

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo

Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



Visokošolski strokovni študij  
gradbeništva, Konstrukcijska smer

Kandidatka:  
**Maja Vochl Černe**

# **Stabilnost brežin iz armirane zemljine na primeru zahodnega portala predora Markovec**

**Diplomska naloga št.: 374**

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**  
doc. dr. Vojkan Jovičić

Ljubljana, 2010

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana, **MAJA VOCHL ČERNE** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: **»STABILNOST BREŽIN IZ ARMIRANE ZEMLJINE NA PRIMERU ZAHODNEGA PORTALA PREDORA MARKOVEC«**.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 11.5.2010

---

(podpis)

## **ZAHVALA**

Za pomoč in vzpodbudo pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju, izr. prof. dr. Janku Logarju in somentorju, doc. dr. Vojkanu Jovičiču.

Iskrena hvala zaposlenim v podjetju IRGO Consulting d.o.o. za posredovanje informacij ter strokovno pomoč pri izvajanju stabilnostnih analiz za brežino iz armirane zemljine v območju zahodnega portala predora Markovec.

Peter, mami, ati, hvala vam za vaše neizmerno potrpljenje in podporo.



## **BIBLIOGRAFSKO- DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 624.131.53:624.19(043.2)

**Avtor:** Maja Vochl Černe

**Mentor:** izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:** doc. dr. Vojkan Jovičič

**Naslov:** Stabilnost brežin iz armirane zemljine na primeru zahodnega portala predora Markovec

**Obseg in oprema:** 76 str., 14 pregl., 57 sl., 47 en.

**Ključne besede:** stabilnost brežin, metode mejnih ravnovesij, drsne ploskve, geosintetiki, predor Markovec

### **Izvleček:**

Diplomska naloga obravnava stabilnost brežin in nasipov po metodah mejnih ravnovesij. Podaja splošen opis ravnih drsnih ploskev, krožno- cilindričnih drsnih ploskev in poljubnih drsnih ploskev. Opisane so različne numerične metode ter podani izrazi za izračun stabilnosti.

Sledi splošen opis geosintetikov in njihovih funkcij. Obravnavano je vprašanje trajnosti geosintetikov, opisani so različni degradacijski mehanizmi. Podrobneje so opisani ojačitveni geosintetiki, ki se uporabljajo za stabilizacijo brežin in nasipov.

Na koncu je predstavljen postopek izračuna stabilnosti za nasip iz armirane zemljine na območju zahodnega portala predora Markovec. Izračuni so narejeni s programi Slide in Maccaferri Macstars 2000.



## **BIBLIOGRAPHIC- DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.131.53:624.19(043.2)

**Author:** Maja Vochl Černe

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Janko Logar

**Co supervisor:** Assist. Prof. Dr. Vojkan Jovičič

**Title:** Stability of reinforced earth slopes on the western portal of the Markovec tunnel

**Notes:** 76 p., 14 tab., 57 fig., 47eq.

**Key words:** slope stability, methods of limit equilibrium, sliding surfaces, geosynthetics, Markovec tunnel

### **Abstract:**

The subject of this Graduation Thesis is stability of slopes and embankments by the methods of limit equilibrium. It provides general description of different slip surfaces. Various numerical methods are described and different equations for calculation of stability of slopes and embankments are given.

A general description of geosynthetics and their functions follows in the continuation. The question of durability of geosynthetics is discussed and various degradation mechanisms are described. More detailed description of geosynthetics for reinforcement of slopes and embankments is given.

The enclosure of the Graduation Thesis is a description and explanation of the procedures of calculations that were made in stability analysis of the reinforced earth slope on the western portal of the Markovec tunnel. Calculations were made by Slide and Maccaferri Macstars 2000 computer programs.





## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STABILNOST BREŽIN IN NASIPOV</b>	<b>3</b>
2.1	Uvod	3
2.2	Metode mejnih ravnovesij	6
2.2.1	Uvod	6
2.2.2	Ravne drsne ploskve	11
2.2.3	Krožno- cilindrične drsne ploskve	14
2.2.4	Poljubne drsne ploskve	19
2.3	Določanje minimalnega faktorja varnosti	22
2.4	Uporaba računalnika pri reševanju problemov stabilnosti	23
2.5	Ukrepi za stabilizacijo brežin	24
<b>3</b>	<b>GEOSINTETIKI</b>	<b>25</b>
3.1	Uvod	25
3.2	Vrste geosintetikov in njihove funkcije	27
3.3	Ojačitveni geosintetiki	31
3.3.1	Splošno	31
3.3.2	Geotekstili	31
3.3.3	Armaturne geomreže	34
3.3.4	Geokompoziti in geosatovja	35
3.4	Trajnost geosintetikov in različni degradacijski mehanizmi	35
<b>4</b>	<b>RAČUN STABILNOSTI NASIPA IZ ARMIRANE ZEMLJINE NA PRIMERU ZAHODNEGA PORTALA PREDORA MARKOVEC</b>	<b>39</b>
4.1	Uvod	39
4.1.1	Splošno o projektu	39
4.1.2	Geološke raziskave in podatki	40
4.1.3	Analize stabilnosti	43
4.2	Izračuni za profil P154	45
4.2.1	Faza 1: Začetna faza	45



