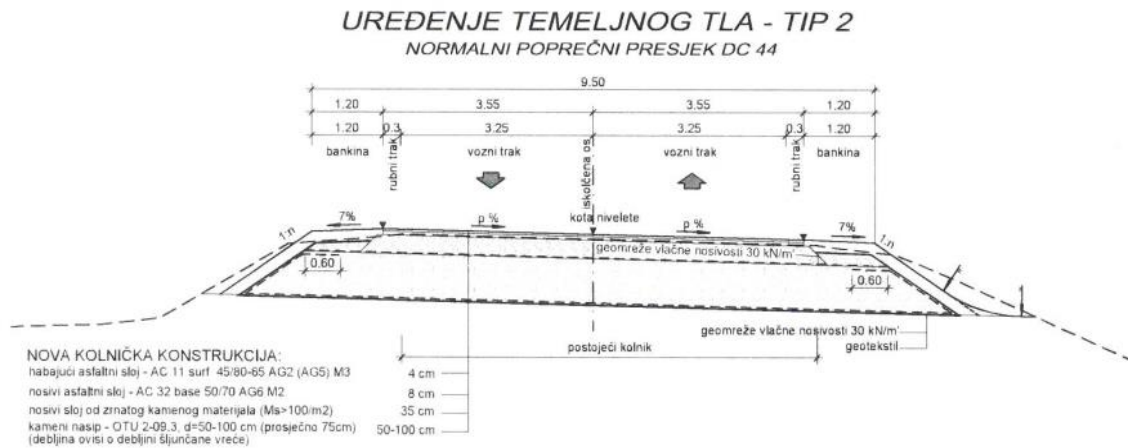
U skladu s navedenom podjelom trase, predložena su tri tipa sanacije temeljnog tla (postojećeg nasipa) ispod kolničke konstrukcije:

TIP1: Postavljanje geotekstila i geomreža ispod kolničke konstrukcije - primjenjuje se na dijelovima trase označenima kao KAT1 (slika 24.) [6].



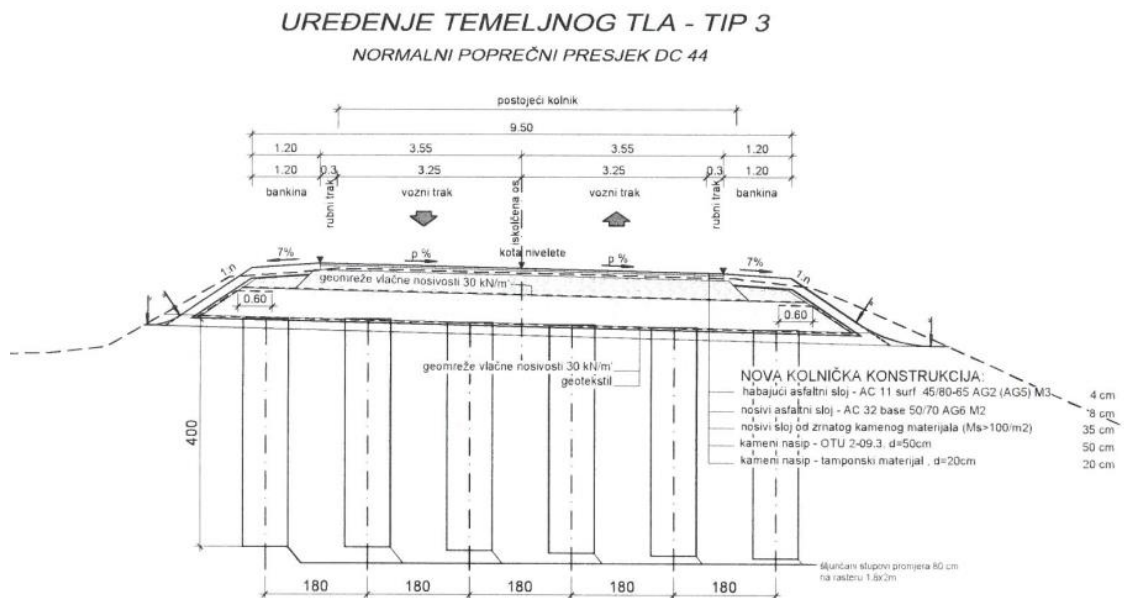
Slika 24. Uređenje temeljnog tipa tla - TIP 1 [6]

TIP2: Primjena TIP1 s dodatnim iskopom od 50 do 100 cm (prosječno 75 cm) do dna slojeva šljunčanih vreća, te postavljanje geotekstila i geomreža na dno iskopa, uz izradu kamenog nasipa do dna kolničke konstrukcije. Ispod kolničke konstrukcije postavlja se još jedan sloj geomreže (slika 25.)[6.]



Slika 25. Uređenje temeljnog tla - TIP 2 [6]

TIP3: Primjena TIP2 uz uređenje podloge debljine 20 cm i izvođenje šljunčanih stupova prosječne duljine 4 m i promjera 80 cm u rasteru 1,8x2 m. Iskop se vrši do 1,2 m ispod trenutne površine asfalta, s 20 cm tampona, 50 cm kamenog nasipa i 50 cm kolničke konstrukcije(slika 26.)[6].



Slika 26. Uređenje temeljnog tla - TIP 3[6]

U tablici 1. prikazani su predviđeni tipovi uređenja temeljnog tla (postojećeg nasipa) prema stacionažama predmetne trase.

Prilikom izvođenja radova moguća je promjena duljine ili tipa uređenja nasipa uz odobrenje investitora i projektanta ovog projekta, nakon pregleda stanja nasipa nakon uklanjanja kolničke konstrukcije.

Tipovi uređenja temeljnog tla odabrani su tako da se opterećenje s kolničke konstrukcije sigurno prenese na donje slojeve nasipa bez dodatnih deformacija[6].

Tablica 1. Vrsta odabrane sanacije pod duljini trase[6]

Stacionaža		Tip zaštite – dulina [m]		
od	do	1	2	3
0+000	0+150	150		
0+150	0+400		250	
0+400	0+500			100
0+500	0+860		360	
0+860	0+970			110
0+970	1+420		450	
1+420	1+570			150
1+570	2+000		430	
2+000	2+700	700		
2+700	3+000		300	
3+000	3+500			500
3+500	4+000		500	
4+000	6+500	2500		
6+500	7+000		500	
7+000	7+500			500
7+500	8+000		500	
8+000	9+000	1000		
9+000	9+300		300	
9+300	9+800			500
9+800	10+240		440	
UKUPNO:		4350	4030	1860

Predviđeno je fazno izvođenje radova na način da se određena dionica ceste iskopa do razine tampona, odnosno do razine uređenja temeljnog tla, maksimalno do 1,5 m (TIP2) ispod trenutne kote asfalta. Na mjestima gdje se izvode šljunčani stupovi, iskop se vrši do približno 1,2 m ispod trenutne kote, temeljno tlo se uređuje slojem kamenog materijala (tamponom) debljine 20 cm i izvode se šljunčani stupovi. Nakon dovršetka izvođenja, postavlja se dalje tip uređenja TIP2, pri čemu je debljina kamenog nasipa uvijek 50 cm iznad šljunčanih stupova[6].

3.3. Terenski istražni radovi

3.3.1. Istražno bušenje

Za potrebe sanacije predmetne trase, provedeni su istražni radovi koji su uključivali istražno bušenje, laboratorijska ispitivanja, geotehničku interpretaciju i inženjerskogeološku analizu postojećih podataka. Radovi su provedeni na tri lokacije duž predmetne trase, pri čemu su na svakoj lokaciji izvedene dvije bušotine. Bušotine su pozicionirane tako da je jedna postavljena na mjestu s deformacijama kolnika, a druga na mjestu bez deformacija. Analizom bušotina nije uočena značajna razlika u geotehničkim profilima tla.

Istražno bušenje na predmetnoj lokaciji ceste izvedeno je u listopadu 2019. godine. Bušenje je obavljeno strojnim bušećim garniturama, rotacijski, s kontinuiranim jezgrovanjem. Ukupno je izvedeno šest istražnih bušotina, svaka dubine 5 metara, što ukupno čini 30 metara. Sve bušotine su prošle kroz tijelo nasipa i završile u sloju podinskih glina. Položaj istražnih bušotina grafički je prikazan na situaciji u mjerilu 1:5000, koja je dana u prilogu 5.2. Izbušena jezgra je deponirana u sanduke za jezgru dužine 1 metar, tako da je dubinski ekvivalent jezgre od 1 metra odgovarao dužini sanduka. Jezgra je slagana u sanduke s lijeva na desno, odozgo prema dolje. Istražne bušotine su grafički obrađene, a fotodokumentacija jezgre prikazana je na geotehničkim presjecima bušotina ("logovima") koji se nalaze u prilogu 5.1. Tablični pregled izvedenih istražnih bušotina PPB-01 do PPB-06, s definiranim položajem u apsolutnim koordinatama (x, y, z), dan je u sljedećoj tablici[6]:

Tablica 2. Pregled izvedenih istražnih bušotina[6]

Istražno bušenje					
R.BR.	Oznaka sonde	Vrsta objekta	Dubina sonde (m)	Položaj sonde prema osi (m)	Stacionaža
1	PPB-1	Trasa-Nasip	5,00	L 2,4	3+189
2	PPB-2	Trasa-Nasip	5,00	D 3,1	3+189
3	PPB-3	Trasa-Nasip	5,00	L 2,8	7+383
4	PPB-4	Trasa-Nasip	5,00	L 2,5	7+452
5	PPB-5	Trasa-Nasip	5,00	L 2,6	9+550
6	PPB-6	Trasa-Nasip	5,00	L 2,3	9+569
		UKUPNO	30		

U sklopu istražnog bušenja izvršene su sljedeće aktivnosti[6]:

- Standardni penetracijski test (SPT)
- Uzorkovanje neporemećenih (NU) i poremećenih (PU) uzoraka
- Praćenje razine podzemne vode (za vrijeme bušenja i nakon izvedenog bušenja)

3.3.2. Standardni penetracijski test - SPT

Izvođenja SPT-a odvijao se na sljedeći način: na svakom mjernom mjestu bilježene su dubina i profil zatečenog tla, nivo vode u bušotini te tip korištenih šipki. Nakon spuštanja cilindra sa šipkama u bušotinu, bilježene su dubina do dna bušotine i inicijalna penetracija cilindra u tlo pod utjecajem vlastite težine. U svakoj bušotini se, ako je moguće, koristila ista garnitura za izvođenje SPT-a. U slučaju promjene garniture, tip garniture se navodio uz svako mjerno mjesto.

