

Prikaz rješenja osiguranja denivelacije tla korištenjem tehnologije armiranog tla na aerodromu Čilipi

Marković, Mihael

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:096288>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MIHAEL MARKOVIĆ

PRIKAZ RJEŠENJA OSIGURANJA DENIVELACIJE TLA
KORIŠTENJEM TEHNOLOGIJE ARMIRANOG TLA NA
AERODROMU ČILIP

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

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

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Saša Karić

Članovi povjerenstva

- 1) *Izv. prof. dr. sc. Krešo Ljauđić*
- 2) *Izv. prof. dr. sc. Boris Karur*
- 3) *Prof. dr. sc. Stjepan Strelac*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PRIKAZ RJEŠENJA OSIGURANJA DENIVELACIJE TLA
KORIŠTENJEM TEHNOLOGIJE ARMIRANOG TLA NA
AERODROMU ČILIPU

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

MIHAEL MARKOVIĆ



MENTOR:

izv. prof. dr. sc. Krešo Ivandić

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: MIHAEL MARKOVIĆ
Matični broj: 245 - 2018./2019.
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PRIKAZ RJEŠENJA OSIGURANJA DENIVELACIJE TLA KORIŠTENJEM
TEHNOLOGIJE ARMIRANOG TLA NA AERODROMU ČILIPÍ

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Opis problema
3. Armirano tlo
4. Primjer potpornog zida na aerodromu Čilipi
5. Zaključak

Popis slika
Popis tablica
Literatura

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

Zadatak zadan: 19.03.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:


Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić



Predsjednik Odbora za nastavu:


Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovac



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

Prikaz rješenja osiguranja denivelacije tla korištenjem tehnologije armiranog tla na aerodromu Čilipi

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

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

U Varaždinu, 30.08.2021.

MIHAEL MARKOVIĆ

(Ime i prezime)


(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

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

PRIKAZ RJEŠENJA OSIGURANJA DEKVELACIJE TLA KORIŠĆENEM TEHNOLOGIJE
ARMIRANOG TLA NA AERODROMU ČIPI

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

U Varaždinu, 30.08.2021.

Izv.prof.dr.sc. Krešo Inaudić
(Mentor)

Kh.
(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK:

Ime i prezime: Mihael Marković

Naslov rada: Prikaz rješenja osiguranja denivelacije tla korištenjem tehnologije armiranog tla na aerodromu Čilipi

U ovom diplomskom radu prikazano je rješenje osiguranja denivelacije tla pomoću potpornog zida od armiranog tla na aerodromu Čilipi. Pravilnik o aerodromima nalaže da minimalna širina osnovne staze za vožnju iznosi 47.5 m mjereno od središnje osi. Prijašnje stanje nije zadovoljavalo taj uvjet, jer je već nakon 25 m od središnje osi počinjala depresija duboka do 10-ak metara.

Problem je riješen izgradnjom zida izvedenog kao Terramesh sustav maksimalne visine 18 m i dužine 524 m. Uz ostale primijenjene metode poboljšanja tla prilikom izgradnje zida, metoda armiranog tla čini glavninu projekta.

Metoda armiranog tla koristi armaturu, u današnje vrijeme najčešće izrađenu od plastičnih masa, koja služi za preuzimanje vlačnih naprezanja u tijelu nasipa te obloge ili lica zida.

Opisana metoda još uvijek je u razvoju i pruža mogućnosti za mnoga daljnja istraživanja i rješenja.

Ključne riječi: armirano tlo, denivelacija tla, potporni zid, *Terramesh* sustav

ABSTRACT:

Title: An example of the denivelation solution with reinforced soil walls at Čilipi airport

This thesis presents the denivelation solution with reinforced soil walls at Čilipi airport. The minimal width of the taxiway strip required by airport policies is 47.5 m, as measured from the central axe. The previous state of the soil did not meet this requirement, as there was a 10-meter-deep depression located 25 m from the central axe.

The solution included building a wall, constructed as a Terramesh system wall, with a maximum height of 18 m and the length of 524 m. Among other methods of soil reinforcement that were applied in the construction of the wall, MSE is the main method used in this project. MSE uses soil reinforcement, most frequently made of plastic mass, which takes on the tensile stress in the embankment's body. It also uses facing for aesthetic purposes.

The described method is still being developed and new possibilities for research continue to emerge.

Keywords: reinforced soil, retaining wall, soil denivelation, Terramesh system

SADRŽAJ:

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Uvod..... | 1 |
| 2. | OPIS PROBLEMA..... | 3 |
| 3. | ARMIRANO TLO..... | 5 |
| 3.1. | Usporedba hrvatske i engleske terminologije | 9 |
| 3.2. | Potporne konstrukcije od armiranog tla..... | 10 |
| 3.2.1. | Armatura | 13 |
| 3.2.2. | Lica građevina | 16 |
| 3.2.3. | Primjeri građevina od armiranog tla | 19 |
| 4. | PRIMJER POTPORNOG ZIDA NA AERODROMU ČILUPI | 24 |
| 4.1. | Opis projektirane građevine i okolnog tla..... | 24 |
| 4.2. | Terramesh sustav | 27 |
| 4.3. | Dimenzioniranje i prikaz rješenja..... | 30 |
| 4.3.1. | Općenito | 30 |
| 4.3.2. | Rješenja..... | 33 |
| 5. | ZAKLJUČAK | 39 |
| | POPIS LITERATURE..... | 40 |
| | POPIS SLIKA | 42 |

1. Uvod

Danas postoje razne metode poboljšanja tla, a pod pojmom "poboljšanje" se podrazumijeva unapređivanje inženjerskih svojstava tla ili stijene kada ona ne zadovoljavaju zahtjeve planiranih aktivnosti.

Postoje nekoliko načina poboljšanja tla a ona se dijele u sljedeće skupine:

- Mehaničko poboljšanje
- Hidrauličko poboljšanje
- Fizičko i kemijsko poboljšanje
- Poboljšanje tla umetcima i obuhvatom.

U ovom radu će se govoriti isključivo o načinu poboljšanja tla s umetcima i obuhvatom, bazirajući se na metodu armiranog tla u vidu potpornih konstrukcija.

Poboljšanje tla armaturom je uključuje:

- Upornjake i potporne zidove
- Gradnju nasipa sa strmim pokosima ($45^\circ < \text{nagib} < 75^\circ$)
- Prevenciju ili sanaciju klizanja tla ($\text{nagib} < 45^\circ$)
- Gradnju nasipa na slabom tlu.

Metoda armiranja tla primjenjuje se u raznim oblicima više od 45 godina. Zidovi i kosine od armiranog tla često u praksi dobivaju prednost pred konvencionalnim armirano-betonskim zidovima zbog ekonomskih, estetskih i konstrukcijskih razloga. Ekonomski su povoljniji zbog manje količine potrebnog materijala za gradnju, estetski jer postoji niz mogućnosti ukrašavanja prednje strane građevine (lica), a konstrukcija same građevine nije komplicirana i ne zahtjeva specijaliziranu radnu snagu. Konstrukcije od armiranog tla se u svijetu najčešće izvode pri izgradnji upornjaka mostova i kao visokih potpornih zidova koji drže nasipe.

Pod pojmom potporne građevine od armiranog tla podrazumijeva se takva vrsta gradnje koja armaturom, ugrađenom u nasip, prenosi naprezanja po dodirnoj površini između tla i armature. Nasip i armatura tvore tijelo koje djeluje kao gravitacijski potporni zid s određenim posebnostima.

Prva armatura bila je metalna kod koje je najveći problem bila pojava korozije. Nakon uočavanja nedostataka metalnih armatura, na tržište dolaze sintetički materijali, prvo geotekstili, a zatim geomreže. Danas se u rijetkim slučajevima koristi metalna armatura zbog sve većeg izbora relativno jeftinih, čvrstih i trajnih proizvoda od plastičnih masa. Sve tipove armature se mogu svesti na dvije vrste, ovisno o načinu preuzimanja vlačnih naprezanja s lica građevine. Geomreže i geotekstili naprezanja prihvaćaju linijski, a prenose ga površinski (plošno), trenjem, u dublje slojeve konstrukcije, dok trake prihvaćaju točkasto naprezanje i linijski ga prenose trenjem u tijelo nasipa. Krutost armature igra veliku ulogu u dimenzioniranju konstrukcije od armiranog tla.

2. OPIS PROBLEMA

Predmet ovog diplomskog rada je potporni zid na južnoj strani objekta, koji se nalazi unutar zračne luke Dubrovnik. Zahvat pod nazivom „POTPORNI ZID JUG“ je etapa 5 projekta "REKONSTRUKCIJA GRAĐEVINA UNUTAR OBUHVATA ZRAČNE LUKE DUBROVNIK - ZRAČNA LUKA DUBROVNIK RAZVOJ".

Pravilnik o aerodromima (Ministarstvo pomorstva, 2014) nalaže da minimalna širina osnovne staze za vožnju za aerodrom iznosi 47.5 m mjereno od središnje osi staze za vožnju sa svake strane posebno, unutar kojeg područja se ne smiju nalaziti nikakvi objekti kako bi se osigurao siguran promet zrakoplova, gdje je u navedenoj širini propisana potrebna ravnost navedenim *Pravilnikom* uz poštivanje maksimalnih uzdužnih i poprečnih nagiba. Postojeće stanje, prikazano na slikama 1 i 2, ne zadovoljava kriterije iz *Pravilnika* jer južni pojas osnovne staze nema potrebnu širinu, jer već na udaljenosti 25 m od osi počinje kameni pokos i depresija duboka do 10-ak metara. Stoga je potrebno urediti teren oko osnovne staze SV (staze za vožnju) kako bi se zadovoljili parametri koji su definirani *Pravilnikom o aerodromima*.



Slika 1. Pregled depresije iz zraka



Slika 2. Prikaz depresije, starog potpornog zida i vatrogasnog puta

Rješenje zadatke osiguranja denivelacije određeno je izgradnjom armiranog potpornog zida maksimalne visine 18 m i dužine 524 m sustavom Terramesh, koji će biti opisan u radu.

Obzirom na pojavu veće debljine zemlje crvenice u središnjem dijelu terena, nužno je ukloniti zemljani sloj i izvršiti zamjenu materijala ili opterećenja od zida prenijeti u dublje slojeve kako bi se izbjegla neželjena slijeganja potporne konstrukcije.

Rješenja će biti prikazana za najviši profil zida ($h=18$ m). Proračun je proveden za stalnu i seizmičku proračunsku situaciju softverskim programima *MacStars*.

Aktivni pritisak i pasivni otpor tla su računati po Coulombovoj teoriji.

3. ARMIRANO TLO

Armirano tlo jedna je od metoda ojačanja tla. Ojačano tlo je konstrukcija u kojem dijelovi armature preuzimaju vlačna naprezanja. Ovo svojstvo dodatnog, vlačno napregnutog gradiva u tlu, koristi se od davnina u raznim građevinskim zahvatima.

Temeljna ideja o armiranju tla nije novost, ustvari ona seže nekoliko stoljeća u prošlost. Današnji koncept sistematske analize i dizajna je razvio francuski inženjer H. Vidal 1966. godine. FRRL (*French Road Research Laboratory*) je proveo opsežna istraživanja o primjeni i povoljnim učincima upotrebe armature u tlu kao konstrukcijskog materijala. Ova istraživanja su detaljno dokumentirali Darbin 1970., Schlosser i Vidal 1966., kao i Schlosser i Long 1974. godine. Pokusi su uključivali upotrebu metalnih traka kao armature. Armirani potporni zidovi primjenjuju se diljem svijeta od kada je Vidal objavio svoj rad. Prvi takav potporni zid sa metalnim trakama kao armaturom u SAD-u izgrađen je 1972. godine u južnoj Kaliforniji (Das, 2013).