<b>4.2.2</b>	<b>Faza 2: Popravljen geometrija</b>	<b>49</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Faza 3: Poljubna drsna ploskev</b>	<b>53</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Faza 4: Končna rešitev</b>	<b>57</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Ostali izračuni</b>	<b>60</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Karakteristični profili</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>Izračuni za profile P155 in P156</b>	<b>63</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Rezultati izračunov</b>	<b>63</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Karakteristični profili</b>	<b>64</b>
<b>4.4</b>	<b>Izračuni s programom Maccaferri Macstars 2000</b>	<b>68</b>
<b>4.5</b>	<b>Povzetek rezultatov</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>74</b>
	<b>VIRI</b>	<b>76</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

<b>Preglednica 1: Polimeri, ki se nahajajo v posameznih geosintetikih</b>	<b>26</b>
<b>Preglednica 2: Funkcije, ki jih opravljajo različni geosintetiki<sup>(1)</sup></b>	<b>30</b>
<b>Preglednica 3: Geomehanski podatki za osnovne plasti na območju zahodnega portala</b>	<b>42</b>
<b>Preglednica 4: Geomehanski podatki ostalih materialov, ki so se uporabili v izračunih</b>	<b>42</b>
<b>Preglednica 5: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 1</b>	<b>46</b>
<b>Preglednica 6: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 2</b>	<b>50</b>
<b>Preglednica 7: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 3</b>	<b>54</b>
<b>Preglednica 8: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 4</b>	<b>57</b>
<b>Preglednica 9: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P154</b>	<b>61</b>
<b>Preglednica 10: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P154</b>	<b>61</b>
<b>Preglednica 11: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P155</b>	<b>63</b>
<b>Preglednica 12: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P155</b>	<b>63</b>
<b>Preglednica 13: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P156</b>	<b>64</b>
<b>Preglednica 14: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P156</b>	<b>64</b>



## KAZALO SLIK

<b>Slika 1: Primer ravne drsne ploskve</b>	<b>4</b>
<b>Slika 2: Primer krožne drsne ploskve</b>	<b>4</b>
<b>Slika 3 : Primer drsne ploskve nepravilne oblike</b>	<b>5</b>
<b>Slika 4: Sile v karakteristični lameli</b>	<b>7</b>
<b>Slika 5: Blok na poševni ravnini</b>	<b>10</b>
<b>Slika 6: Ravna drsna ploskev</b>	<b>12</b>
<b>Slika 7: Krožno- cilindrična drsna ploskev</b>	<b>14</b>
<b>Slika 8: Sile v lameli</b>	<b>15</b>
<b>Slika 9: Krožna drsina v zasičeni drobnozrnati zemljini</b>	<b>16</b>
<b>Slika 10: Sile, ki delujejo na lamelo</b>	<b>18</b>
<b>Slika 11: Korekcija za metodo " Janbu- I "</b>	<b>20</b>
<b>Slika 12: Vertikalna sila in horizontalne napetosti v tleh</b>	<b>32</b>
<b>Slika 13: Horizontalne napetosti v tleh, ki se nahajajo na osi vertikalne sile</b>	<b>33</b>
<b>Slika 14: Pregledna situacija predora Markovec (Vir: <a href="http://www.dars.si">www.dars.si</a>)</b>	<b>39</b>
<b>Slika 15: Vzdolžni profil predora Markovec</b>	<b>39</b>
<b>Slika 16: Model sestave tal na območju zahodnega portala</b>	<b>42</b>
<b>Slika 17: Pregledna situacija zahodnega portala predora z oznakami profilov</b>	<b>44</b>
<b>Slika 18: Pregledna situacija v območju profilov P154, P155, P156</b>	<b>45</b>
<b>Slika 19: Razporeditev geosintetika v različnih variantah Faze 1</b>	<b>46</b>
<b>Slika 20: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 1)</b>	<b>47</b>
<b>Slika 21: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 1)</b>	<b>47</b>
<b>Slika 22: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 1)</b>	<b>48</b>
<b>Slika 23: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 1)</b>	<b>48</b>
<b>Slika 24: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 1)</b>	<b>49</b>
<b>Slika 25: Razporeditev geosintetika v različnih variantah Faze 2</b>	<b>50</b>
<b>Slika 26: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 2)</b>	<b>51</b>
<b>Slika 27: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 2)</b>	<b>51</b>
<b>Slika 28: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 2)</b>	<b>52</b>
<b>Slika 29: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 2)</b>	<b>52</b>