Prva faza testa uključivala je brojanje udaraca za penetraciju od 0,15 metara, koja je uključivala inicijalnu penetraciju od vlastite težine i težine šipki i opreme. Ako se ta penetracija nije mogla postići za 50 udaraca, bilježila se dubina penetracije za tih 50 udaraca, uz posebnu naznaku da je riječ o prvoj fazi testa. Zatim bi se bušenjem prelazilo na novo mjerno mjesto. Ako SPT ne bi uspio, pokušavao se identificirati uzrok neuspjeha i procijeniti mogućnost ponovnog izvođenja testa na novom mjernom mjestu uz upotrebu iste opreme. U tim uvjetima, test bi se priznao kao proveden[6].

Druga faza testa uključivala je brojanje udaraca za penetraciju cilindra za dodatnih 0,30 metara sa bilježenjem broja udaraca za svakih 0,15 metara penetracije. Zbroj tih udaraca davao je N vrijednost mjernog mjesta. Ako se penetracija od 50 udaraca nije mogla postići, postupak bi se ponovio kao u prvoj fazi testa.

Ispitivanje je trebalo izvoditi optimalnom brzinom koja omogućuje kvalitetno obavljanje traženih operacija, a frekvencija udaraca nije trebala prelaziti 15-18 udaraca u minuti.

Rezultati ispitivanja tla standardnim penetracijskim testom (SPT) u bušotinama PPB-01 do PPB-06 prikazani su u tablici 3[6].

Tablica 3. Rezultati standardnog penetracijskog testa[6]

Bušotona	Dubina		N1[0-15 cm]	N2[15-30 cm]	N3[30-45 cm]	N2+N3[30 cm]	Nož/Šiljak
	od	do					
PPB -1	1,3	1,75	2	3	4	7	N
PPB -1	5	5,45	1	3	4	7	N
PPB -2	1,3	1,75	3	4	6	10	N
PPB -2	5	5,45	2	3	4	7	N
PPB -3	1,25	1,7	4	5	7	12	N
PPB -3	5	5,45	2	3	3	6	N
PPB -4	1	1,45	2	3	5	8	N
PPB -4	5	5,45	2	3	5	8	N
PPB -5	1,4	1,85	3	4	6	10	N
PPB -5	5	5,45	2	3	4	7	N
PPB -6	1,4	1,85	3	4	5	9	N
PPB -6	5	5,45	3	4	4	8	N

3.3.3. Uzorkovanje neporemećenih (NU) i poremećenih (PU) uzoraka

Svrha uzorkovanja je prikupljanje uzoraka za laboratorijska ispitivanja kako bi se odredila geotehnička svojstva tla. U geotehničkom laboratoriju analizirana su fizička i mehanička svojstva neporemećenih i poremećenih uzoraka tla, u skladu s akreditiranim normama.

Tijekom uzorkovanja jezgra bušenja izvršene su sljedeće aktivnosti:

- Prikupljanje neporemećenih (NU) i poremećenih (PU) uzoraka za laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava tla.
- Poremećeni uzorci (PU) uzimani su za laboratorijska klasifikacijska ispitivanja sustavno iz svakog sloja (strukturnog elementa), minimalno po jedan uzorak. Ovi uzorci uzeti su iz sanduka i pohranjeni u plastične vrećice kako bi se zaštitili od gubitka vlage.
- Neporemećeni uzorci (NU) također su sustavno uzimani iz svakog sloja (strukturnog elementa) za laboratorijska ispitivanja (klasifikacija, čvrstoća, deformabilnost). Uzorci su prikupljeni uz pomoć uzorkivača i pohranjivani u skladu s važećim normama.

Tijekom transporta, uzorci su bili smješteni u odgovarajućim sanducima koji su ih štitili od vanjskih utjecaja poput vrućine, hladnoće, vibracija i udaraca. Prilikom preuzimanja uzoraka, izvršena je njihova inventarizacija (broj NU i PU), pregled te su zaduženi i pohranjeni u vlažnoj komori. Nakon definiranja programa ispitivanja, na uzorcima su provedena laboratorijska ispitivanja.

Pregled prikupljenih neporemećenih (NU) i poremećenih (PU) uzoraka tijekom istražnog bušenja i provedenih laboratorijskih ispitivanja prikazan je grafički u formi geotehničkih presjeka bušotina (logovima bušotina) koji se mogu naći u prilogu[6].

3.3.3. Geotehnička klasifikacija jezgre bušenja

U sklopu istraživanja, provedena je geotehnička terenska determinacija i klasifikacija jezgre bušotina, obuhvaćajući ukupno šest bušotina označenih kao PPB-01 do PPB-06. Jezgre su nakon bušenja pažljivo složene u drvene i metalne strukture koje su segmentirane po metarskim jedinicama, čime je osigurana precizna analiza i preglednost uzoraka.

Proces konačne geotehničke determinacije i klasifikacije obuhvatio je detaljnu terensku klasifikaciju kombiniranu s rezultatima laboratorijskih ispitivanja. Ova sveobuhvatna analiza omogućila je preciznu procjenu geotehničkih svojstava tla. Rezultati su prikazani na geotehničkim presjecima, odnosno logovima istražnih bušotina, koji se mogu pronaći u prilogu.

Ovaj pristup omogućio je sveobuhvatan uvid u karakteristike tla na istraživanom području, uzimajući u obzir sve relevantne faktore koji utječu na geotehničke osobine tla. Priloženi geotehnički presjeci pružaju jasan i sistematičan prikaz svih važnih informacija dobivenih tijekom istražnog procesa, čime se osigurava visoka razina točnosti i pouzdanosti rezultata[6].

3.4. Laboratorijski istražni radovi

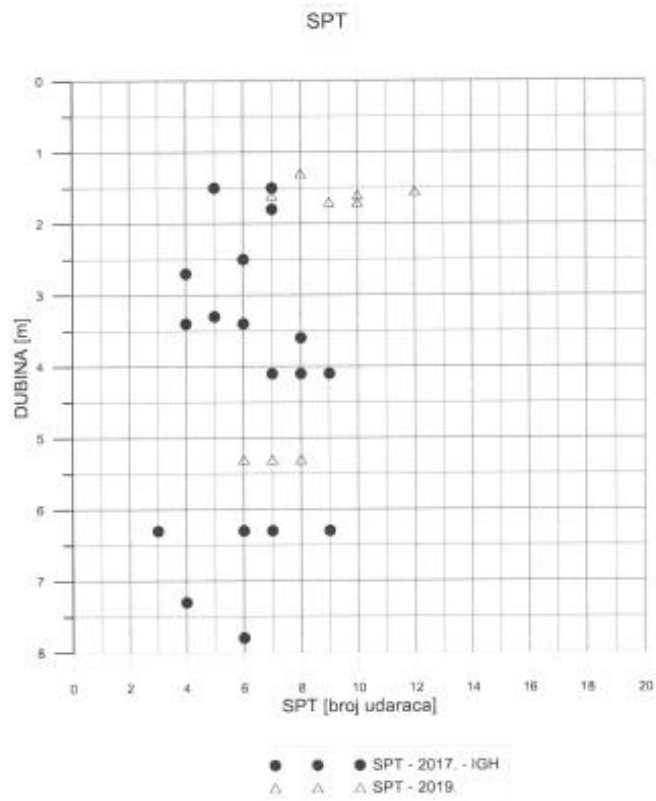
U akreditiranom geotehničkom laboratoriju Geotehničkog fakulteta u Varaždinu, tijekom razdoblja od listopada do studenog 2019. godine, provedena su ispitivanja na reprezentativnim poremećenim (PU) i neporemećenim (NU) uzorcima tla. Ispitivanja koja su izvedena nalaze se u tablici 4.

Tablica 4. Ispitivanja koja su vršena na uzorcima tla

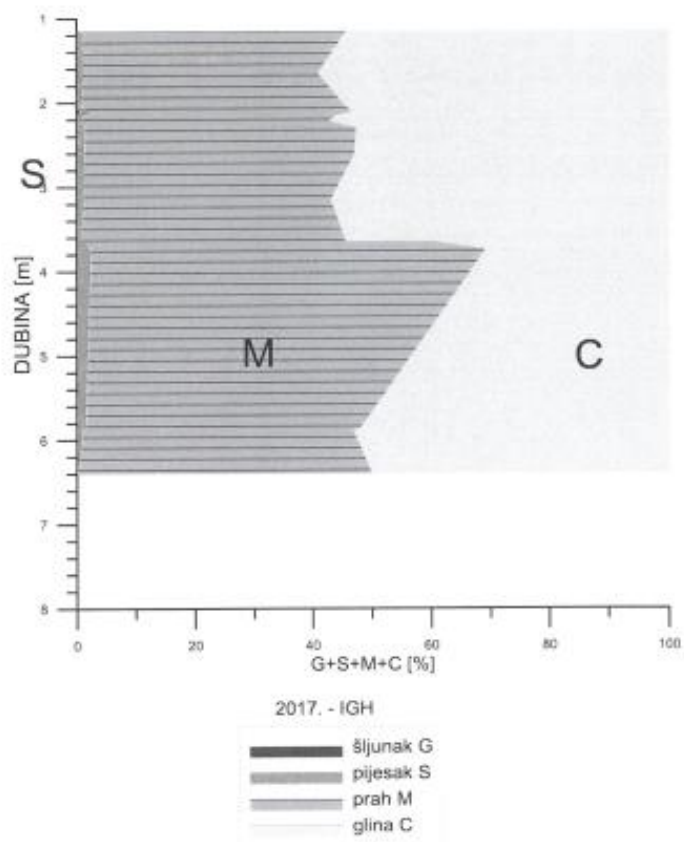
Oznaka norme	Naziv norme u slobodnom prijevodu
*ASTM D2216	Određivanje vlažnosti uzorka tla
*BS 1377-2; točka 4.4	Određivanje granice tečenja pomoću konusnog penetrometra
*BS 1377-2; točka 5	Određivanje granica plastičnosti i indeksa plastičnosti
*HRN EN ISO 17892-4	Određivanje granulometrijskog sastava tla
ASTM D2166	Jednoosna tlačna čvrstoća sa slobodnim bočnim širenjem

*-akreditirane ispitne metode

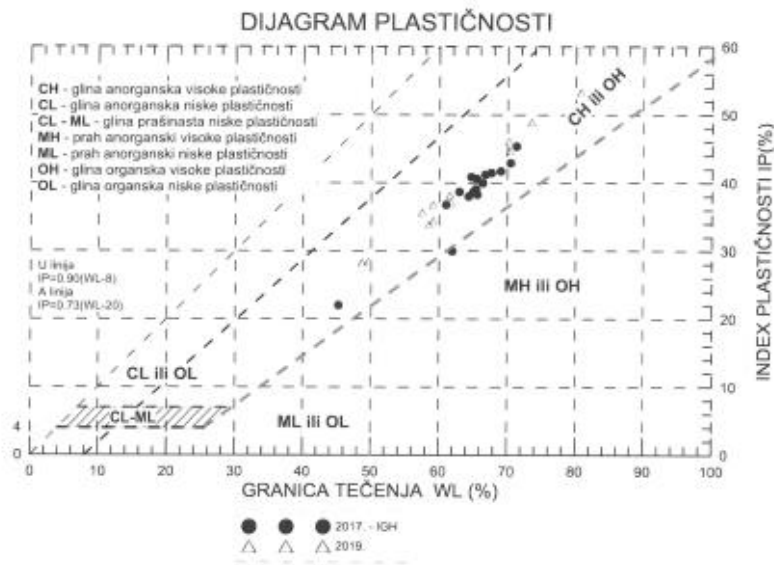
U nastavku su prikazani rezultati svih laboratorijskih ispitivanja koja su bila dostupna, uključujući ispitivanja provedena od strane IGH iz 2017. godine, kao i ispitivanja provedena tijekom ove faze istraživanja (slike 23. do 28.)[6].