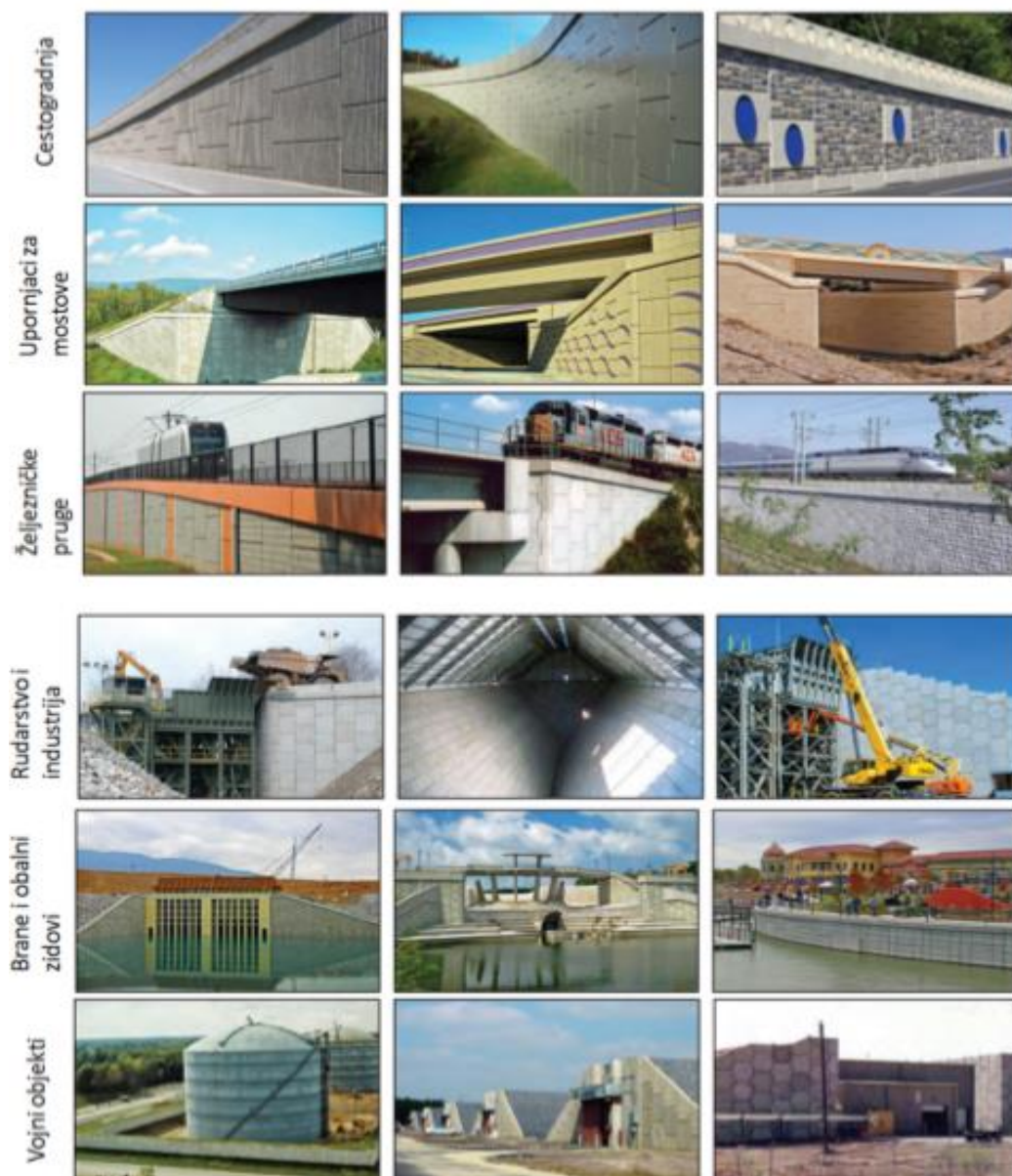
Inkluzije se koriste od prapovijesti za poboljšanje tla. Upotreba slame za poboljšanje kvalitete cigle od opeke seže u najraniju ljudsku povijest. Mnogi su primitivni ljudi palicama i granama pojačavali nastambe u blatu. Tijekom 17. i 18. stoljeća francuski doseljenici uz zaljev Fundy u Kanadi palicama su pojačavali nasipe od blata. Neki drugi rani primjeri umjetnog ojačanja tla uključuju nasipe zemlje i grana drveća, koji se koriste u Kini najmanje 1.000 godina i duž rijeke Mississippi u 1880-ima. Ostali primjeri uključuju drvene klinove koji se koriste za kontrolu klizišta u Engleskoj te bambus ili žičane mreže. Jačanje tla također se može postići korištenjem biljnih korijena što će kasnije ukratko biti opisano u ovome radu (Das, 2013).

U slučaju armiranja tla, pojam "armiranje" odnosi se na korištenje vlačne čvrstoće čelika ili geosintetika da bi se povećala posmična čvrstoća prometnica, nasipa, temelja, potpornih konstrukcija i kosina.

Armirano tlo je kombinacija zbijene zemljane ispune i elementa ojačanja koji čine konstrukciju čije ponašanje i osobine zavise od interakcije između tla i ojačanja (armature).

Konstrukcije od armiranog tla su fleksibilne te osiguravaju funkcionalnost i u slučajevima slabog temeljnog tla gdje dolazi do diferencijalnih slijeganja. Zbog niza prednosti konstrukcija od armiranog tla, one se primjenjuju u građevinarstvu, geotehnici i rudarstvu. (Jones, 1985) navodi da se armirano tlo koristi (slika 3):

- kao zamjena za vijadukt gdje je slabo temeljno tlo
- kod izgradnje upornjaka za mostove
- za ojačanje temeljnog tla
- za ojačanje nasipa kod izgradnje ceste ili željezničke pruge
- kod izgradnje upornjaka za mostove
- za ojačanje krovinskih naslaga u rudarstvu
- kod izgradnje brana
- kod izgradnje nasipa
- u rudarstvu za izgradnju utovarnih/istovarnih rampi kod postrojenja za oplemenjivanje
- u rudarstvu za izgradnju silosa za skladištenje mineralnih sirovina, npr. ugljena o za izgradnju taložnih bazena
- u vojsci za izgradnju bunkera, prolaza i skloništa za izgradnju obalnih zidova i plovnih putova



Slika 3. Primjeri primjene armiranog tla (Gradiški, 2017)

Tablica 1 sadrži podjelu glavnih kategorija armiranih konstrukcija s odgovarajućim vrstama obloga i armature, kao i najčešćom primjenom u praksi. Radi lakšeg razumijevanja, neki izrazi su napisani na engleskom jeziku.

| | | |
|---|-------------------------------|---|
| Mehanički stabilizirano tlo (Mechanically stabilized earth-MSE) Armirane potporne konstrukcije (verikalne, stepenaste ili nagnute) | <i>Tip armature</i> | Steel strips (smooth and ribbed) Steel ladder strips Steel welded wire grids Steel bars/ rods Woven wire mesh Geostrips (polymeric) Geotextiles sheets (polymeric) Geogrids and woven meshes (polymeric) |
| | <i>Lica građevina</i> | Segmental precast concrete panels Full height precast concrete panels Concrete sloping panels Concrete planter units Segmental concrete blocks King post system Metallic steel sheet Semi elliptical steel face Steel welded wire grids Geosynthetics (geogrids or geotextiles) Wrapped around (with formwork) Woven wire mesh wrapped around (with formwork) Gabion baskets Post construction facing-2 stage system |
| | <i>Primjena</i> | Retaining walls - permanent and temporary Pile supported abutments True abutments Mine slot walls for bulk storage Dams Containment structures Specific structures (industrial supports...) |
| MSE Ojačani strmi pokosi 45° < nagib < 75 ° | <i>Tipovi armature</i> | Steel strips (smooth and ribbed) Steel ladder strips Steel welded wire grids / bar mats Steel bars/ rods Woven wire mesh Geostrips (polymeric) Geotextiles sheets (polymeric) Geogrids and woven meshes (polymeric) |
| | <i>Lica građevina</i> | Steel welded wire grids Geosynthetics (geogrids or geotextiles) wrapped around (with formwork) Woven wire mesh wrapped around (with formwork) Gabion baskets |
| | <i>Primjena</i> | Steepened slopes Containment structures |
| Ojačani blagi pokosi Nagib < 45° | <i>Tipovi armature</i> | Steel strips (smooth and ribbed) Steel ladder strips Steel welded wire grids / bar mats Steel bars/ rods Woven wire mesh |

| | | |
|----------------------------------|-------------------------------|--|
| | | Geostrips (polymeric) Geotextiles sheets (polymeric) Geogrids and woven meshes (polymeric) Micro reinforcing elements (fibres, yarns, glass, micro grids) |
| | <i>Lica građevina</i> | Vegetated alone Armoured (gabions, shotcrete, stone, emulsified asphalt) Geosynthetics (geogrids or geotextiles) wrapped around (without formwork) Woven wire mesh wrapped around (without formwork) |
| | <i>Primjena</i> | Earth embankments with limited right of way Slope repair |
| Stabilizacija baze nasipa | <i>Tipovi armature</i> | Steel strips (smooth and ribbed) Steel ladder strips Steel welded wire grids / bar mats Steel bars/ rods Woven wire mesh Geostrips (polymeric) Geotextiles sheets (polymeric) Geogrids and woven meshes (polymeric) |
| | <i>Primjena</i> | Basal reinforcement Replacement alternative to other ground improvement |

Tablica 1. Podjela glavnih kategorija armiranih konstrukcija (Héry, 2017)

3.1. Usporedba hrvatske i engleske terminologije

U engleskom jeziku terminologija je konciznija što olakšava snalaženje u literaturi i lakše određivanje temeljnih pojmova vezanih za obrađivanu temu. Kratice poput *MSE*, *MSEW* i *RSS* koristit će se u daljnjem tekstu pa se u ovom poglavlju navode njihova obrazloženja.

Inclusions (hrv. inkluzije) je generički pojam koji obuhvaća sve umjetne elemente ugrađene u tlo radi poboljšanja njegovog ponašanja. Primjeri inkluzija/armatura su čelične trake, listovi od geosintetika, čelik ili polimer rešetke i čelični čavli.

MSE - Mechanically Stabilized Earth (hrv. mehanički stabilizirano tlo) je konstrukcija napravljena od tla ojačanog armaturom. MSE kratica u rijetkim slučajevima može označavati pojam stabilizacije baze nasipa (eng. *Mechanically Stabilized Embankment*).

MSEW - Mechanically Stabilized Earth Wall (hrv. mehaničko stabilizirani zid) je generički pojam koji uključuje ojačano tlo (pojam koji se koristi kada više slojeva armature djeluju kao ojačanje u tlima postavljenim kao ispuna).

RSS – Reinforced Soil Slopes (hrv. ojačane padine) način su ojačanog tla koji uključuje ravne armaturne elemente u konstrukcijama pod nagibom lica manjim od 70°.

Facing (hrv. obloga) ili lice građevine je komponenta sustava armiranog tla koja sprječava da se tlo razmiče između redova armature. Uobičajene obloge uključuju montažne betonske ploče, suho lijevane modularne blokove, metalne limove i ploče, gabione, zavarenu žičanu mrežu, drvene obloge i druge. Obloga igra manju strukturnu ulogu u stabilnosti konstrukcije.

Retained backfill (hrv. zasip) je materijal koji se nalazi između armirane mase tla i prirodnog tla.

Reinforced backfill (hrv. ojačan zasip) je materijal za ispunu u koji se postavlja ojačanje.

3.2. Potporne konstrukcije od armiranog tla

Potporne konstrukcije mogu biti samostalne ili sastavni dio građevine. To su geotehničke građevine jer temeljno preuzimaju opterećenje od tla, mogu se izvoditi od svih do sada poznatih gradiva koja se upotrebljavaju u građevinarstvu i najrazličitijim raspoloživim tehnologijama.

Dvije su osnovne vrste potpornih građevina:

-one koje pridržavaju zasjeke u prirodnom tlu

-one koje pridržavaju nasipe.

Ovisno o tome pridržavaju li prirodno tlo ili nasip, ovise vrste istražnih radova koje je potrebno izvesti da bi se dobili podaci potrebni za projektiranje. Autohtono tlo se iza i

ispod budućeg zida mora detaljno ispitati. Za svaku potpornu građevinu potrebno je izraditi projekt.

Pridržava li potporna građevina zasjek u autohtonom tlu, opterećena je tlom onakvim kakvo je u prirodi. Tada je potrebno dobro upoznati sastav i svojstva tog prirodnog tla. Nema mnogo načina da se svojstva takvog tla poboljšaju. Potporna građevina trebala bi biti dimenzionirana na opterećenja koja će takvo tlo proizvesti (Koerner, 2005).

Potporni zid od armiranog tla, prikazan na slici 4, je građevina uklopljena u nasip i s njim čini jednu cjelinu. Kao cjelina djeluje kao gravitacijski savitljivi potporni zid. Nasip u području armiranja izvodi se od nekoherentnih materijala da se izbjegne utjecaj hidrostatskog tlaka. Vlačne sile preuzima armaturom koja se u tlo ugrađuje prilikom izvedbe. Lice građevine zaštićeno je posebnim komadima ili gradivom koje ujedno može biti armatura, to će kasnije biti detaljnije opisano u radu. Nema posebno oblikovanog temelja, ali podliježe provjeri dodatnih pritisaka.



Slika 4. Potporni zid od armiranog tla (Terre-armee, 2021)

Prvi zid koji je ovu tehnologiju koristio u Sjedinjenim Državama sagrađen je 1972. godine na autocesti California California 39, sjeveroistočno od Los Angelesa, a vjeruje se da je prva zabilježena upotreba ojačanih strmih padina zapadni nasip Kineskog zida (Federal Highway Administration, 2001). Uvođenje geosintetičke armature učinila je upotrebu strmih padina ekonomski atraktivnom.

Niz godina potporne konstrukcije bile su gotovo isključivo izrađene od armiranog betona i dizajnirane su kao gravitacijski ili konzolni zidovi koji su u osnovi krute konstrukcije i ne mogu podnijeti značajnija diferencijalna slijeganja ako nisu duboko temeljeni. S povećanjem visine tla koje treba zadržati i lošim uvjetima u podzemlju, troškovi armirano-betonskih potpornih zidova brzo se povećavaju.

Mehanički stabilizirani zemljani zidovi (MSEW) i ojačane padine tla (RSS) isplative su strukture za zadržavanje tla koje mogu podnijeti mnogo veća slijeganja od armirano-betonskih zidova (Federal Highway Administration, 2001). Postavljanjem vlačnih armaturnih elemenata (inkluzije) u tlo, čvrstoća tla može se značajno poboljšati tako da lice sustava u biti bude samostojeće. Korištenje lica tj. obloga kako bi se spriječilo raznošenje tla između armaturnih elemenata omogućuje sigurnu izgradnju strmih padina i okomitih armiranih zidova. U nekim slučajevima, armatura također može izdržati savijanje uzrokovano posmičnim naprezanjima te time pruža dodatnu stabilnost sustavu.

MSE zidovi imaju brojne prednosti u usporedbi s konvencionalnim armiranim betonom i betonskim gravitacijskim potpornim zidovima:

- jednostavno i brzo se grade bez velike građevinske mehanizacije
- za izgradnju ne zahtjeva ljude s velikim iskustvom i specijalnim vještinama te općenito ne zahtjeva veliki broj ljudi
- u usporedbi s ostalim tehnikama, ne zahtjeva puno prostora za pripremu gradnje i samu gradnju, uz to ne proizvode puno buke pri gradnji
- MSE zidovi su tolerantni na deformacije pa se reducira trošak temelja - ekonomični i izvodivi do visine i preko 35 m

Potrebne su relativno male količine materijala, brza gradnja i troškovno konkurentniji u odnosu na tradicionalne vrste potpornih zidova. MSE zidovi su ekonomičniji od ostalih zidnih sustava za zidove veće od 3 m ili gdje bi za uobičajeni zid bili potrebni posebni temelji.

Jedna od najvećih prednosti MSE zidova je njihova fleksibilnost i sposobnost apsorpiranja deformacija uslijed loših uvjeta podzemlja. Također, na temelju promatranja seizmički aktivnih zona, ove su konstrukcije pokazale veću otpornost na seizmičko opterećenje nego što imaju krute betonske konstrukcije (Federal Highway Administration, 2001).

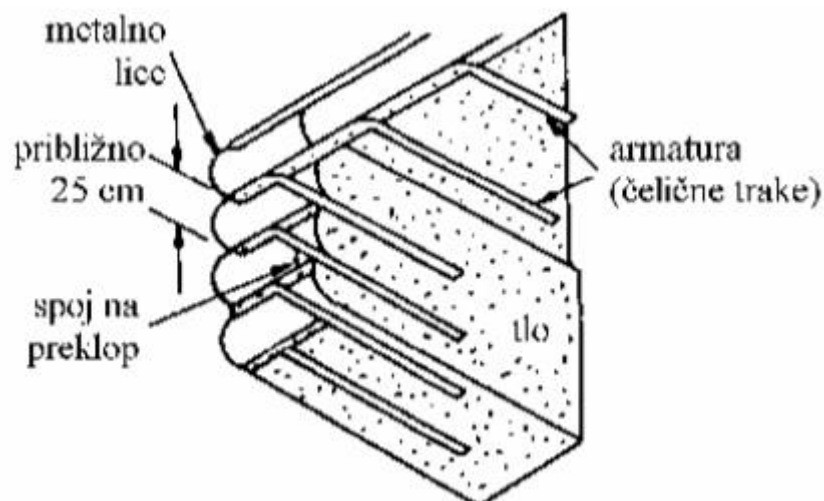
Uz brojne prednosti, armirane konstrukcije imaju i svoje mane:

- Prilikom projektiranja građevine, potrebno voditi računa o mogućoj koroziji čeličnih armaturnih dijelova, o mogućem propadanju određenih vrsta izloženih obloga (geotekstil) te o mogućnosti degradacije polimerne armature u tlu
- Zahtjeva relativno velik prostor iza zida
- MSE zidovi zahtijevaju odabir ispune što može biti neekonomično ukoliko na terenu ne postoji potreban materijal (zahtjevi za RSS obično su manje restriktivni)
- Konstruiranje sustava armiranog tla zahtjeva zajedničku odgovornost dobavljača materijala i samog vlasnika
- Veća potreba za geotehničkim agencijama u odnosu na ostale potporne konstrukcije (veći trošak)
- Praksa projektiranja armiranih konstrukcija je još uvijek u razvoju pa specifikacije nisu u potpunosti standardizirane

3.2.1. Armatura

Armature za ispunu mogu se izrađivati od metala, obično čelika ili polimernih materijala.

Prva armatura s kojom je Vidal patentirao svoju “Terre Armee” (slika 5) bila je metalna (Roje-Bonacci, 2005). Koristio je glatke, plosnate metalne trake koje su bile povezane s metalnim, fleksibilnim licem.



Slika 5. Terre Armee (Roje-Bonacci, 2005)

Nehrđajući čelik i legure aluminija mogu se koristiti za armiranje tla u trajnim konstrukcijama samo u određenim slučajevima i na temelju određenih studija.

Pojačanja od staklenih vlakana i karbonskih vlakana korištena su eksperimentalno. Mogu se koristiti i prirodna vlakna, uglavnom za privremene građevine.

Najčešće korištene armature su (slika 6):

a) Čelične trake (glatke i rebraste): Čelične trake izvorna su komponenta za ojačanje koja je korištena u razvoju armiranog tla. Trake su obično sastavljene od pocinčanog čelika, koji se teže deformira od zasipa koji obavija armaturu.

Trake su izvorno proizvedene s glatkom površinom, što je rezultiralo manjim trenjem. 1978. razvijene su rebraste ojačane trake s visokim prijanjanjem kako bi se povećala otpornost na smicanje između tla i armature. Na kraju trake probušena je rupa za pričvršćivanje obloge.

b) "Ljestvaste" čelične trake: Ovakve trake izrađene su od hladno vučenog čelika visoke čvrstoće i zavarene su u skladu s lokalnim standardima. Trake su pocinčane na način sličan čeličnim trakama.

Ljestvaste trake su otpornije na izvlačenje od rebrastih traka zbog boljeg međusobnog zatvaranja. Međutim, vlačni kapacitet ove armature manji je od čeličnih traka zbog manje neto površine presjeka.

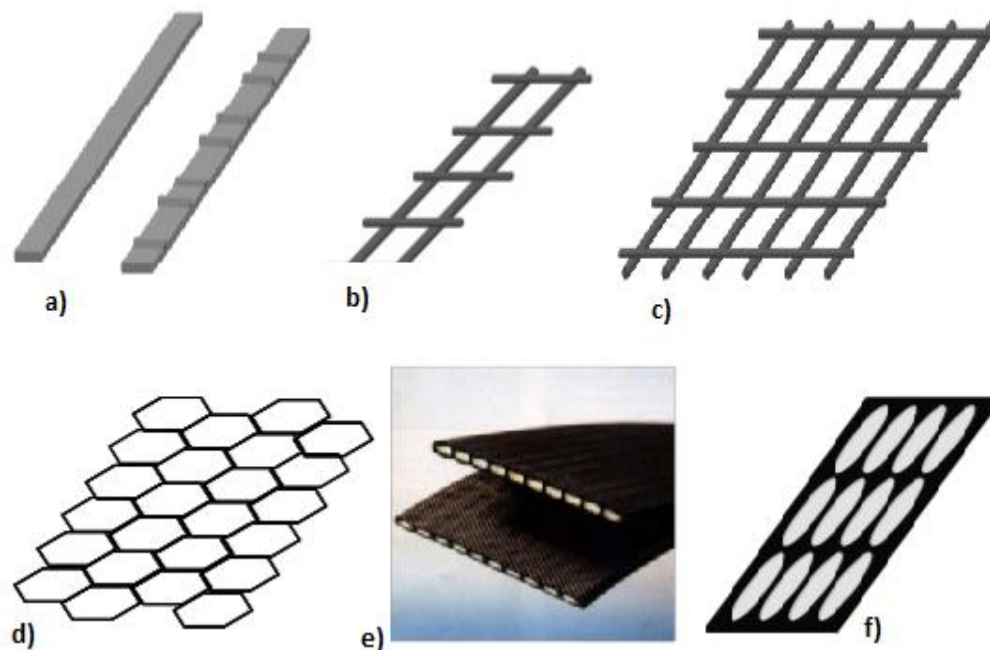
c) Čelične zavarene žičane rešetke: Ovaj sustav ojačanja izrađen je od uzdužnih i poprečnih šipki promjera obično od 8 do 12 mm. Razmak između poprečnih šipki ovisi o uvjetima opterećenja i varira u rasponu od 150 do 900 mm. Oni su pocinčani na način sličan čeličnim trakama.

d) Tkana žičana mreža/prostorna mreža: Ova vrsta armature sastoji se od meke, teško pocinčane i čelične mreže presvučene PVC-om ili PE-om. Tipično je promjer žice u rasponu od 3 do 4 mm. Plastična prevlaka ima minimalnu debljinu od 0,5 mm.

e) Geotrake: Geotrake su geosintetičke trake. Najčešći tipovi koji se koriste u ojačanim ispunima sastoje se od snopova usko upakiranih vlakana visoke čvrstoće, paralelnih jedno s drugim, obavijenih izdržljivom polimernom ovojnicom. Polimerni plašt pruža zaštitu od mehaničke i kemijske agresivnosti ispune.

f) Geomreže i tkane mreže (polimerne): Geomreža je geosintetska tvar formirana pravilnom mrežom integralno povezanih elemenata s otvorima većim od 6,35 mm kako bi se omogućilo međusobno spajanje s okolnim tlom, stijenom, zemljom i ostalim okolnim materijalima u cilju ojačanja.

Geomreže za armiranje tla razvijene su oko 1980. Prva upotreba geomreže u armiranju zemlje bila je 1981. Opsežna upotreba geomreža u Sjedinjenim Državama započela je otprilike 1983. i oni sada čine rastući dio tržišta.



Slika 6. Najčešće korištene armature

3.2.2. Lica građevina

Iako ne igraju nikakvu značajnu ulogu u stabilnosti, armirane potporne konstrukcije zahtijevaju lice (oblogu) kako bi zadržale ispunu između slojeva ojačanja.

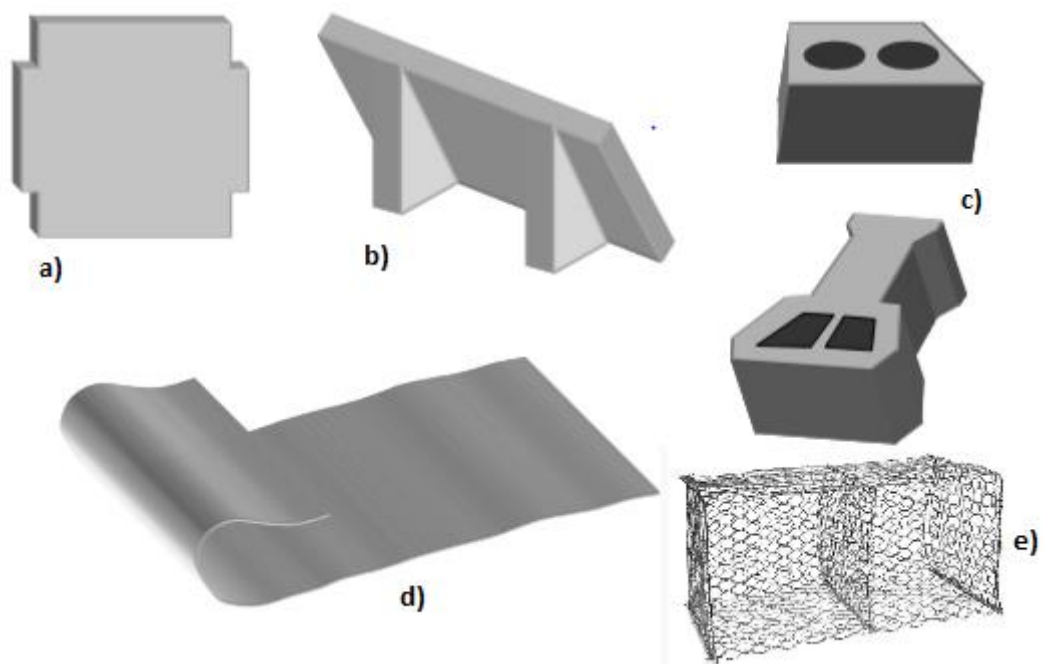
Na plitkim ojačanim pokosima oblaganje uglavnom nije potrebno, ali obično postoji vegetacijska zaštita.

Važna značajka sustava za oblaganje je da mora biti u stanju održavati diferencijalna slijeganja koja zahtijeva dizajn, bez strukturnih oštećenja.

Kao što je navedeno, obloge građevina ne doprinose bitno stabilnosti konstrukcije, ali moraju biti napravljeni od materijala dovoljno otpornog da traje koliko i sama konstrukcija te moraju biti dobro povezani s armaturom. Zapravo, glavna uloga obložnih elemenata/lica je da se spriječi erozija tla, te da se postigne bolji estetski izgled konstrukcije.

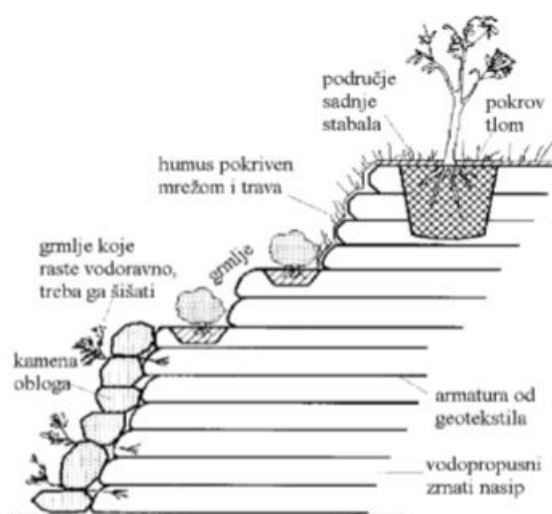
Slika 6 daje uvid u najčešće korištene obloge:

- a) **Segmentne gotove betonske ploče:** Segmentne prefabricirane betonske ploče najčešći su oblik obloga za potporne konstrukcije, a obično imaju visinu od 1 do 2 metra, a debljinu od 100 do 200 mm. Oblici mogu biti različiti i odgovaraju određenim načinima spajanja ploča. Na poleđini, ploče imaju segment za spajanje s armaturom.
Ova vrsta obloge obično se koristi s čeličnim trakama, zavarenim čeličnim mrežama ili s geotrakama, ali također i s čeličnim ljestvičastim trakama, šipkama ili geomrežama.
- b) **Betonske kose ploče:** Najčešće se koriste u industrijskim zidovima za izgradnju utora i rupa za skladištenje ugljena i minerala. Čelične trake za vezanje ugrađuju se u betonske „noge” kako bi se olakšalo spajanje čeličnih traka i armature.
- c) **Segmentni betonski blokovi:** Jedinice za oblaganje u obliku gotovih ili suho lijevanih betonskih blokova bez armature obično se nazivaju modularni blokovi ili segmentni blokovi. Težina blokovskih jedinica obično je u rasponu od 20 do 50 kg, a dimenzije su 200 do 500 mm za duljinu i 150 do 250 mm za visinu.
- d) **Omotani geosintetički (geomreža ili geotekstil):** Najrasprostranjenija meka jedinica za oblaganje je omotana obloga. Služi kao armatura konstrukcije i kao obloga na način da se proteže kroz tlo te omata sam kraj jednog sloja i podvlači se pod idući. U većini slučajeva ova vrsta obloge se zasijava kako bi se dobio vegetativni pokrov. Zbog nepovoljnog utjecaja UV zraka na konstantno izloženi materijal, ovaj sistem oblaganja služi kao privremeno rješenje.
- e) **Gabion košare:** Ova vrsta obloge sastoji se od oblikovane geomreže ili čelične žice, pocinčane ili presvučene plastikom, ispunjene kamenjem. Gabionske košare mogu se isporučiti s produženim nastavkom koji dolazi u direktan kontakt s armaturom.