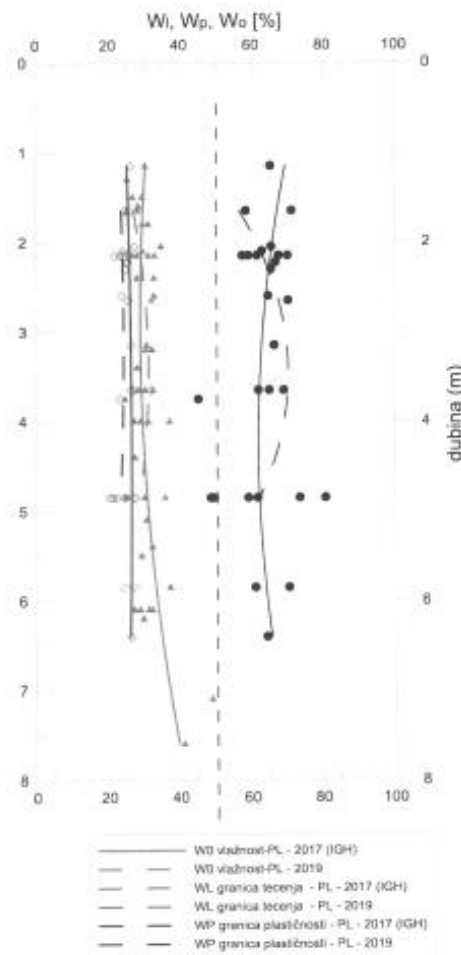
Slika 28. Graf s brojem udaraca SPTa[6]



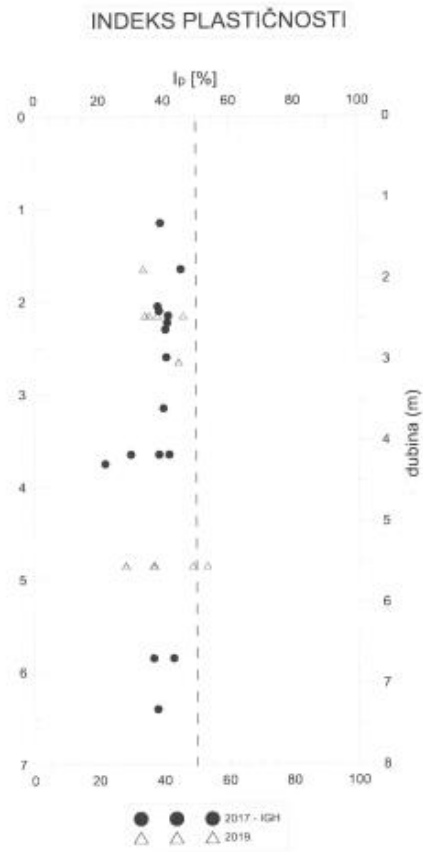
Slika 27. Prikaz granulometrijskog sastava nasipa/podinskih glina[6]



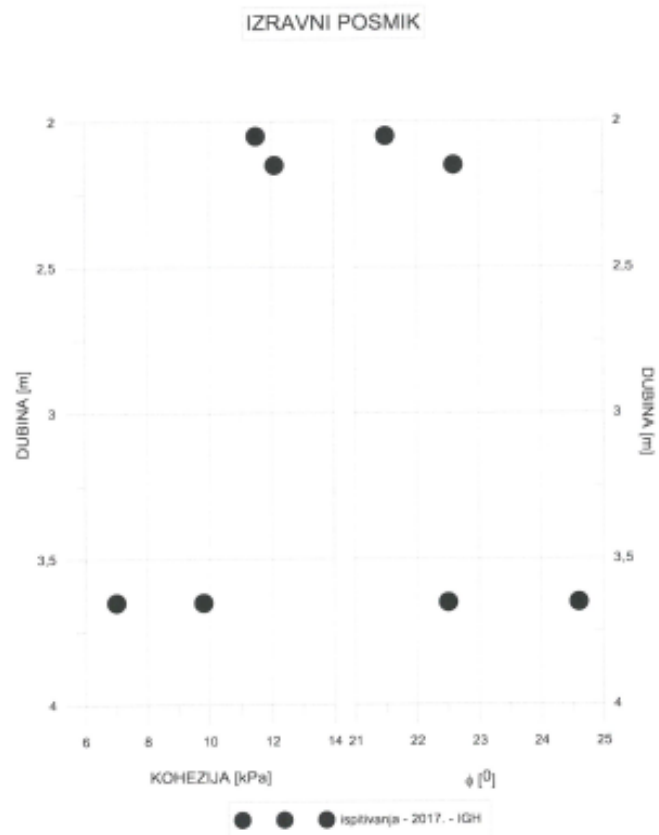
Slika 30. Dijagram plastičnosti[6]



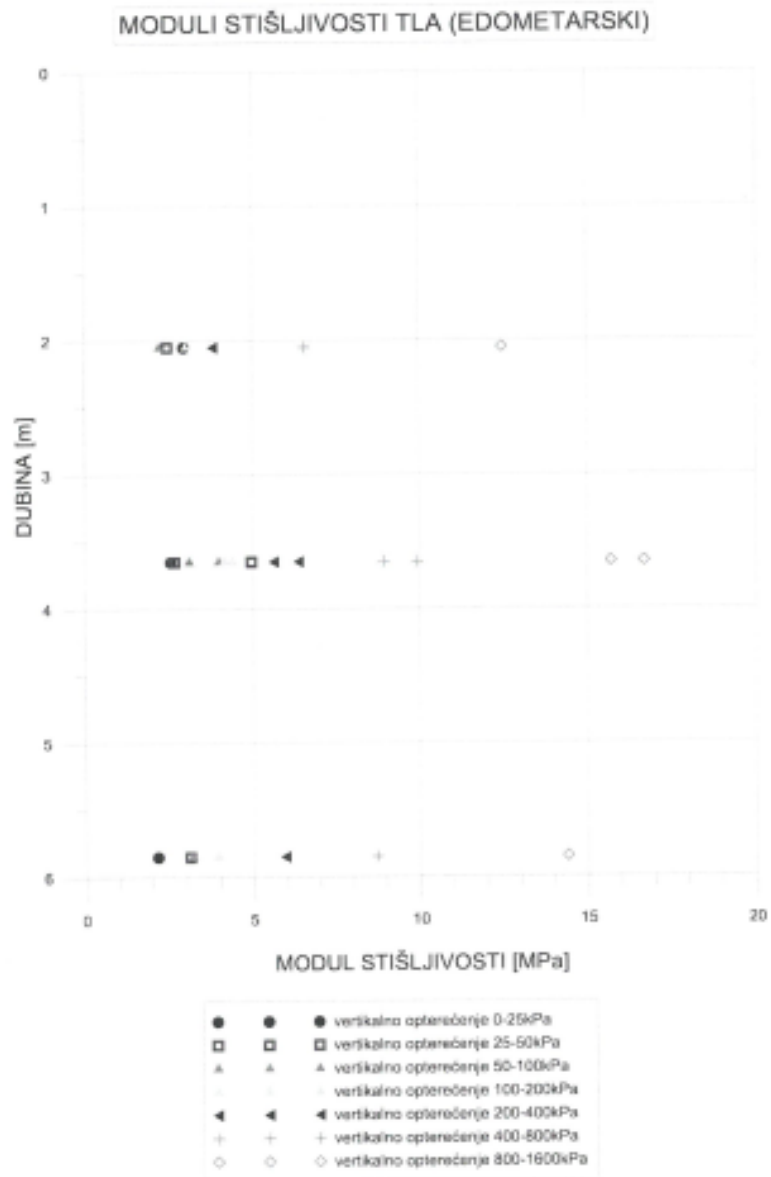
Slika 29. Prirodna vlažnost, granica tečenja, granica plastičnosti[6]



Slika 32. Indeks plastičnosti[6]



Slika 31. Izravni posmik[6]



Slika 33. Edometarski modul stišljivosti [6]