Slika 7. Najčešće korištene obloge/lica

Lica građevina, armiranih geotekstilom, mogu biti izvedena preklapanjem geotekstila ili se iz estetskih razloga može izvesti i od vreća od geotekstila punjenih tlom te obložiti kamenjem kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Lice građevine armirane geotekstilom (Roje-Bonacci, 2005)

3.2.3. Primjeri građevina od armiranog tla

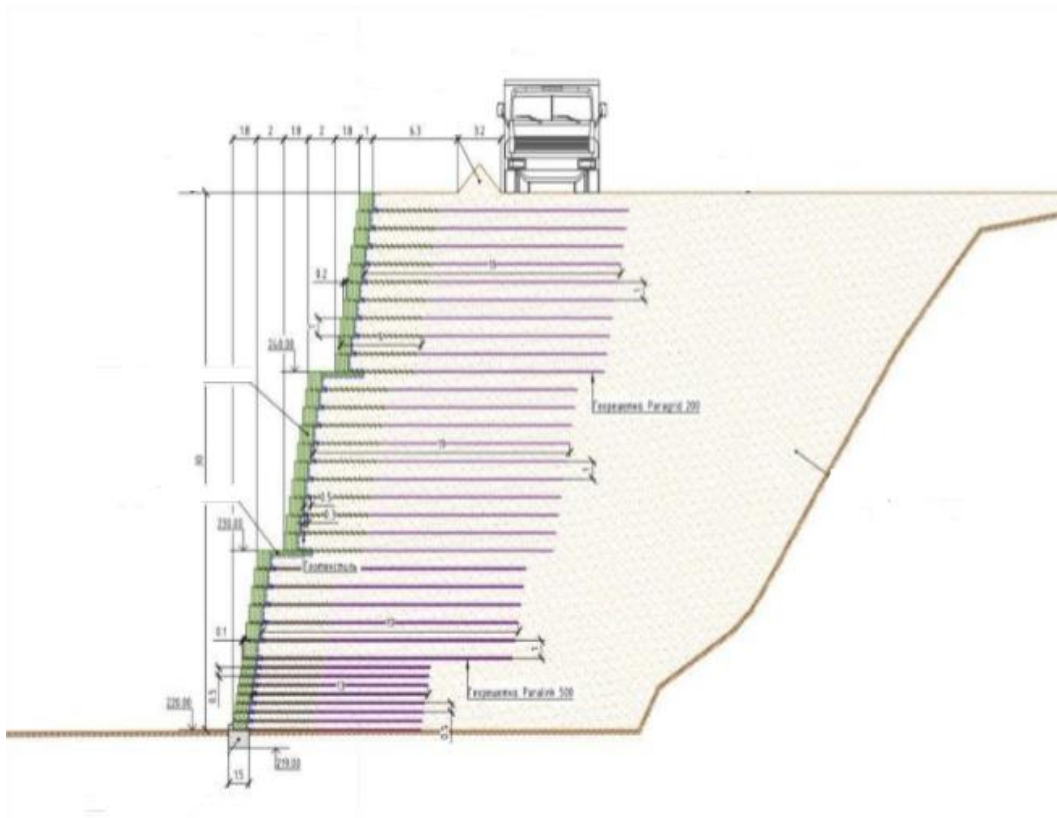
- *Chelyabinsk, Russia* - Potporni zid (30m) u blizini postrojenja za drobljenje

Nalazište bakra i porfiritita smješteno u Čeljabinskoj oblasti jedno je od najvećih nalazišta bakra u Rusiji.

Za aktivnosti prerade rude, kamenolomu je bio potreban potporni zid visok 30 metara koji bi podupirao operacije drobljenja i transporta. Tradicionalno rješenje od armiranog betona smatrano je nedopuštenim s obzirom na broj radnih sati i visoke troškove gradnje.

Na slikama 9 i 10 prikazano je isplativo alternativno rješenje u obliku ojačanog potpornog zida izrađenog Terramesh sustavom ojačanog geomrežama ParaGrid 200 i ParaLink 500.

Zid je je izveden u 3 sekcije sa svakom dionicom visokom 10 m i bermama širine 2 m (Maccaferri, 2013.).



Slika 9. Poprečni presjek potpornog zida (Maccaferri, 2013.)



Slika 10. Potporni zid od armiranog tla visine 30 m, Rusija

- Al Jais, Ras Al-Khaimah, UAE – Zid koji podupire planinsku cestu

Najviši vrh u UAE je Al Jais, koji se nalazi u sjevernom emiratu Ras AL-Khaimah, 25 km udaljen od glavnog grada.

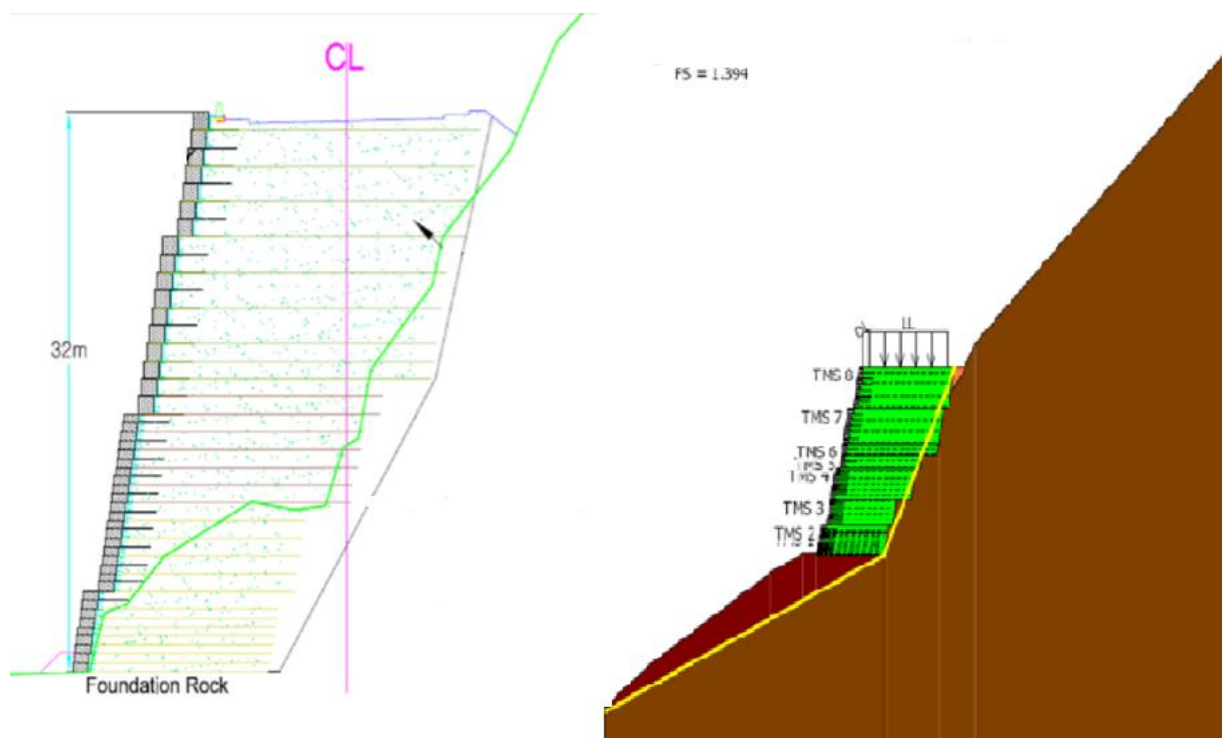
Na cesti dužine 36 km i 1700 metara nadmorske visine, bilo je potrebno izgraditi skoro vertikalnu konstrukciju maksimalne visine od 32 metra. Potporni zid, građen metodom armiranog tla, prikazan je na slici 11 (Maccaferri, 2015.).



Slika 11. Potporni zid od armiranog tla visine 32 m, UAE

Na ovoj lokaciji dešavaju se povremene oborine i snježne padaline, tijekom kojih su česte poplave razlog ispiranja čitavih cesta i nasipa. Kako bi se izbjegao problem rastućeg pornog tlaka, rješenje potporne konstrukcije izvedeno je kao slobodno drenirajući *ParaMesh* sustav.

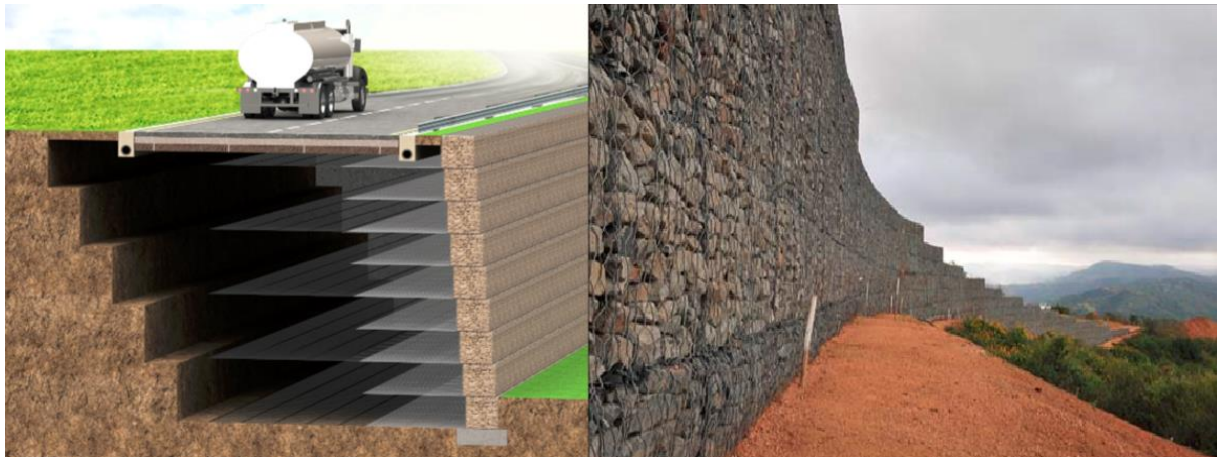
Potporni zid od armiranog tla sadrži gabionsku fasadnu jedinicu s dvostrukim uvijanjem žice i armaturnom rešetkom te poliestersku geomrežu velike čvrstoće, koja služi kao primarna armatura, u okomitom razmaku od jednog metra. Poprečni presjek potpornog zida površine 3.670 m², u rasponu visine od 5 do 32 metra prikazan je na slici 12.



Slika 12. Poprečni presjek potpornog zida (Maccaferri, 2015.)

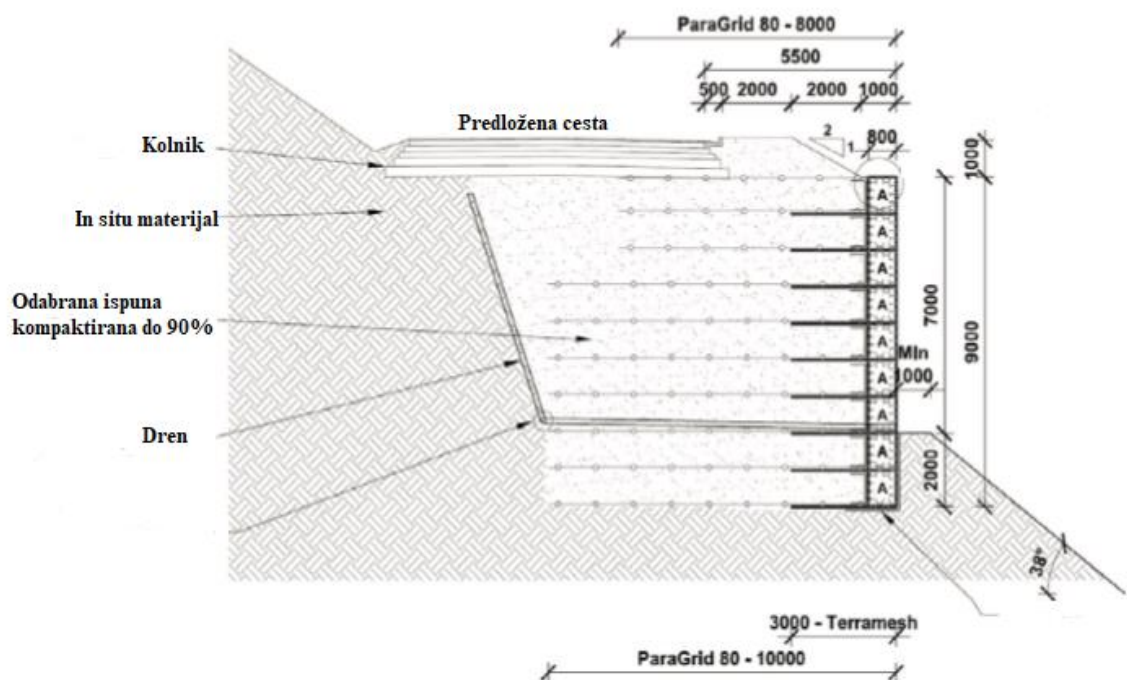
- Umgababa, Kwa-Zulu, Južna Afrika – zid koji podupire autocestu

Konstrukcija od armiranog tla, prikazana na slici 13, izgrađena je kao potporni zid visine 9 metara koji nosi dio autoceste dužine 270 metara (Maccaferri, 2015.)



Slika 13. Konstrukcija od armiranog tla visine 9 m, Južna Afrika

Kao što je prikazano na slici 14, sustav sadrži gabionske fasadne elemente sa pripadajućom čeličnom mrežom koja služi kao sekundarna armatura, dvije vrste geomreža izgrađenih od poliesterskih vlakana omotanih u čvrstu polietilensku oblogu (primarna armatura) i drenažni sustav.



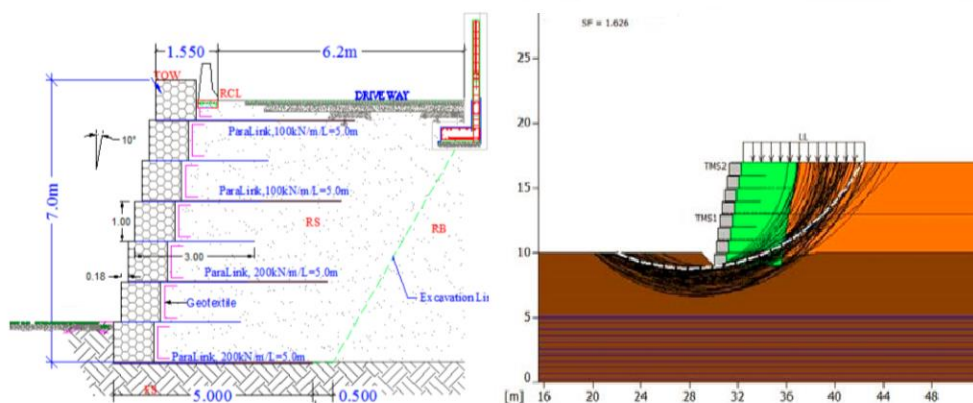
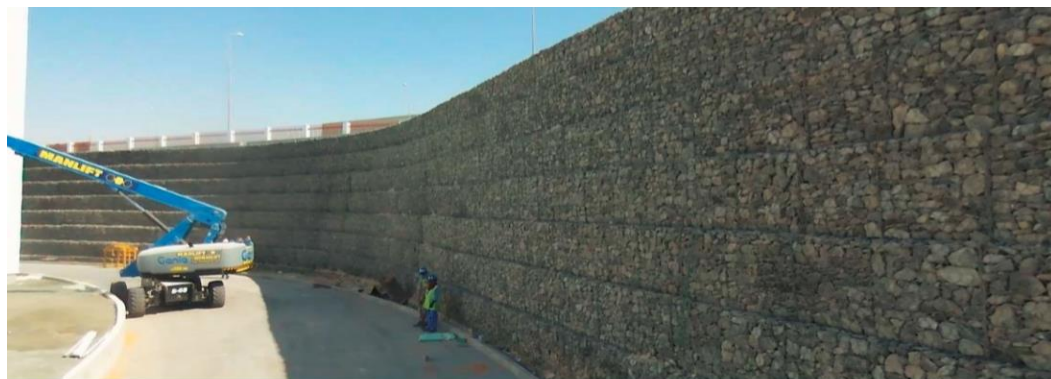
Slika 14. Poprečni presjek konstrukcije od armiranog tla (Maccaferri, 2015.)

- Dubai, UAE - Proširenje logističkog gradskog objekta

Aramex Middle East odlučio je proširiti svoje nove pogone u *Dubai Logistics Cityu*, jednom od najvažnijih čvorišta u regiji za transport i logistiku kako bi mogli zadržati svoju vodeću poziciju u regiji.

Na predloženoj parceli za proširenje postoji razlika u razini od 8 m duž duljine od 500 m koja je zahtijevala gotovo okomite potporne zidove zbog parkirališnih površina potrebnih ispod zida i pristupne ceste iznad zida.

Prvo predložena ideja masivnog gabionskog zida, idealnog za prihvat seizmičkih opterećenja, zahtijevala je 8.800 m³ kamene ispune koja bi trebala biti uvezena iz obližnjih Emirata. Izvođač radova kao najbolje rješenje predlaže potporni zid od armiranog tla visine do 8 metara. Zid prikazan na slici 15, sastoji se od gabionske ispune (2.900 m³) s integriranom mrežom od čelične žice i *ParaLink* geomreže postavljene u razmaku od 2 metra (Maccafarri, 2015.).

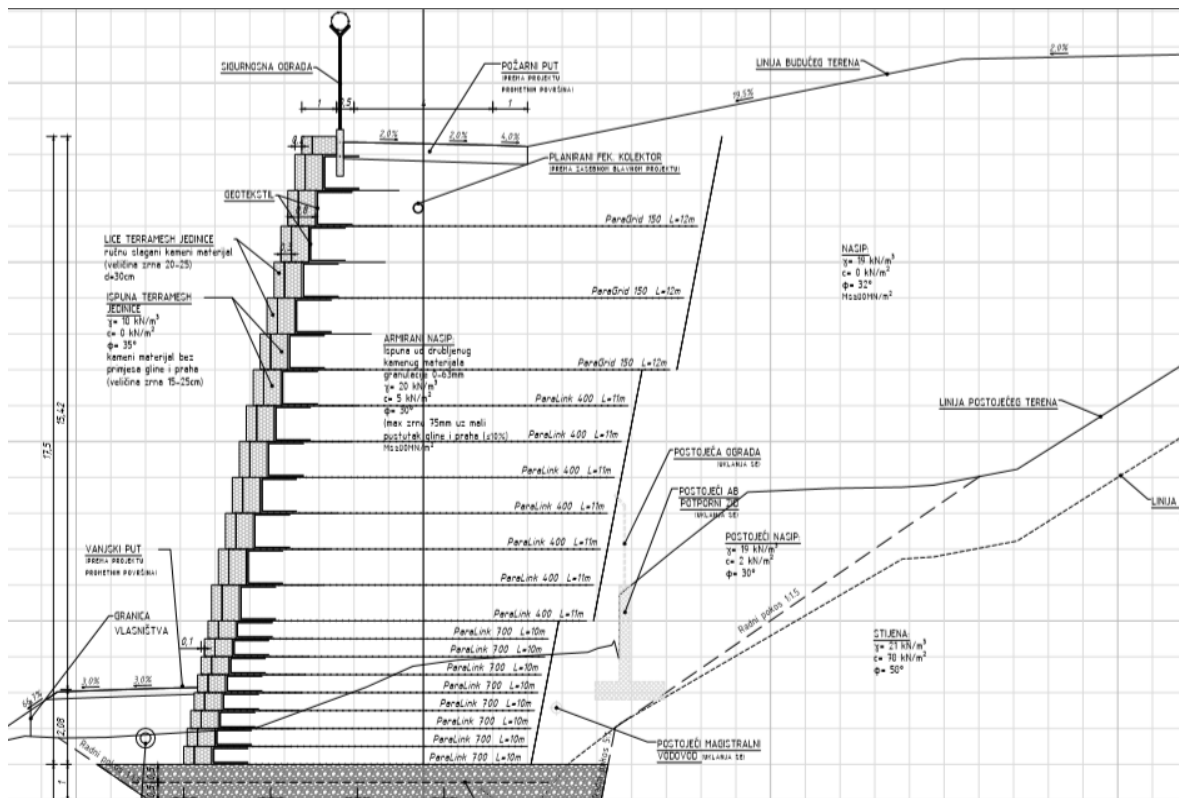


Slika 15. Potporni zid u visini od 4 do 8 m, Dubai

4. PRIMJER POTPORNOG ZIDA NA AERODROMU ČILIPÍ

4.1. Opis projektirane građevine i okolnog tla

Južno od planirane staze za vožnju, nalazi se potporni zid maksimalne visine $H = 18$ m, dužine $L = 524$ m. Potporna konstrukcija je izvedena kao Terramesh sustav za visine zida iznad 4 metra, a za visine ispod 4 metra sustav je izveden kao gabionska potporna konstrukcija. Terramesh potporna konstrukcija se sastoji od terramesh jedinica, a na svaku se nastavlja, s preklopom, biaksijalna geomreža koja se sidri u slojeve novog nasipa (armirani nasip). Visinski razmak geomreža odgovara visini elementa (bloka) terramesh jedinice (0,5 m – 1,0 m). Najviši profil zida prikazan je na slici 17.



Slika 16. Najviši profil zida, Čilipi (Consultants, 2016)

Prije izvedbe planiranog potpornog zida, bilo je potrebno ukloniti postojeći temelj s ogradom te postojeći AB potporni zid sa ogradom.

U središnjem dijelu potpornog zida na području uvale, debeli sloj zemlje crvenice (5 - 8 m) zapunjavao je uvalu (vrtaču). Ista je po sastavu glina, prahovita, krute do polučvrste konzistencije. Stoga je temeljenje potpornog zida izvedeno na poboljšanom tlu. Tlo se poboljšalo mlaznim injektiranjem (Jet grouting). Nakon poboljšanja tla mlaznim injektiranjem u razini vrha stupnjaka izveo se tampon debljine $d = 1$ m unutar kojeg su postavljene dvije geomreže (u oba smjera) radi ujednačenog prijenosa opterećenja na poboljšano tlo. Prilikom proračuna mehaničke otpornosti i stabilnosti potpornog zida poboljšano tlo se promatra kao homogeni kruti blok geotehničkih parametara određenih zasebnim proračunom. Na ostaloj dionici potporni zid je utemeljen na čvrstoj stijeni nakon uklanjanja površinskog sloja (pokrivač debljine do 2m). Na čvrstoj stijeni nalazi se podloga na koju će se zid polagati debljine 0,2 m koja je poravnata i dobro zbijena ($M_s = \min 40$ MPa)

Kontaktna površina gabion blokova/lica i nasipa obložena je geotekstilom mase 300 g/m^2 kako ne bi došlo do prodiranja tla u šupljine unutar gabiona.

Geomehaničke karakteristike armiranog tla:

- zapreminska težina $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- efektivna kohezija $c = 5 \text{ kN/m}^2$
- kut unutarnjeg trenja $\varphi = 30^\circ$
- modul stišljivosti $M_s \geq 80 \text{ MPa}$

Za ispunu armiranog tla iza lica Terramesha odabran je materijal iz iskopa i nabit je u slojevima od 30 cm ($M_s \geq 80 \text{ MPa}$), granulacije 0-63mm, maksimalnog zrna 75 mm, uz mali postotak (<10%) primjesa gline i praha.

Geomehaničke karakteristike nasipa iza armiranog tla:

- zapreminska težina $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- efektivna kohezija $c = 0 \text{ kN/m}^2$
- kut unutarnjeg trenja $\varphi = 32^\circ$
- modul stišljivosti $M_s \geq 80 \text{ MPa}$

Za nasip je odabran materijal iz iskopa i nabiti u slojevima od 30 cm ($M_s \geq 80$ MPa), maksimalnog zrna 250 mm, uz mali postotak ($<10\%$) primjesa gline i praha.

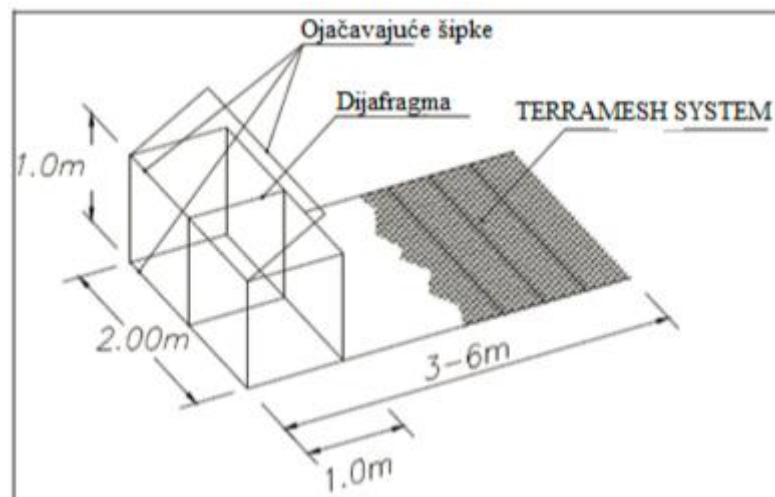
Na osnovi geotehničkih istraživanja, provedenih za potrebe projektiranja južnog potpornog zida proširenja zračne luke Dubrovnik, dobiveni su podaci o geosredini koji su poslužili za odabir i razradu tehničkog rješenja temeljenja:

- Duž istraživane trase morfološki se uočavaju tri zone na terenu: zapadna zona terena gdje se izmjenjuju blokovskih izdanci stijene i ulegnuća u terenu s tankim pokrovnim sedimentom od gline, kršja i praha, središnji dio s uvalom u terenu (vrtača) s debljim pokrivačem od terra rosse, i istočno od uvale teren u usponu uz prisustvo stepenica koje se uglavnom rezultat umjetno stvorenih terasa nasipavanjem i s pokrovnim sedimentom do 1 do 2m debljine
- U zoni između promatrane trase budućeg potpornog zida i postojeće ograde zračne luke, sjevernije, registrirano je prisustvo veće količine nabačaja od kamenih blokova i miješanog materijala iz iskopa
- Provedenim geofizičkim mjerenjima refrakcijske seizmike i geoelektrične tomografije (upotpunjeno istražnim bušotinama za gornju zonu terena), dobiven je detaljniji uvid u građu terena i stanje stijenske mase do dubina preko 30m. Zapadni dio karakterizira vrlo različit stupanj razlomljenosti i okršnosti po dubini i lateralno. Kao što je spomenuto, u središnjem dijelu dominira uvala u terenu s pokrivačem od crvenice u debljini 5 do 8m, i ispod dubokom razlomljenijom zonom koja bi odgovarala izraženijem rasjednom lomu. Istočno od uvale izdvaja se blok s generalno boljim karakteristikama stijenske mase, na površini još sa razvijenim pokrivačem većinom od gline i jače zaglinjenom zonom kore trošenja do 3 do 4m.
- Tijekom istražnog bušenja nije registrirana podzemna voda u bušotinama, te ju je za očekivati na većim dubinama,

- provedeni proračuni čvrstoće stijenske mase Hoek-Brown-ovim empirijskim kriterijem za stijensku masu kore trošenja dobivena je vrijednost granične nosivosti u iznosu $q_R = 0,95 \text{ MPa}$ (Consultants, 2016).