3.5. Inženjersko-geološka istraživanja

3.5.1. Osnovne geološke značajke istraživanog područja

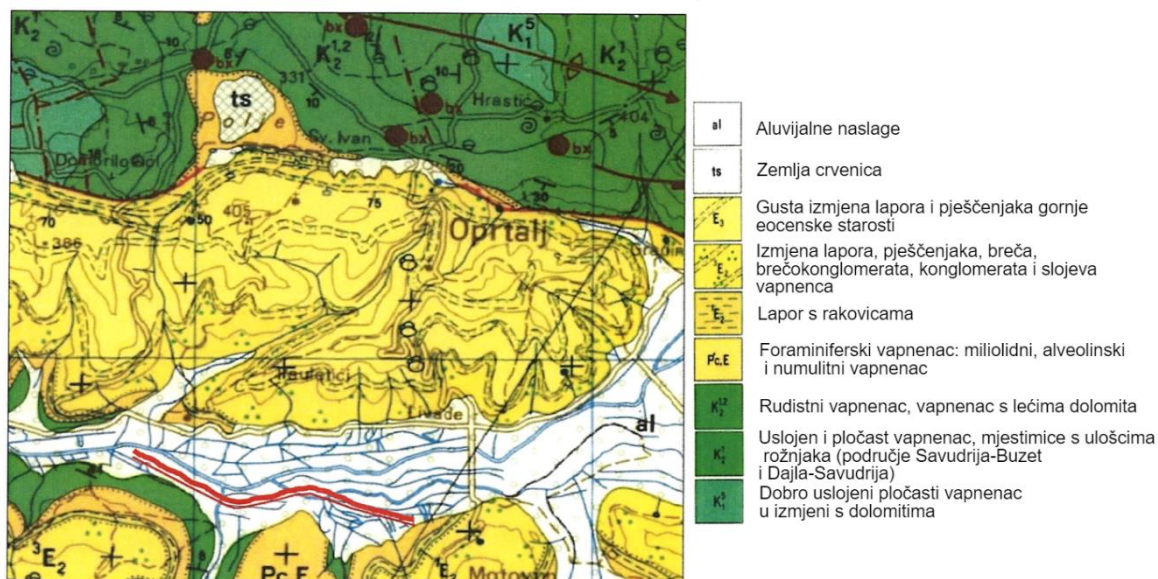
Prema Osnovnoj geološkoj karti, list Trst (Geološki zavod Ljubljana i Institut za geološka istraživanja Zagreb, 1951. - 1964.)(slika 29.), šire područje predmetne lokacije izgrađeno je od naslaga krede, paleogena i kvartara. Najstarije naslage pripadaju donjoj kredi (K_1^5 -alb), a karakterizirane su dobro uslojenim do pločastim vapnencima u izmjeni s dolomitima. Na donjokredne karbonate kontinuirano se nadovezuju naslage gornje krede ($K_2^{1,2}$ -cenoman-turon), koje se sastoje od uslojenih i pločastih vapnenaca s mjestimičnim ulošcima rožnjaka u starijem dijelu te deblje uslojenih rudistnih vapnenaca i leća dolomita u mlađem dijelu.

Paleogene naslage južno od predmetne lokacije nalaze se u normalnom kontaktu, dok su sjeverno od lokacije u rasjednom kontaktu s naslagama krede, gdje su starije naslage navučene na mlađe. Reversni rasjed, koji odvaja naslage krede i paleogena, proteže se u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Naslage paleogenske starosti uključuju nekoliko važnih jedinica. Foraminiferski vapnenci donjeg i srednjeg eocena (Pc, E) mogu se podijeliti na miliolidne, alveolinske i numulitne vapnence, pri čemu njihova slojevitost varira od dobro uslojenih paketa do slabo slojevitih, gromadastih i masivnih slojeva. Prijelazne naslage srednjeg eocena (E) predstavljaju specifične prijelazne slojeve između foraminiferskih vapnenaca i fliškolikih naslaga, karakterizirane specifičnim sedimentnim obilježjima. Fliškolike naslage srednje i gornje eocenske starosti (E, E) sastoje se od izmjene lapora, pješčenjaka, breča, brečokonglomerata i konglomerata, te rjeđe slojeva vapnenaca, i imaju obilježja kao što su ritmičko izmjenjivanje sedimentata, izražena gradacija zrna i orijentirane sedimentne teksture.

Donji dio prijelaznih naslaga sastoji se od slojeva s rakovicama, koji se pružaju u uskim zonama uz numulitne vapnence. Ovi slojevi sastoje se od laporovitih vapnenaca i vapnenih lapora te gomoljastih vapnenaca. Šire područje oko doline rijeke Mirne zauzimaju fliškolike naslage, koje se sastoje od izmjene lapora, pješčenjaka, breča, brečokonglomerata i konglomerata te rjeđe i slojeva vapnenaca. Iako navedene naslage ne odgovaraju tipskim naslagama fliša u Alpama, imaju neka obilježja fliša poput ritmičkog izmjenjivanja sedimentata, izražene gradacije zrna, oštrog kontakta

pješčenjaka s laporima u padini te pojave orijentiranih sedimentnih tekstura. Naslage su karakterizirane obiljem fosila i lateralno promjenjivim debljinama slojeva.

Od kvartarnih naslaga izdvajaju se zemlja crvenica (terra rossa - ts) i aluvijalne naslage (al). Izdizanje područja Istre tijekom tercijara i kvartara dovelo je do ispiranja i trošenja sedimentnih stijena, što je rezultiralo stvaranjem debelih aluvijalnih nanosa u dolinama postojećih riječnih tokova. Uža lokacija istraživanja, državna cesta DC44 na dionici 002, od km 0+000 do km 10+240,00, nalazi se u dolini rijeke Mirne. Teren se sastoji od aluvijalnih naslaga, uglavnom sastavljenih od gline i ilovače sive i sivoplave boje, nastalih trošenjem eocenskih lapora i nanošenjem mulja u dolinu. U manjoj količini u aluviju se nalaze pijesak i šljunak[6].



Slika 34. Isječak iz OGK list Trst s prikazanom lokacijom istraživanja označenom crvenom bojom[6]

3.5.2. Inženjerskogeološke značajke istraživanog područja

Istražno bušenje izvedeno je na kolniku nasipa na ukupno pet lokacija: lokacija 1 na stacionaži približno 0+900,00 km, lokacija 2 na stacionaži približno 1+500,00 km, lokacija 3 na stacionaži približno 3+200,00 km, lokacija 4 na stacionaži približno 7+400,00 km i lokacija 5 na stacionaži približno 9+600,00 km. Ukupno je izvedeno dvanaest istražnih bušotina, s dvije do tri bušotine po svakoj lokaciji. Dubine bušotina kreću se od 5 do 7,5 metara.

Prema rezultatima istražnog bušenja, vidljivo je da je površina terena pokrivena asfaltom, odnosno miješanim materijalom kolničke konstrukcije ceste (nasip, drobljeni kamen), debljine od 0,70 do 1,55 metara. Ispod površinskog pokrivača, nasip je do

kraja bušotina prilično ujednačenog sastava. Nasip je izgrađen uglavnom od visokoplastične gline s velikim udjelom praha, koja se može opisati kao lako do teškognječiva i teškognječiva konzistencije, mjestimice s ostacima korijenja i crne organske tvari. Broj udaraca Standardnog Penetracijskog Testa (SPT) kreće se od 4 do 10. Neporemećeni uzorci ispitani u laboratoriju pokazuju čvrstoću od 85 do 210 kPa. Boja varira od tamnosive, sivozelene do sivoplave, prošarana smeđim i žutosmeđim nijansama[6].

3.6. Geotehničke karakteristike tla

Analizom i interpretacijom provedenih rezultata laboratorijskih ispitivanja, in-situ ispitivanja, stručne literature te primjenom stečenih iskustava, izrađen je geotehnički model i odabrani su geotehnički parametri za proračune. U nastavku su prikazane geotehničke karakteristike tla. Prognozni geotehnički profili prikazani su u prilogima od 03 do 06.

Za sve lokacije na predmetnoj trasi na kojima su provedeni istražni radovi (dvije lokacije IGH-a i tri lokacije u ovoj fazi) utvrđena je dovoljna sličnost uvjeta i karakteristika slojeva tla, što je omogućilo definiranje jednog geotehničkog modela za cijelu trasu.

Sastav tla do dubine izvedenih bušotina može se podijeliti u tri sloja: konstrukcija ceste, nasip od gline (N) i glina visoke plastičnosti - podinske gline (Q).

Sloj 1 - Konstrukcija ceste sastoji se od sloja asfalta, tampona i mješavine šljunka i gline. Ovaj sloj ustanovljen je u svim bušotinama, s dubinom koja varira od 0,7 do 1,55 metara. Na vanjskom rubu kolnika dubine su nešto veće u odnosu na središnji dio kolnika. Na nekim lokacijama vidljivo je postojanje više slojeva asfalta, što ukazuje na deformaciju kontakta nasipa i kolničke konstrukcije, odnosno utiskivanje kamenog materijala u nasip.

Granulometrijski udjeli komponenti na šest ispitanih uzoraka su sljedeći:

Glina 3,5 - 8,2%,

Prah 6,6 - 14,3%,

Pijesak 12,5 - 20%,

Šljunak 63,2 - 74,1%.

Sloj 2 - Nasip od gline karakterizira visoka plastičnost, lako do srednje gnječiva konzistencija i sivo zelena boja sa smeđim proslojcima. Na lokacijama je nasip definiran do dubine od 3,8 metara. Detektirane dubine kontakta nasipa s podlogom su do 1 metar ispod sadašnje razine terena, prema geodetskoj snimci nasipa.

Granulometrijski udjeli komponenti na deset ispitanih uzoraka su sljedeći:

Glina 50,01-59,06%,

Prah 39,93-49,86%,

Pijesak 0,13-2,06%

Šljunak 0,0-0,31%.

Indeksi plastičnosti iznose između 33,9 i 44,7%. Ispitivanje izravnog posmika na dva uzorka pokazalo je vrijednosti parametara čvrstoće: kohezija (c) iznosi 11,5 i 12,1 kN/m^2 , a kut unutarnjeg trenja (φ) iznosi 21,5° i 22,6°.

Ispitivanja jednodimenzionalne konsolidacije provedena su na dva uzorka, pri čemu su dobivene vrijednosti modula stišljivosti koje se podudaraju s rezultatima terenskih ispitivanja SPT-a. Broj udaraca SPT-a iznosi 4 do 10, što odgovara vrijednostima kolekcije E/N60 od 1 MPa.

Standardnim Proctorovim pokusom na četiri uzorka utvrđeno je da je vlažnost materijala ($W_0 = 25,3-32,8\%$) veća od optimalne ($W = 23,3-24,2\%$). Gustoća nasipa ($\rho = 1,31-1,50 \text{ Mg/m}^3$) manja je za 1-14% od standardne maksimalne gustoće prema Proctoru ($\rho = 1,52-1,53 \text{ Mg/m}^3$).

Sloj 3 - Glina (Q) varira od niske do visoke plastičnosti, s konzistencijom od lako do teško gnječive. Boja varira od sivoplave do sivozelene, s prisutnim smeđim proslojcima. Ovaj sloj ustanovljen je u svim bušotinama do dubine bušenja.

Granulometrijski udjeli komponenata na šest ispitanih uzoraka su sljedeći:

Glina: 30,96-54,54%

Prah: 44,50-66,73%

Pijesak: 0,89-2,31%

Šljunak: 0,0%

Indeksi plastičnosti iznose od 22% do 53%. Ispitivanje izravnog posmika na dva uzorka pokazalo je vrijednosti parametara čvrstoće s kohezijom (c) u rasponu od 7,0 do 10,0 kN/m² i kutom unutarnjeg trenja (φ) u rasponu od 23° do 25°.