4.2. Terramesh sustav

Elementi Terramesh Systema (slika 17) zadovoljavaju zahtjeve za uporabu u svrhu metalnog armiranja nasipa s pokosima maksimalnog nagiba 90° . Strukturalna stabilnost se postiže kroz frikcionalnu interakciju mehaničko uklještenje čestice tla s proizvodom.



Slika 17. Elementi Terramesh sistema (Babić 2015, n.d.)

Ovaj sustav predstavlja vrlo rješenje za trajnu sanaciju klizišta, posebno u sanaciji klizišta na cestama ugrađenim u usjeke terena. Sustav Terramesh pokazuje se kao vrlo dobro tehničko i ekonomično rješenje.

Sustav Terramesh sastoji se od gabionskih košara izrađenih od pocinčanih čeličnih žica koje tvore mrežu sa šesterokutnim rupama. Gornja i prednja strana gabionskih košara su preklopljene, a stražnja i bočne stranice izrađene su od posebnih komada mreže. Moguće je dodati poseban komad mrežice, takozvanu membranu, koja je povezana s prednjom i stražnjom stranom gabionske košare. Ono što sustav Terramesh čini karakterističnim je

produžetak za ojačanje tla iza potporne konstrukcije. Maksimalna duljina produžetka za ojačanje tla je 5,0 m. Sustav Terramesh može se primijeniti na padinama terena do maksimalnog kuta od 70°. Strukturna stabilnost sustava Terramesh postiže se interakcijom kamenog agregata iza zida s rupama u mreži koje se koriste za armiranje tla. Nakon isporuke gabionskih košara na gradilište, oni se sastavljaju i zatim povezuju pocinčanim prstenovima prikazanim na slici x. Nakon toga, preporučuje se ručno napuniti gabionske košare odgovarajućim kamenim materijalom.

Terramesh sustav sastoji se od elemenata od kojih svaki ima horizontalni panel koji na svom jednom kraju ima gabionski koš, formiranih od dvostruko uvijene heksagonalne pocinčane mreže s PVC oblogom.

Stražnje i bočne strane koša formirane su od posebnih komada mreže koje se fiksiraju za panel tijekom proizvodnje.

Dodatni posebni panel mreže koji služi kao dijafragma pričvršćuju se za prednju i stražnju stranu koša na gradilištu. Heksagonalne mreže izrađene su od pocinčane plastificirane čelične žice promjera 2,7 mm.). Glavna žica je promjera 3.7 mm, krajevi i porubi su promjera min 4.4 mm. Rubovi se međusobno spajaju prstenovima ili žicom promjera 3.2 mm, počevši od vrha prema dolje. Prstenovi se stavljaju na svakih 20 cm dužine, s ručnom ili pneumatskom spajalicom. Ručna spajalica je mehanička sprava za spajanje prstenova od nehrđajućeg čelika ili Flex-C prstenova od pocinčanog čelika.

Prvo se izvodi geomreža na koju se postavlja Terramesh jedinica.

- **Geomreže:** Paragrid je biaksijalna mreža sastavljena od geosintetičkih traka koja je usidrena među slojeve novog nasipa u dužini prema proračunu za promatrani presjek. Visinski razmak panela odgovara visini gabionskog elementa (bloka). Paragrid mreža se preklapa sa horizontalnim panelom Terramesh jedinice (preklap prema proračunu za promatrani presjek).

Paralink je ravninska jednoosna struktura sastavljena od paralelno raspoređenih kompozitnih geosintetičkih polimernih traka širine od 85 do 91 mm. Svaka pojedinačna traka se sastoji od jezgre koju čini poliester visoke čvrstoće (PET) i izdržljivog vanjskog omotača kojeg čini polietilen (male gustoće (LLDPE). Nosive polimerne trake su spojene sa trakama male nosivosti koje su postavljene

okomito na njih. Geomreža se formira spajanjem nosivih i nenosivih polimernih traka u mrežu širine 4,50m i s otvorima minimalne dimenzije 100 x 18 cm.

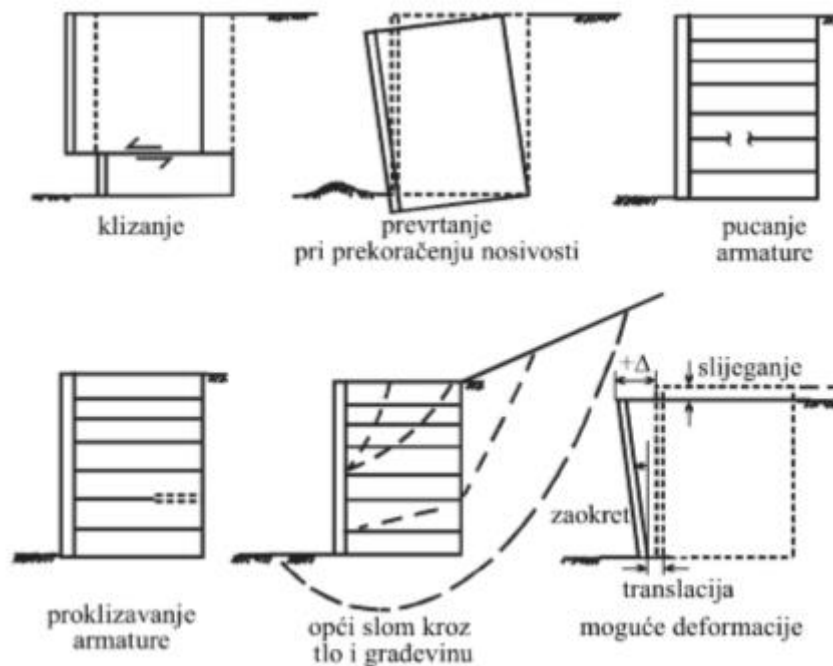
- **Ispuna gabiona:** Ispuna gabionskih koševa je kameni materijal minimalnog promjera zrna (fragmenta) većeg od otvora (oka) mreže, s tim da se vidljivo (vanjsko) lice gabiona puni ručno složenim kamenim komadima lijepog sloja i izgleda i što manjim razmakom među kamenjem. Debljina vertikalnog sloja kamene ispune lica je 30 cm. Kamen koji se ugrađuje na lice gabiona mora biti veličine zrna 20-25 cm. Ispuna gabiona mora imati minimalnu veličinu zrna dimenzije 15 cm, kako bi se osiguralo da ne prolazi kroz mrežu. Maksimalna dozvoljena dimenzija je 25 cm. Gabioni se pune kamenom 50 do 75 mm iznad nivoa vrha mreže, kako bi se omogućilo slijeganje uslijed vlastite težine.
- **Ispuna armiranog tla:** Ispuna se izvodila u slojevima od min. 150 mm prije kompaktiranja. Vodilo se računa o tome da su mreže adekvatno prekrivene ispunom prije zbijanja ili prelaska vozila. Vozila se ne smiju kretati direktno po mreži. Prije ugradnje ispune geotekstil je postavljen na površinu na koju se ugrađuje ispuna i na prednju stranu sekcije. U nasip se ugrađuju materijali koji mogu biti zbijeni na traženu vrijednost, ograničenje je u krupnijim komadima koji mogu predstavljati problem za mrežu, a i nasip je nemoguće zbiti. Nasip, dakle, treba biti od mješovitog kamenog materijala svih frakcija, ali da najkrupnija nije veća od 1/3 sloja koji se nabija, a traži se minimalna gustoća nakon zbijanja 2000 kg/m³. Maksimalna debljina slojeva za zbijanje ovisi o vrsti materijala za ispunu, kao i dostupnoj mehanizaciji na gradilištu, ali ne smije prelaziti 500 mm. Ispuna koja formira armiranu zemlju treba biti od granulirane ispune, slobodno drenirana i sa visokim kutom unutarnjeg trenja. Tlo ne bi trebalo pokazati neka pogoršanja ovih karakteristika s vremenom. Polaganje i zbijanje nasipa treba biti u skladu sa svim relevantnim lokalnim specifičnostima za cestovne konstrukcije. Granulometrijski sastav ispune armiranog tla je 0-63 mm, sa manje od 10% zrna veličine manje od 0,02 mm, sa maksimalnim zrnom 75mm. U svakom slučaju najvažniji parametar za razmatranje je kut unutarnjeg trenja koji treba biti minimalno 30°. Potrebna minimalna zbijenost je do gustoće od 2000 kg/m³. Korišteni su samo ručno opremljene vibrirajuće trake ili valjci za završavanje prednjeg lica konstrukcije (Consultants, 2016).

4.3. Dimenzioniranje i prikaz rješenja

4.3.1. Općenito

Promatrajući građevine od armiranog tla, može se zaključiti da bi ih se moglo svrstati u gravitacijske potporne građevine. Potporne zidove od armiranog tla treba dimenzionirati jednako kao i gravitacijske zidove jer se isto tako sa svojom težinom odupiru pritiscima tla kojeg pridržavaju. S obzirom na postojeću armaturu i sile koje ona preuzima potrebno je izvršiti i dodatne proračune.

Proračun je izvršen prema HRN EN 1997 i pripadajućem Nacionalnom dodatku (NA). Potporna konstrukcija od armiranog tla Terramesh sustav je jedna cjelina koja se ponaša kao kruti gravitacijski zid. Dimenzioniranje je provedeno za granična stanja, na sve zahtjeve vanjske (prevrtanje, klizanje, slom tla, globalna stabilnost) i unutarnje stabilnosti (provjera armature; dužina, provjera presjeka na vlačni slom – pucanje armature, potrebna duljina sidrenja u stabilni dio nasipa - čupanje). Na slici 18 prikazane su mogućnosti oštećenja potpornih građevina od armiranog tla.



Slika 18. Mogućnosti oštećenja potpornih građevina od armiranog tla (Consultants, 2016)

Proračun je proveden za stalnu i seizmičku proračunsku situaciju softverskim programima MacStars. Aktivni pritisak i pasivni otpor tla su računani po Coulombovoj teoriji. Armirane zemljane konstrukcije zasnivaju svoju stabilnost prvenstveno na međudjelovanju armature i okolnog tla. Lice (fasada) prvenstveno služi sprečavanju lokalne erozije i estetskim razlozima.

Proračun aktivnog pritiska tla prema Coulombovoj teoriji:

$$\sigma_a = \sigma_z \cdot K_a - 2 \cdot c_{ef} \cdot K_{ac}$$

σ_z - vertikalno naprezanje u tlu ($\sigma_z = \gamma \cdot z$)

c_{ef} - efektivna kohezija

K_a - koeficijent aktivnog pritiska tla

K_{ac} - koeficijent aktivnog pritiska tla uslijed kohezije

Koeficijent aktivnog pritiska tla:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos(\alpha - \beta)}}\right)^2}$$

Koeficijent aktivnog pritiska tla uslijed kohezije:

$$\text{Za } \alpha < \frac{\pi}{4} \quad K_{ac} = \frac{K_{ahc}}{\cos(\delta + \alpha)}$$

$$K_{ahc} = \frac{\cos \varphi \cos \beta \cos(\delta - \alpha) (1 + \operatorname{tg}(-\alpha) \operatorname{tg} \beta)}{1 + \sin(\varphi + \delta - \alpha - \beta)}$$

$$\text{Za } \alpha \geq \frac{\pi}{4} \quad K_{ac} = \sqrt{K_a}$$

φ - kut unutarnjeg trenja

δ - kut trenja između stražnje plohe zida i tla

α - nagib stražnje plohe zida

β - nagib nasipa

Horizontalna i vertikalna komponenta aktivnog pritiska tla:

$$K_{ax} = \sigma_a \cdot \cos(\alpha + \delta) \quad K_{az} = \sigma_a \cdot \sin(\alpha + \delta)$$

Proračun pasivnog otpora tla prema Coulombovoj teoriji:

$$\sigma_p = \sigma_z \cdot K_p + 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_p}$$

σ_z - efektivno vertikalno naprezanje u tlu

c - kohezija

K_p - koeficijent pasivnog otpora tla

Koeficijent pasivnog otpora tla:

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\delta - \alpha) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \alpha) \cos(\beta - \alpha)}}\right)^2}$$

Horizontalna i vertikalna komponenta pasivnog otpora tla:

$$K_{px} = \sigma_p \cdot \cos(\alpha + \delta) \quad K_{pz} = \sigma_p \cdot \sin(\alpha + \delta)$$

Kontrola na nosivost tla:

Sile koje djeluju na dno stope potporne konstrukcije:

$$N = F_v \cdot \cos \alpha + F_h \cdot \sin \alpha$$

$$H = F_v \cdot \sin \alpha + F_h \cdot \cos \alpha$$

Provjera nosivosti tla računa se prema sljedećem izrazu:

$$\sigma = \frac{N}{d-2 \cdot e} < R_d \quad e = \frac{\Sigma M}{N} \quad e < \frac{1}{3} \cdot d = e_{alw}$$