Jednoosna tlačna čvrstoća ispitana je na tri uzorka, pri čemu su dobiveni rezultati u rasponu od 85 do 215 kPa. Dodatna ispitivanja provedena su na dva uzorka, a rezultati su prikazani na grafovima u točki 4. ovog projekta. Tablični i pojedinačni rezultati mogu se pronaći u prilogu[6].

3.7. Geotehnički proračuni pomoću programa Settle 3

3.7.1. Opis programskog softvera Settl3

Settl3 napredni je softverski program razvijen od tvrtke Rocscience. Služi za analizu slijeganja temeljnog tla te mu je glavna namjena simulacija i procjena vertikalnog slijeganja pod utjecajem opterećenja. Program omogućava precizne analize i vizualizacije slijeganja tla u trodimenzionalnom prostoru (3D). Podržava različite metode analize slijeganja kao što su teorija elastičnosti, teorija konsolidacije i empirijske metode.

3.7.2. Ulazni podaci modela

U Settle3 programu modelirala su se dva različita modela koji su predstavljali stanje prije i stanje nakon poboljšanja. Parametri koji su se koristili za modeliranje tla prikazani su u tablici 5. Projektom su definirani šljunčani stupnjaci promjera 0.8 m i duljine 4 m koji su postavljeni u rasteru 1.8x2.0 m (poprečno x uzdužno). Šljunčani stupnjak u uzdužnom smjeru pokriva površinu od $A_z = 0.8 * 2.0 = 1.6 \text{ m}^2$. Rezultat o zamjenskom modulu stišljivosti M_{ss} dobiven je na temelju omjera površine šljunčanog

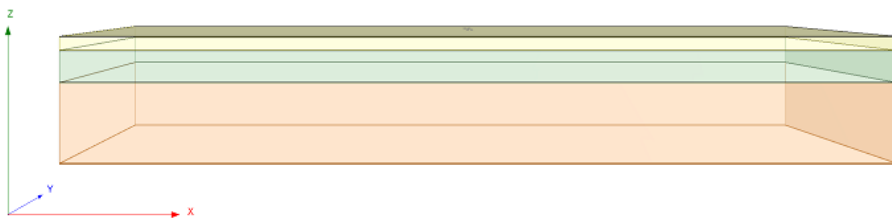
stupa $A_{\check{s}s}$ i površine koju šljunčani stup pokriva u uzdužnom smjeru A_z ($A_z = 0.8^2 * \pi / 4 = 0.5 \text{ m}^2$). Za osnovni modul stišljivosti šljunčanih stupnjaka uzeta je vrijednost od 100 MPa[6].

$$M_{\check{s}s, \text{ zamjenski}} = \frac{A_{\check{s}s}}{A_z} * M_{\check{s}s} = \frac{0,5}{1,6} * 100 = 31,25 \text{ MPa}$$

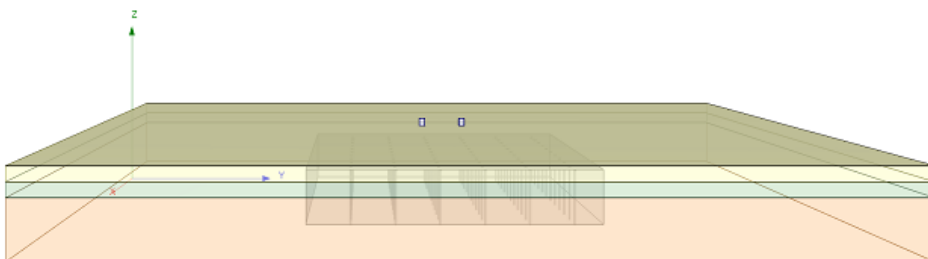
Tablica 5. Ulazni podaci za model 1 i 2

Sloj	Model 1 – prije poboljšanja			Model 2 – nakon poboljšanja		
	Es (Mpa)	v	d(m)	Es (Mpa)	v	d(m)
Kolnička konstrukcija	100	0,25	0,3	120	0,25	0,5
Nasip kameni	30	0,25	0,7	40	0,25	0,5
Nasip glina	3	0,3	1,75	3	0,3	2,0
Šljunčani stupovi	-			31,25	0,25	2,0

U program Settle3 definirani su slojevi tla (slika 35.) sa svim karakteristikama iz tablice 5., zanemario se trapezni oblik nasipa te se on modelirao kao kvadratni sa fiksnim rubnim uvjetima. U modelu 2 koji je vidljiv na slici 36. dodano je poboljšanje tla u obliku šljunčanih stupnjaka sa definiranim modulom elastičnosti dužine 2 m. Oba modela opterećena su standardnim osovinskim opterećenjem od 80 kN[6].



Slika 35. Prikaz slojeva tla u Settle3

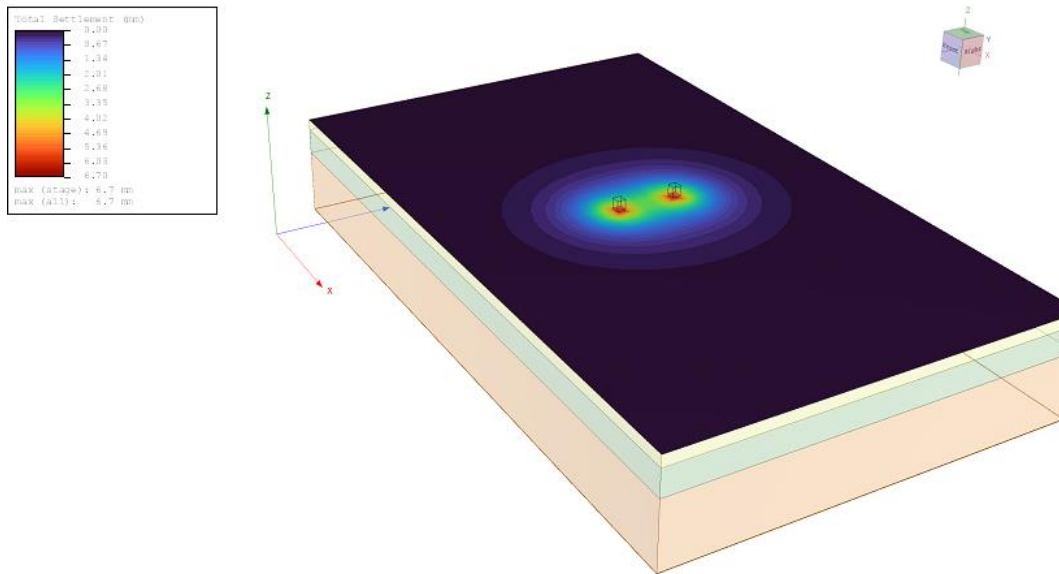


Slika 36. Prikaz slojeva tla i poboljšanje tla u Settle3

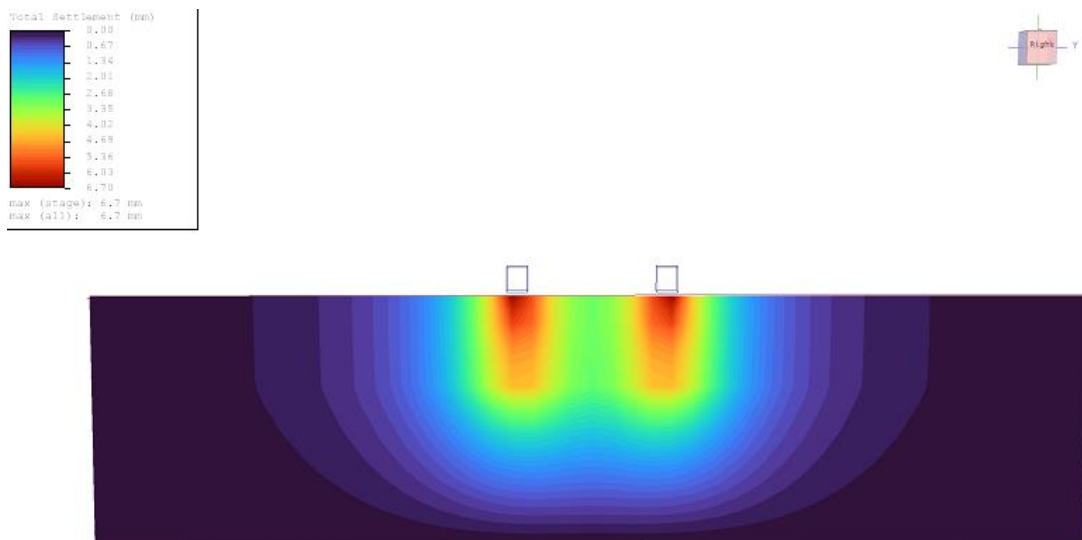
3.7.3. Rezultati provedene analize

Nakon podešavanja modela i provedbe analiza u Settle3 programskom softveru dobiveni su sljedeći podaci za slijeganje tla:

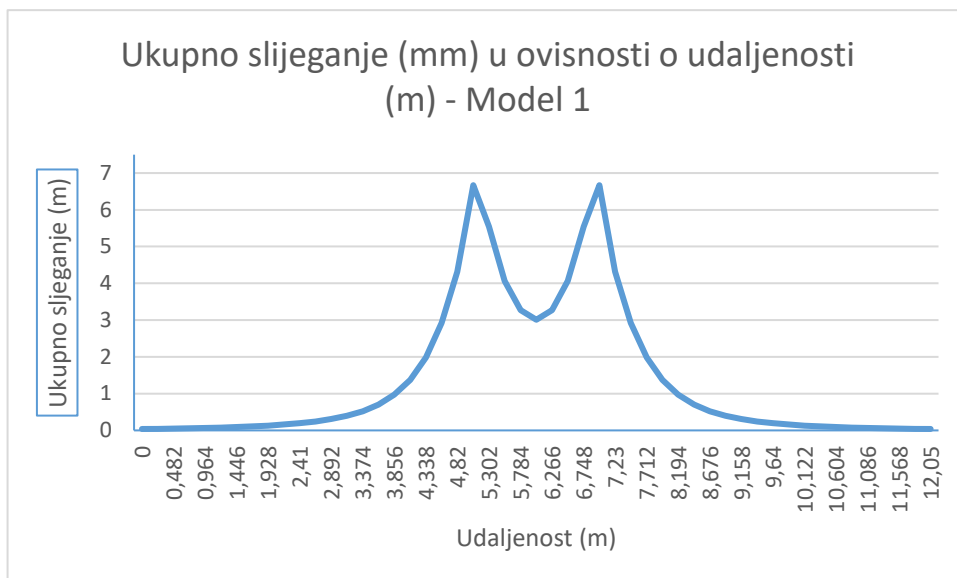
- Slijeganje prije poboljšanja prikazano je na slikama 37., 38. te 39.



Slika 37. Prikaz 3D modela - slijeganja prije poboljšanja tla

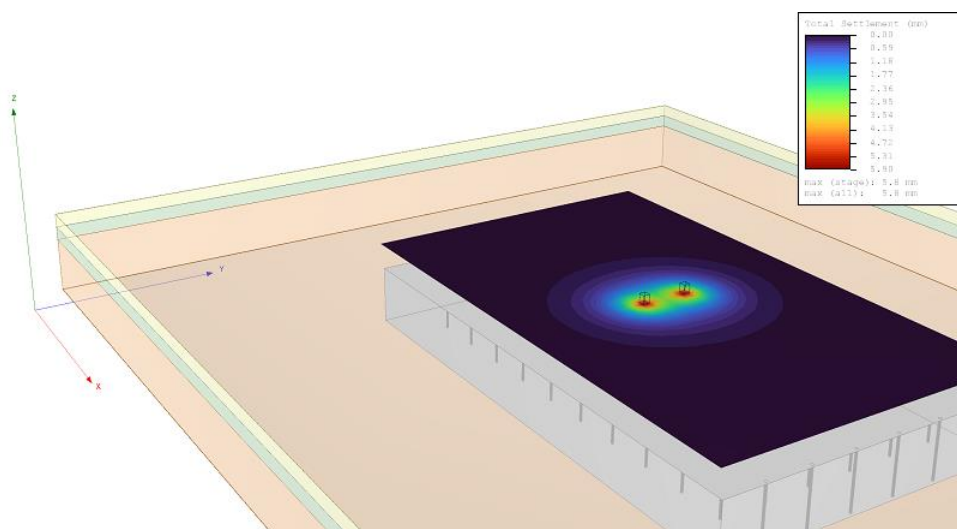


Slika 38. Prikaz presjeka modela - slijeganja prije poboljšanja tla

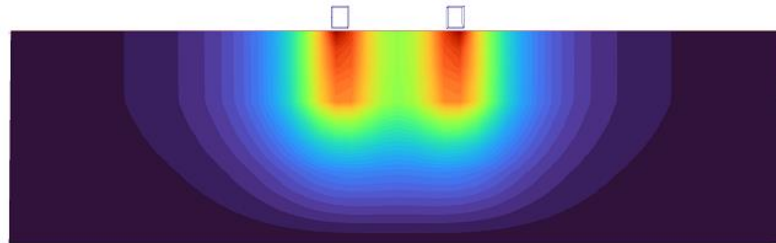
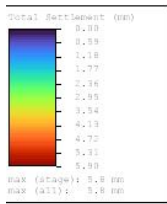


Slika 39. Prikaz grafa slijeganja prije poboljšanja tla

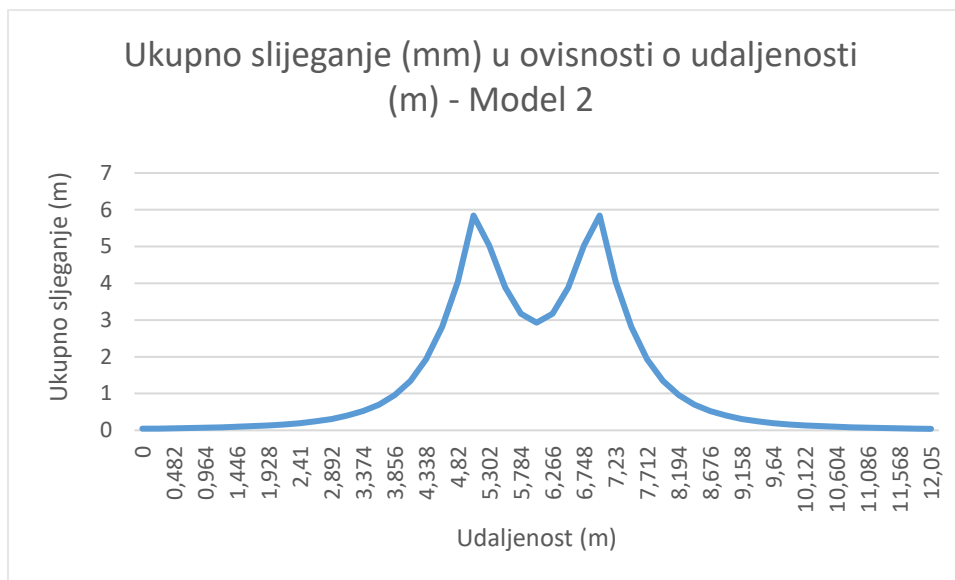
- Slijeganje nakon poboljšanja prikazano je na slikama 40., 41. te 42.



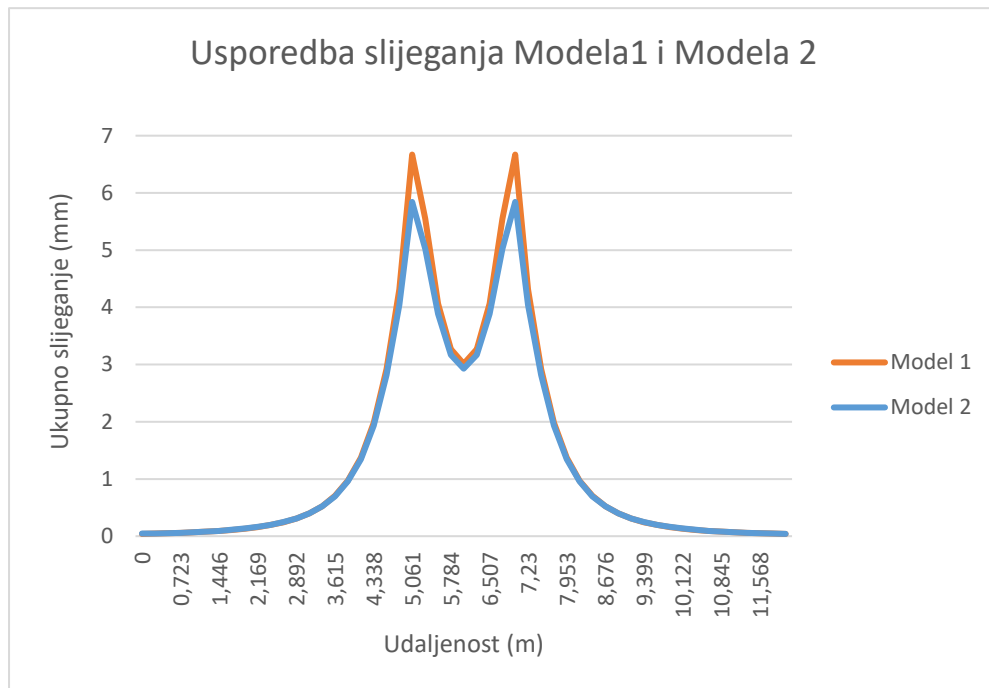
Slika 40. Prikaz 3D modela - slijeganja nakon poboljšanja tla



Slika 42. Prikaz presjeka modela - slijeganja nakon poboljšanja tla



Slika 41. Prikaz grafa slijeganja nakon poboljšanja tla



Slika 43. Prikaz grafova slijeganja prije i nakon poboljšanja tla

Kod oba modela najizraženije slijeganje je u točkama opterećenja. Što se više udaljimo prema krajevima modela slijeganje je sve manje. Model 1 (prije poboljšanja) prikazuje veće ukupno slijeganje u odnosu na Model 2 (nakon poboljšanja). Najveća razlika između modela je vidljiva u točkama opterećenja gdje je slijeganje Model 1 (6,7 mm) nešto veće vrijednosti od slijeganja Modela 2 (5,8 mm). Razlika početnog stanja i stanja nakon sanacije iznosi 0.9 mm.

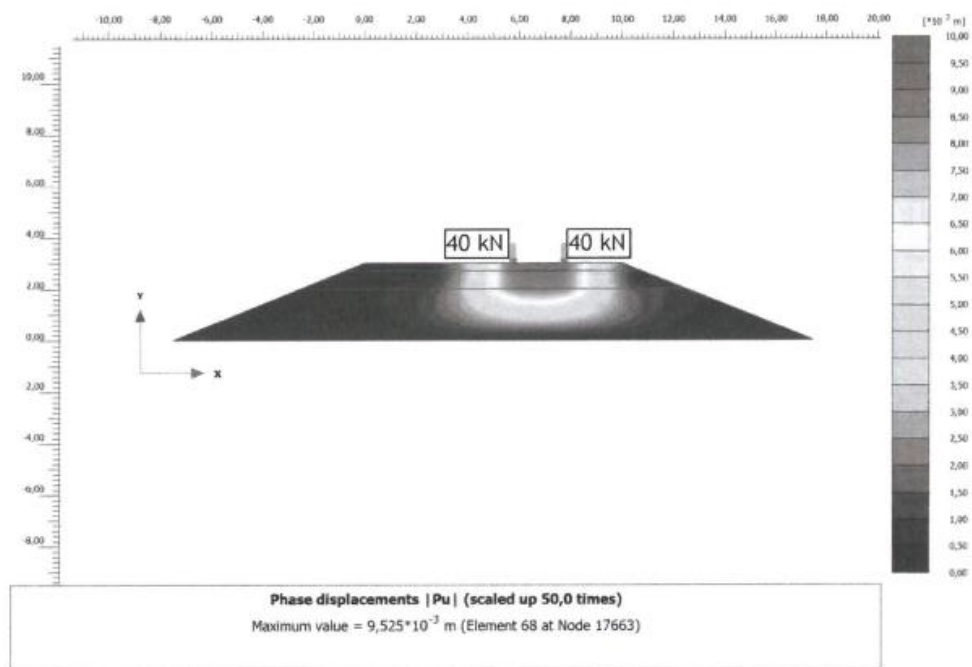
Smanjenje ukupnog slijeganja u Modelu 2 u usporedbi s Modelom 1 potvrđuje da su šljunčani stupovi uspjeli smanjiti slijeganje nasipa, što je jedan od glavnih ciljeva geotehničkog poboljšanja. Poboljšanje je posebno vidljivo u središnjem dijelu nasipa, gdje su stupovi najviše utjecali na smanjenje deformacija.