N - ukupna normalna sila koja djeluje na dno temelja

d - širina temeljne stope

R_d - nosivost temeljnog tla

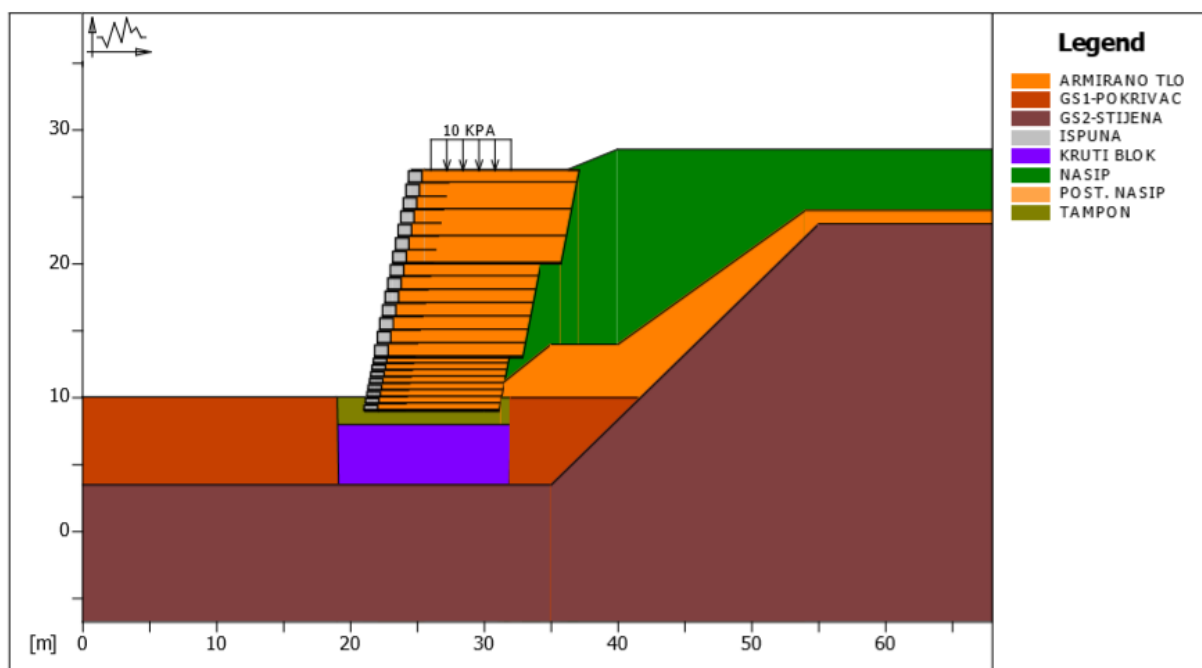
e - ekscentricitet

e_{alw} - dozvoljeni ekscentricitet

4.3.2. Rješenja

Kao što je ranije navedeno, rješenja će biti prikazana za najviši profil zida ($H=18$ m).

Slika 19 i tablica 2 daju uvid u odabrane geomehničke parametre tla potrebne za proračun:

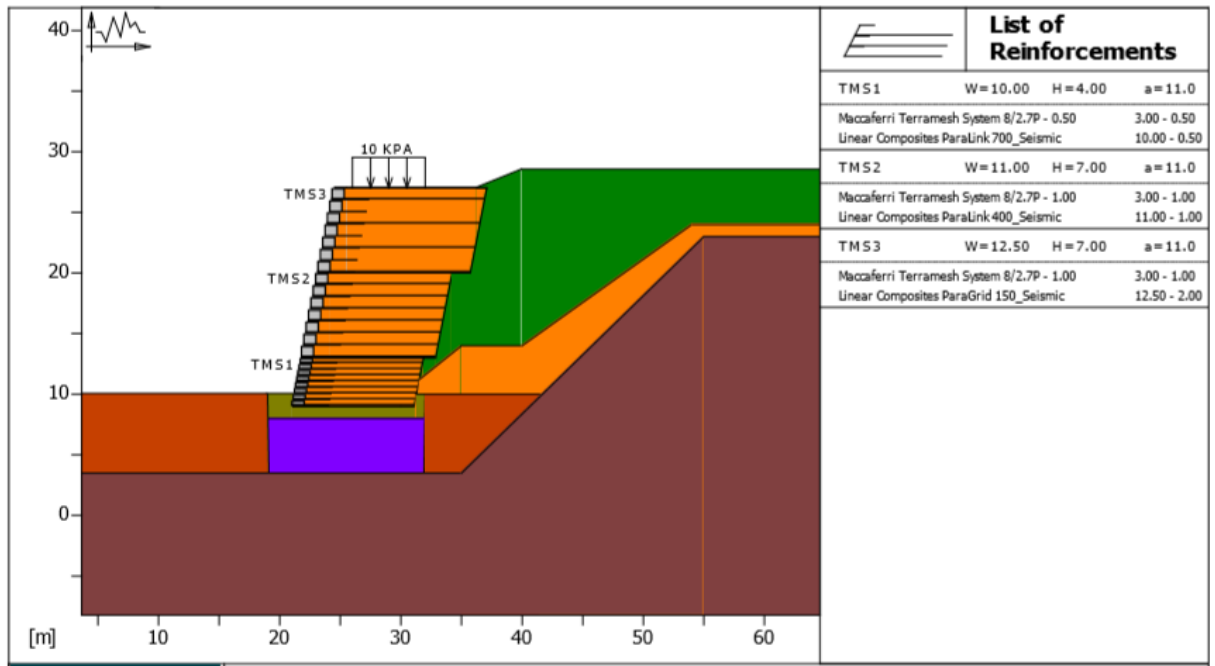


Slika 19. Poprečni presjek i legenda konstrukcije

| TLO | KUT UNUTARNJEG TRENJA φ [°] | EFEKTIVNA KOHEZIJA c[kPa] | PROSTORNA TEŽINA γ [kN/m ³] |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| ARMIRANI NASIP | 30 | 5 | 20 |
| NASIP | 32 | 0 | 19 |
| GS1 - POKRIVAČ | 23 | 24 | 19 |
| GS1 – TEMELJNO TLO-STIJENA | 58 | 78 | 21 |
| ISPUNA GABIONA | 35 | 0 | 18 |
| KRUTI BLOK | 0 | 156 | 19 |
| POSTOJEĆI NASIP | 30 | 2 | 19 |
| TAMPON | 35 | 0 | 20 |

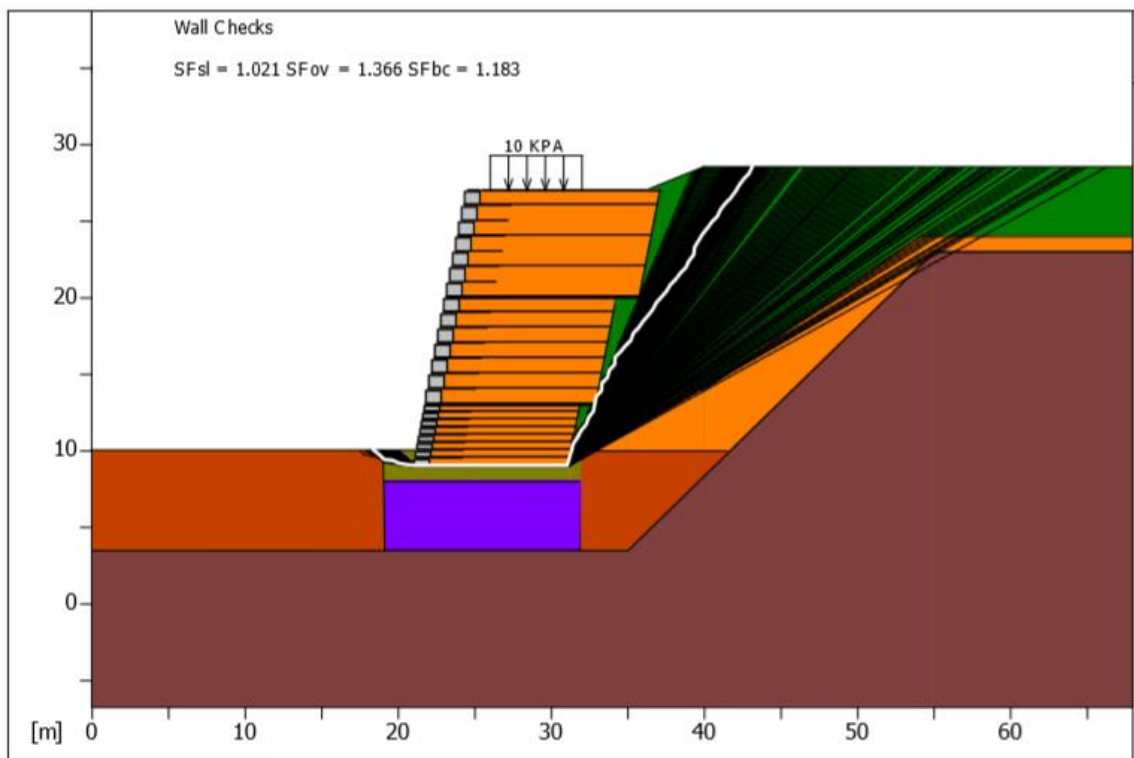
Tablica 2. Geomehanički parametri tla

Radi preciznijeg izračuna poprečni presjek se dijeli na tri bloka. Kao što prikazuje slika 20, prvi blok je visine 4 m i širine 10 m sa 8 gabionskih košara pojedinačne visine od 0.5 m, što znači da je armatura u istom horizontalnom razmaku. Drugi blok je visine 7 m i širine 11m sa 7 gabionskih košara pojedinačne visine od jednog metra, što znači da je armatura u horizontalnim razmacima od jednog metra. Treći blok se od drugog razlikuje samo u širini koja iznosi 12.5 m.



Slika 20. Poprečni presjek podijeljen na blokove

Provjera zida (slika 21):