3.7.4. Rezultata analize iz projekta sanacije DC 44

Na slikama 44., 45. i 46. vidljivi su rezultati modeliranja u Plaxis 2D Basic programu koji se koristio za provedbu analize slijeganja u projektu. Program proračun naponsko deformacijskog stanja provodi metodom konačnih elemenata. Analiza je provedena na ravninskom modelu. Analiza deformacija provedena je za osovinsko opterećenje od 80 kN u statičkim uvjetima. Na taj način dobio se osnovni uvid u mehanizam sloma kolničke konstrukcije i utjecaj predviđenih mjera sanacije. Projektom su definirana tri oblika sanacije te je isto tako provedena analiza slijeganja za sva tri tipa sanacije za

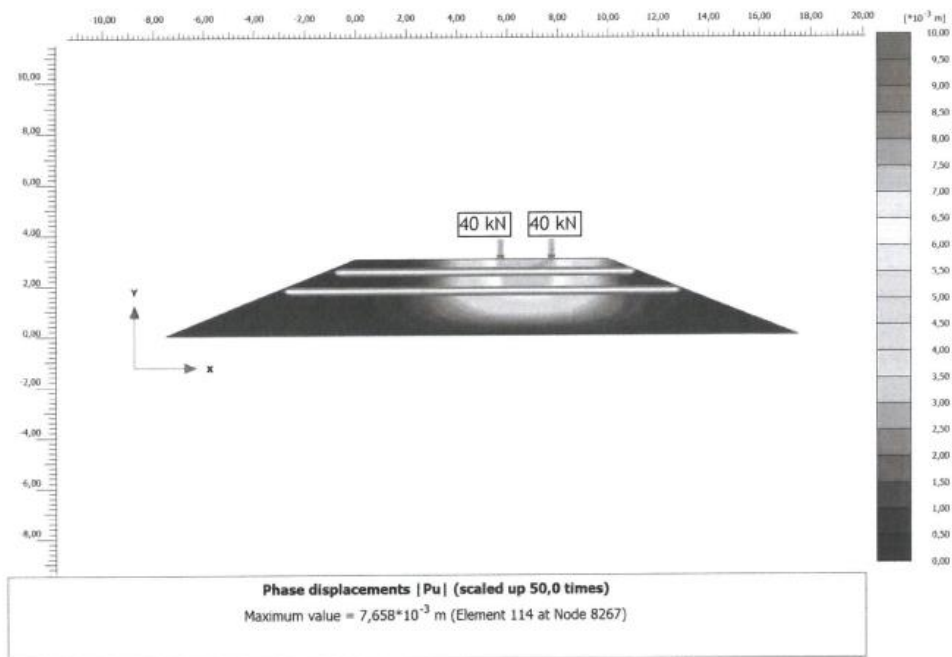
stanje prije i nakon sanacije prema parametrima u tablici 5. U ovom radu fokus će biti na Tipu 1 i Tipu 3 vrsti sanacije[6].

Na slici 44. vidljivi su rezultati analize te je vidljivo da su deformacije koncentrirane na kolničku konstrukciju te da je za simetrično osovinsko opterećenje nešto veća deformacija na rubu kolnika. Veće deformacije vidljive su u tijelu nasipa koje su uzrokovane cikličkim ponavljanjem opterećenja i samim time utiskivanja materijala u tijelo nasipa.



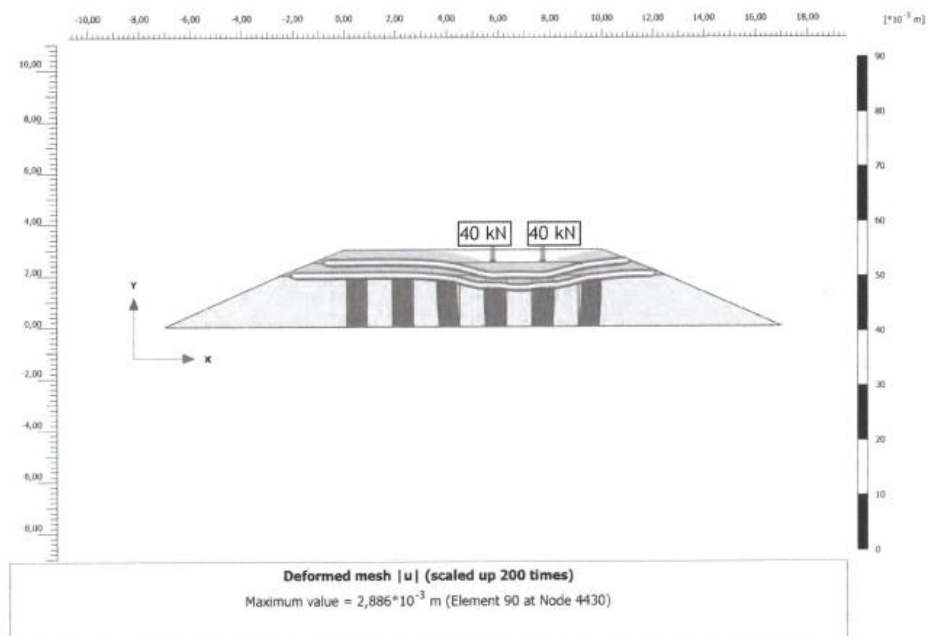
Slika 44. Prikaz slijeganja prije sanacije – maksimalna vrijednost slijeganja iznosi 9,525 mm []

Na slici 45. prikazani su rezultati analize za Tip 2 oblik sanacije temeljnog tla. Usporedbom rezultata sa slike 44. te 45. vidljivo je da su upotrebom geomreža deformacije manje za isto opterećenje. Također, vidljivo je da deformacije nisu toliko koncentrirane, a to je posljedica rasprostiranja opterećenja uslijed ugradnje geomreža[6].



Slika 45. Prikaz slijeganja za Tip 2 vrstu sanacije – maksimalna vrijednost slijeganja iznosi 7,6 mm [6]

Analiza deformacija uz upotrebu geomreža i šljunčanih stupnjaka dodatno je umanjena za isto opterećenje. Deformacije su još manje koncentrirane zbog upotrebe geomreža koje rasprostiru opterećenje te zbog izvedbe stupnjaka[6].



Slika 46. Prikaz slijeganja za Tip 3 vrstu sanacije – maksimalna vrijednost slijeganja iznosi 2,8 mm [6]

3.7.4. Zaključak provedenih analiza

Modeliranje u programu Settle3 pokazalo je smanjenje slijeganja tla nakon poboljšanja u usporedbi s početnim stanjem. Maksimalno slijeganje u modelu prije poboljšanja (Model 1) iznosilo je 6,7 mm, dok je nakon poboljšanja (Model 2) iznosilo 5,8 mm. Može se zamijetiti da je uporabom šljunčanih stupnjaka došlo do minimalnog poboljšanja. Glavna razlika u slijeganju između dva modela vidljiva je u točkama opterećenja, gdje se smanjenje iznosi 0,9 mm.

Analiza u Plaxisu, koja koristi metodu konačnih elemenata, također je pokazala smanjenje deformacija tla nakon primjene sanacijskih mjera. Za različite tipove sanacije, maksimalne vrijednosti slijeganja varirale su od 7,6 mm (Tip 2) do 2,8 mm (Tip 3). Uvođenje geomreža i šljunčanih stupova rezultiralo je dodatnim smanjenjem deformacija u usporedbi s početnim stanjem

Oba programa pokazuju smanjenje slijeganja tla nakon primjene poboljšanja. Plaxis pruža detaljniju analizu deformacija u ravninskom modelu, dok Settle3 daje uvid u trodimenzionalne promjene. Efikasnost sanacijskih mjera vidljiva je u oba pristupa, iako su apsolutne vrijednosti slijeganja različite zbog razlika u metodama modeliranja i proračuna.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad bavio se istraživanjem učinkovitosti šljunčanih stupnjaka kao metode poboljšanja tla ispod nasipa državne ceste DC44, koja prolazi kroz područje sa složenim geotehničkim uvjetima. Kroz detaljnu analizu numeričkih modela, istraženi su mehanizmi djelovanja šljunčanih stupnjaka u povećanju nosivosti tla i smanjenju sljeganja. Numeričke analize provedene u programu Settle3 omogućile su detaljnu simulaciju stanja tla prije i nakon primjene šljunčanih stupnjaka ispod nasipa ceste DC44.

U modelu prije poboljšanja (Model 1), zabilježeno je značajno sljeganje u točkama najvećeg opterećenja, s najvećom vrijednošću slijeganja od 67 mm. Ova vrijednost jasno pokazuje da je tlo bez dodatnih mjera poboljšanja iznimno sklono deformacijama, što dugoročno može dovesti do nestabilnosti nasipa i oštećenja kolničke konstrukcije. Slijeganje je najizraženije u središnjim dijelovima nasipa, gdje se prometno opterećenje koncentrira.

Nakon ugradnje šljunčanih stupnjacima, model poboljšanog tla (Model 2) pokazao je značajno smanjenje deformacija, s najvećim zabilježenim slijeganjem od 58 mm, što je smanjenje od gotovo 10%. Ova razlika u slijeganju jasno ukazuje na učinkovitost šljunčanih stupnjaka u stabilizaciji tla i smanjenju ukupnih deformacija. Analize su također pokazale da je primjena šljunčanih stupnjaka posebno učinkovita u smanjenju diferencijalnog slijeganja, što doprinosi očuvanju ravnosti kolnika i sprječava pojavu pukotina i drugih oštećenja.

Primjenom šljunčanih stupnjaci, uočeno je smanjenje ukupnog sljeganja nasipa. Dok su početna stanja tla prije poboljšanja pokazala visoke vrijednosti deformacija, ugradnja šljunčanih stupnjaka rezultirala je smanjenjem tih deformacija u kritičnim točkama opterećenja. Najveće smanjenje deformacija zabilježeno je u centralnim dijelovima nasipa, gdje je opterećenje najizraženije, čime se izravno povećava sigurnost i stabilnost cestovne konstrukcije. Ovi rezultati ukazuju na učinkovitost šljunčanih stupnjaka u poboljšanju tla u složenim geotehničkim uvjetima, gdje konvencionalne metode temeljenja ili zamjene tla nisu prikladne.

Brža konsolidacija tla omogućava ranije završavanje građevinskih radova i smanjenje potrebnih sanacija u budućnosti, što ima izravne pozitivne ekonomske i operativne učinke. Uspoređujući rezultate prije i poslije poboljšanja, jasno je da je primjena šljunčanih stupnjaci izuzetno korisna, osobito u projektima cestovne infrastrukture smještenima na slabonosivim terenima.