Slika 21. Provjera zida

Sila otpora: 2111.40 kN/m

Aktivna sila: 2068.80 kN/m

Faktor sigurnosti (klizanje): 1.021

Faktor sigurnosti (prevrtanje): 1.366

Faktor sigurnosti (nosivost): 1.183

Moment (otpor): 31342.00 kNm

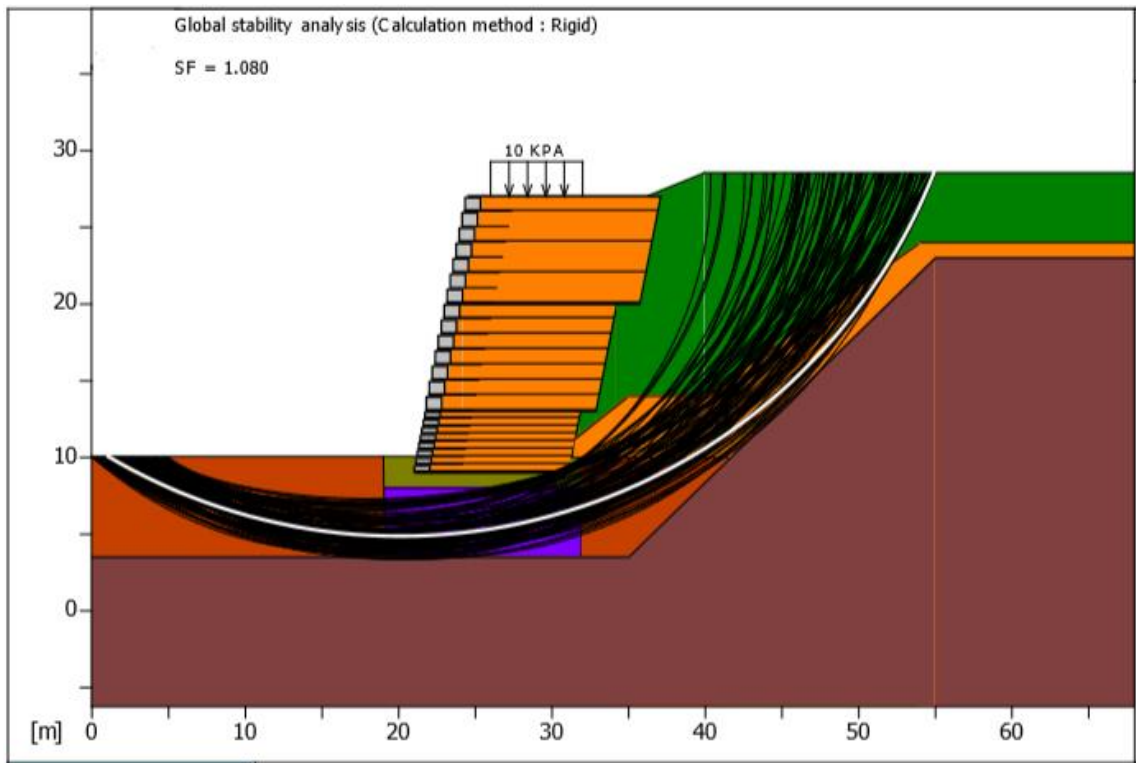
Moment (prevrtanje): 22942.00 kNm

Normalna sila na bazu: 3769.30 kN

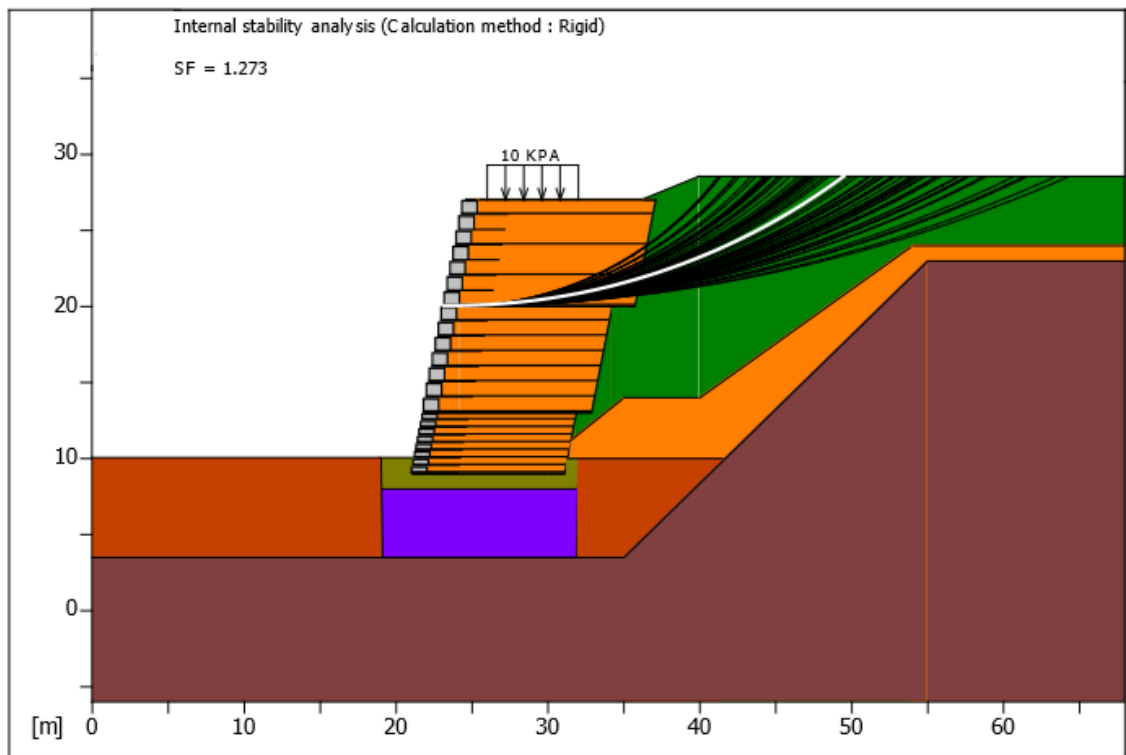
Nosivi pritisak: 1000.00 kN/m²

Aktivni pritisak: 845.65 kN/m²

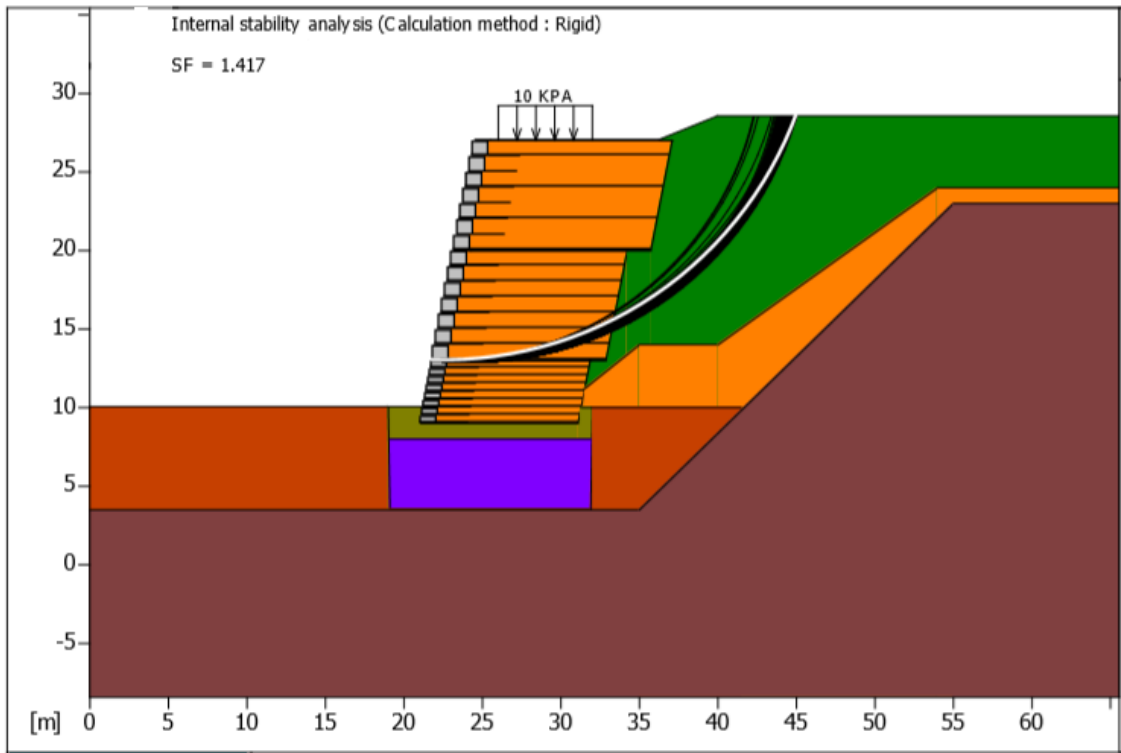
Slike 22, 23, 24 i 25 prikazuju klizne plohe određenih blokova, faktore sigurnosti za globalnu i unutarnju stabilnost potpornog zida.



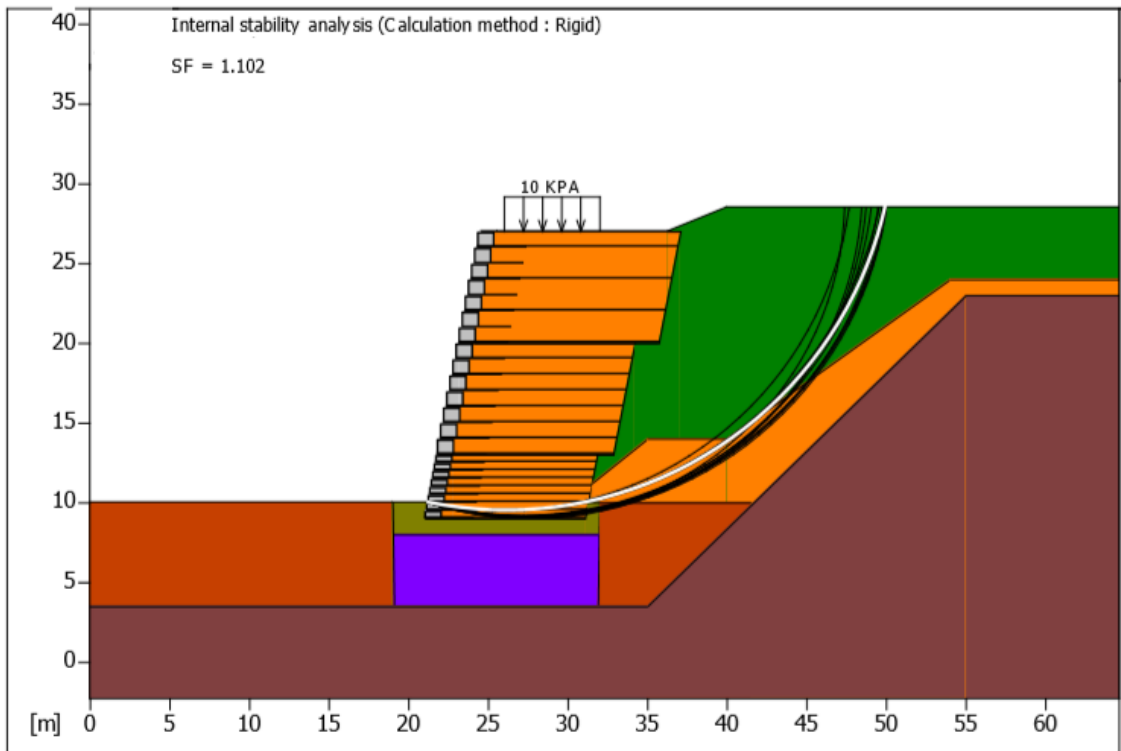
Slika 22. Globalna stabilnost, $SF=1.080$



Slika 23. Unutarnja stabilnost (Blok 3), $FS=1.273$



Slika 24. Unutarnja stabilnost (Blok 2), $FS=1.417$



Slika 25. Unutarnja stabilnost (Blok 1), $FS=1.102$

5. ZAKLJUČAK

U radu je objašnjena metoda armiranog tla s naglaskom na potporne zidove. Prikazan je primjer potpornog zida od armiranog tla na aerodromu Čilipi. Zid je maksimalne visine 18 m i dužine 524 m. Za dijelove zida iznad 4 m, potporna konstrukcija je izvedena kao *Terramesh* sustav, a za dijelove do 4 m kao gabionska potporna konstrukcija.

Terramesh potporna konstrukcija se sastoji od terramesh jedinica, a na svaku se nastavlja, s preklopom, biaksijalna geomreža koja se sidri u slojeve novog nasipa (armirani nasip). Visinski razmak geomreža odgovara visini elementa (bloka) terramesh jedinice (0,5 m – 1,0 m).

Na početku rada dana je podjela potpornih konstrukcija od armiranog tla, s prikazom primjene i terminologije.

Dalje su opisane i prikazane najčešće korištene armature sa pripadajućim licima. Radi vizualizacije same metode armiranog tla, jedno poglavlje sadrži niz primjera sa slikama i opisima potpornih zidova od armiranog tla.

Prikazano je i rješenje osiguranja denivelacije nasipa na južnost strani nasipa na aerodromu Čilipi kraj Dubrovnika.

Zaključno se može reći kako metoda armiranja tla sadrži niz pogodnosti ali još uvijek nije ostvarila svoj puni potencijal. Spomenuta tehnologija armiranja tla se pokazuje u nizu različitih inženjerskih zadaća kao optimalno rješenje s tehničkog i gospodarskog aspekta. Shvaćanje same tehnologije izgradnje i principe nosivosti konstrukcija od armiranog tla, uz prikaz mnogobrojnih prednosti ovakvih zidova nad konvencionalnim, može doprinijeti rastu broja ovakvih tipova konstrukcija na našim prostorima.

POPIS LITERATURE

Babić 2015, M., n.d. *Potporna konstrukcija s Terramesh sistemom*. [Umjetničko djelo] (Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije)

Consultants, T., 2016. *Rekonstrukcija Građevine Unutar Zračne Luke Dubrovnik*, Dubrovnik: Zračna Luka Dubrovnik doo

Das, B. M., 2013. *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Patparganj Delhi: Cengage Learning

Earth, R., 2021.

Available at: <https://reinforcedearth.com/project/seattle-tacoma-international-airport-third-runway/>

Federal Highway Administration, 2001. *Reinforced Soil Structures Volume I. Design and Construction Guidelines*, Virginia: U.S. Department Of Commerce

Gradiški, K., 2017. *Model interakcije geosintetičke trake i kamene ispune u konstrukcijama od armiranoga tla*, Zagreb

Héry, P., 2017. Soil Reinforcements in fills. *Geosynthetics*

IGH, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010. Opći Tehnički Uvjeti za Radove u Vodnom Gospodarstvu. *Gradnja i održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina za melioracije*. Zagreb

Jian, C., Varaskin, S., Klotz, U., Menge, 2009. *Construction Processes*, Egypt: ISSMGE

Jones, C. J. F. P., 1985. *Earth reinforcement and soil structures*. London: Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Services Ltd

Koerner, R. M., 2005. *Designing with Geosynthetics*. New Jersey: Pearson Education.

Maccaferri, 2015.. *Aramex Dubai Logistic City Facility Expansion*, Metropolitan City of Bologna: Maccaferri

Maccaferri, 2013. *Retaining Wall Construction near the Crushing Plant*, Metropolitan City of Bologna: Maccaferri

Maccaferri, 2015. *Improvements To Main Road P728*, Zola Predosa: an

Maccaferri, 2015. *Reinforced Soil Supports Mountain Road*, Metropolitan City of Bologna: Maccaferri

Roje-Bonacci, T., 2005. *Potporne Građevine i Građevne Jame*. Split: Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu

Terre-armee, 2021. *terre-armee.com*.

Available at: <https://www.terre-armee.com/our-projects/>

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Pregled depresije iz zraka | 3 |
| Slika 2. Prikaz depresije, starog potpornog zida i vatrogasnog puta | 4 |
| Slika 3. Primjeri primjene armiranog tla | 7 |
| Slika 4. Potporni zid od armiranog tla..... | 11 |
| Slika 5. Terre Armee | 14 |
| Slika 6. Najčešće korištene armature | 16 |
| Slika 7. Najčešće korištene obloge/lica | 18 |
| Slika 8. Lice građevine armirane geotekstilom..... | 18 |
| Slika 9. Poprečni presjek potpornog zida | 19 |
| Slika 10. Potporni zid od armiranog tla visine 30 m, Rusija | 20 |
| Slika 11. Potporni zid od armiranog tla visine 32 m, UAE | 20 |
| Slika 12. Poprečni presjek potpornog zida | 21 |
| Slika 13. Konstrukcija od armiranog tla visine 9 m, Južna Afrika | 22 |
| Slika 14. Poprečni presjek konstrukcije od armiranog tla | 22 |
| Slika 15. Potporni zid u visini od 4 do 8 m, Dubai | 23 |
| Slika 16. Najviši profil zida, Čilipi | 24 |
| Slika 17. Elementi Terramesh sistema | 27 |
| Slika 18. Mogućnosti oštećenja potpornih građevina od armiranog tla | 30 |
| Slika 19. Poprečni presjek i legenda konstrukcije | 34 |
| Slika 20. Poprečni presjek podijeljen na blokove | 35 |
| Slika 21. Provjera zida..... | 35 |
| Slika 22. Globalna stabilnost, SF=1.080 | 37 |
| Slika 23. Unutarnja stabilnost (Blok 3), FS=1.273 | 37 |
| Slika 24. Unutarnja stabilnost (Blok 2), FS=1.417 | 38 |
| Slika 25. Unutarnja stabilnost (Blok 1), FS=1.102 | 38 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Podjela glavnih kategorija armiranih konstrukcija | 9 |
| Tablica 2. Geomehanički parametri tla | 34 |