Jedan od važnih aspekata primjene šljunčanih stupnjaka jest njihova fleksibilnost u različitim geotehničkim uvjetima. Ova metoda može se prilagoditi specifičnostima terena, omogućujući učinkovitu primjenu na različitim lokacijama s lošim svojstvima tla. Pored tehničkih prednosti, šljunčani stupnjaci također nude ekonomske benefite, posebno u uvjetima gdje su druge metode poboljšanja tla preskupe ili tehnički neizvedive.

Usporedbom s drugim metodama poboljšanja tla, poput zamjene tla ili dubokog temeljenja, šljunčani stupnjaci pokazali su se kao ekonomičnija i ekološki prihvatljivija opcija. Primjena recikliranih materijala za izradu stupnjaka može dodatno smanjiti ekološki otisak projekta, što je od posebnog značaja u suvremenim praksama održive izgradnje.

Kroz istraživanje i analize provedene u ovom radu pokazalo se je da šljunčani stupnjaci predstavljaju optimalno rješenje za stabilizaciju nasipa u složenim geotehničkim uvjetima. Njihova primjena na trasi ceste DC44 osigurava stabilnost nasipa, smanjenje deformacija i dugoročnu sigurnost kolničke konstrukcije, čime se minimiziraju troškovi održavanja i sanacija. Nasip, osim što nosi kolničku konstrukciju, ujedno služi i kao obrambeni sustav protiv poplava, štiteći okolna područja od mogućeg izlivanja rijeke Mirne.

5. Prilozi

5.1. Sondažni profili

5.1.1. Sondažni profil S-1



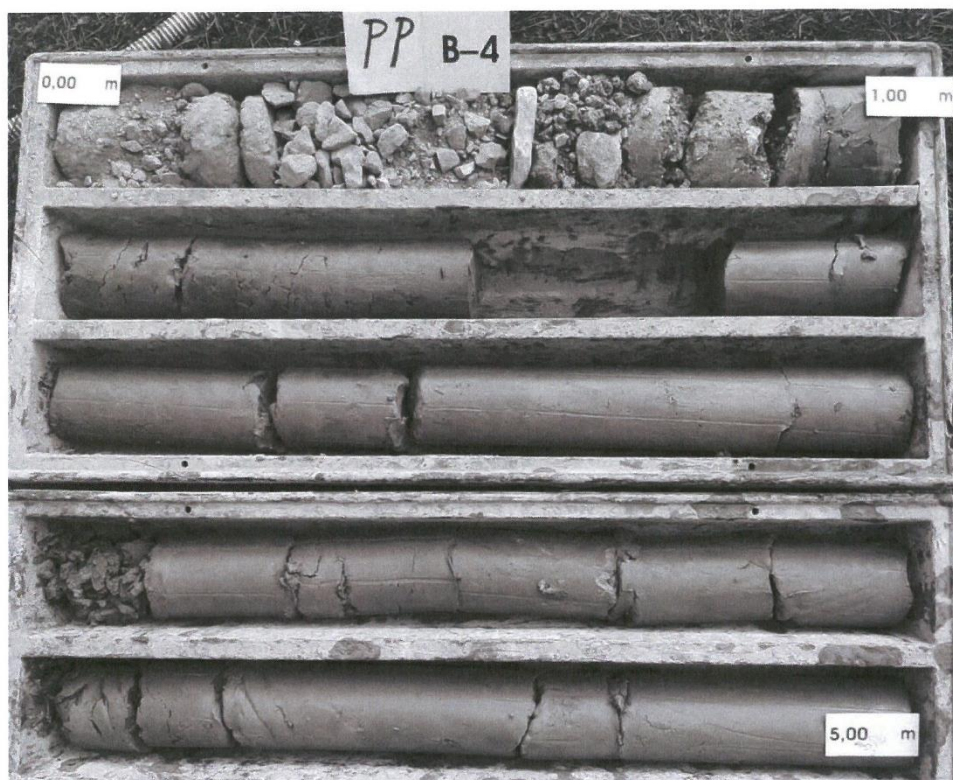
5.1.2. Sondažni profil S-2



5.1.3. Sondažni profil S-3



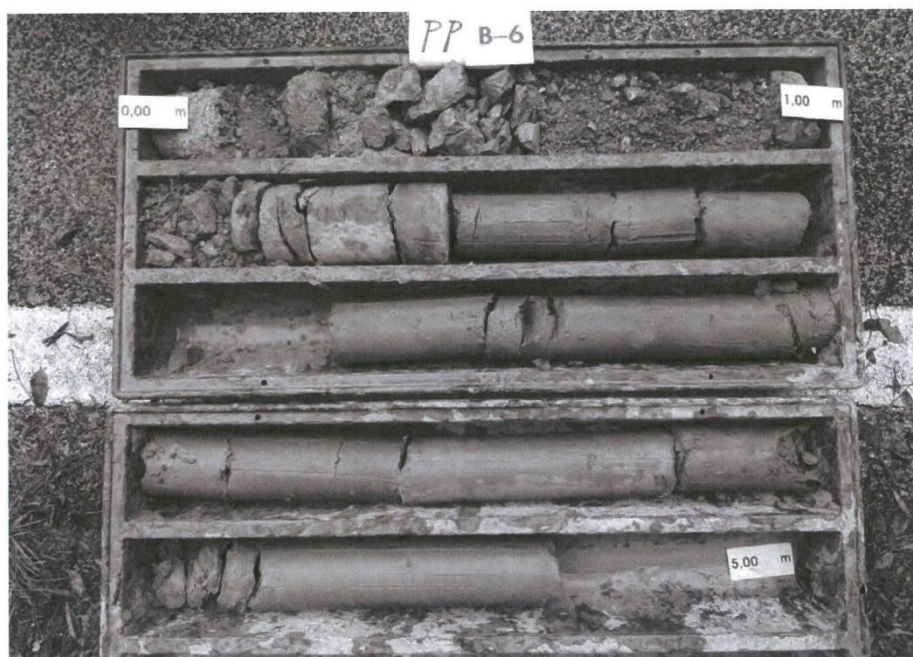
5.1.4. Sondažni profil S-4



5.1.5. Sondažni profil S-5




5.1.6. Sondažni profil S-6



INVESTITOR: HRVATSKE CESTE 10 000 Zagreb, Vončinina 3	BR. PROJEKTA: OG-19-07-IZ-01	GEOTEHNIČKI PRESJEK BUŠOTINE			PPB-6
GRADEVINA: SANACIJA DRŽAVNE CESTE OZNAKE DC 44 DIONICA 002, LOKACIJA BUZET-PONTE PORTON	POČETAK BUŠENJA: 10.10.2019.	KOORDINATE UŠČA BUŠOTINE: E: 294674.6 N: 5028725	STACIONAŽA: 9+569	STANDARDNI PENETRACIJSKI TEST (SPT): - Nož $N_{10} = N_{15} + N_{45}$ - Šiljak $S = 0,75 \cdot N_{10}$ <small>* / - Odskakanje pripora (>50 udaraca)</small>	
	KRAJ BUŠENJA: 10.10.2019.	KOTA UŠČA BUŠOTINE: Z: 17,4 m n.m.	MJERILO: M 1:50		

DUBINA (m)	APSOLOTNA VISINA (m n.m.)	PROMJER JEZGRENE CIJEVI (mm)	PROSTORNA ZAŠTITNE KOLONE (mm)	PPV (m)	RPV (m)	GRUPA MATERIJALA	SIMBOL	INTERVAL (m)	OPIS TLA /STIJENE	STANDARDNI PENETRACIJSKI TEST (br. udaraca)				VRSTA UZORKA	OZNAKA UZORKA	INTERVAL (m)		GRANICE PLASTIČNOSTI		INDEKS PLASTIČNOSTI	INDEKS KONZISTENCIJE	PRIRODNA VLAGA	ZAPREMINSKA GUSTOĆA			JEDINGOSNA CVRSTOĆA	GRANULOMETRIJSKI SASTAV																	
										15	30	45	N_{30}			OD	DO	w_L (%)	w_p (%)				I_p (%)	I_c	W_s (%)		ρ_s (g/cm ³)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	q_u (kPa)	G (%)	S (%)	M (%)	C (%)										
0.0							N	0.3	Asfalt s malo šljunka																																			
	16.4							1	Nasip - zaglinjeni šljunak crvenkasto smeđe boje (GC) od 0,6 do 1,1 s puno gline				PU	24-16/19	0.8	1						5.2															66.9	11.8	14	7.2				
	15.4							2.5	Glina (CH) s malo praha, sivozelene boje s malo smeđih šara; srednje do visokoplastična, lako do teško gnječiva	3	4	5	9																											113.6				
	14.4								Glina (CH) s puno praha, sivoplave do sivozelene boje; srednje do visokoplastična, lako do teško gnječiva, u proslojcima malo organskih primjesa																																			
	13.4																																											
	12.4							5					PU	24-18/19	4.7	5	49.6	21.2	28.4	0.88	24.7																							

NAPOMENA:	IZVOBAČ: Geokol d.o.o.	NADZOR: OpusGEO d.o.o.	OBRADA: OpusGEO d.o.o.	
	BUŠAČA GARNITURA:	TERENSKA KLAS.:	Geokol d.o.o.	
				STRANICA: 1 BR. PRILOGA: 6

5.2. Sitacije s prikazom izvedenih istražnih radova od km 0+000 do km 5+200 te od km 5+200 do km 10+100



LITERATURA

[1] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA- NHI-16-028, Ground Modification Methods, Reference Manual – Volume I, 2017.

[2] Roje-Bonacci, T., Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, 2010.

[3] Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu, 12. Poglavlje: Geotehnički radovi, Hrvatske vode, Zagreb, 2022.

[4] Gotić, R., Gotić, I., Temeljenje građevina na poboljšanom tlu, Građevinar 53,(75-81),2001.,2

[5] Izvedbeni građevinski projekt - Mapa 4: Geotehnički istražni radovi i geotehnički projekt, OG-19-07-IZ-01, OpusGEO d.o.o., 2019.

[6] Geotehnički elaborat, Državna cesta DC44 dionica 002, Nestabilnost nasipa (kolnika) od km 3+100 do 6+750,72210-7/17, Institut IGH d.d. , Zavod za geotehniku, 2017.

[7] ASTM D1143, Standard Test Methods for Deep Foundation Elements Under Static Axial Compressive Load,American Society for Testing and Materials, 2024

[8] Priebe HJ. The design of vibro replacement. GeTec Ingenieurgesellschaft für Informations- und Planungstechnologie mbH; 1995.