<b>Slika 30: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 2)</b>	<b>53</b>
<b>Slika 31: Predpostavljena poljubna porušna ploskev</b>	<b>53</b>
<b>Slika 32: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 3)</b>	<b>54</b>
<b>Slika 33: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 3)</b>	<b>55</b>
<b>Slika 34: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 3)</b>	<b>55</b>
<b>Slika 35: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 3)</b>	<b>56</b>
<b>Slika 36: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 3)</b>	<b>56</b>
<b>Slika 37: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 4)</b>	<b>58</b>
<b>Slika 38: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 4)</b>	<b>58</b>
<b>Slika 39: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 4)</b>	<b>59</b>
<b>Slika 40: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 4)</b>	<b>59</b>
<b>Slika 41: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 4)</b>	<b>60</b>
<b>Slika 42: Karakteristični profil P154 + 0.00</b>	<b>61</b>
<b>Slika 43: Karakteristični profil P154 + 5.00</b>	<b>62</b>
<b>Slika 44: Karakteristični profil P154 + 10.00</b>	<b>62</b>
<b>Slika 45: Karakteristični profil P154 + 15.00</b>	<b>62</b>
<b>Slika 46: Karakteristični profil P155 + 0.00</b>	<b>64</b>
<b>Slika 47: Karakteristični profil P155 + 5.00</b>	<b>65</b>
<b>Slika 48: Karakteristični profil P155 + 10.00</b>	<b>65</b>
<b>Slika 49: Karakteristični profil P155 + 15.00</b>	<b>65</b>
<b>Slika 50: Karakteristični profil P156 + 0.00</b>	<b>66</b>
<b>Slika 51: Karakteristični profil P156 + 5.00</b>	<b>66</b>
<b>Slika 52: Karakteristični profil P156 + 10.00</b>	<b>66</b>
<b>Slika 53: Karakteristični profil P156 + 15.00</b>	<b>67</b>
<b>Slika 54: Prvotna kritična drsna ploskev (M. Macstars 2000)</b>	<b>69</b>
<b>Slika 55: Kritična drsna ploskev (Slide)</b>	<b>69</b>
<b>Slika 56: Popravljen kritična drsna ploskev (M. Macstars 2000)</b>	<b>70</b>
<b>Slika 57: Izračun za nasip iz armirane zemljine (M. Macstars 2000)</b>	<b>71</b>



## 1 UVOD

Ljudje se že dolgo poslužujejo različnih načinov in materialov pri reševanju problemov nestabilnosti. Tehnološki razvoj pa je ponudil številne nove rešitve, ki omogočajo izvedbo tudi najzahtevnejših projektov. Vse to se odraža v razvoju in proizvodnji novih sintetičnih materialov, katerih glavna prednost v primerjavi z naravnimi materiali je predvsem večja odpornost na neugodne vplive iz okolja ter posledična večja trajnost. Njihova raznolikost pa odpira tudi številne nove možnosti glede področij in načinov uporabe. Prav tako so se poenostavili izračuni za kontrolo stabilnosti, saj uporaba računalnika pri računu stabilnosti prinaša večjo preglednost nad konkretnim problemom, omogoča večjo natančnost rezultatov in nenazadnje pomeni tudi velik prihranek časa, saj so numerične metode, ki se uporabljajo za račun stabilnosti, precej dolgotrajen in zahteven proces.

V diplomski nalogi so predstavljene numerične metode za račun stabilnosti brežin. Na osnovi teh metod so bili razviti številni računalniški programi, ki predstavljajo pomoč oziroma so glavno orodje za oceno stabilnosti. Z nekaterimi računalniškimi programi sem se tekom nastajanja diplomske naloge tudi spoznala in so omenjeni v nadaljevanju.

Kljub temu, da so geosintetiki relativno mladi materiali, so njihove lastnosti dobro poznane, kar omogoča dobro preglednost nad možnimi področji njihove uporabe. V diplomski nalogi so predstavljene vrste geosintetikov, njihove funkcije ter glavna vprašanja povezana z njihovo trajnostjo in degradacijo, saj to predstavlja enega od poglobitvenih problemov, ki se lahko pojavi pri uporabi geosintetikov. Ker diplomska naloga obravnava problem stabilnosti brežin, je ločeno poglavje namenjeno ojačitvenim geosintetikom, ki se uporabljajo za stabilizacijo brežin in nasipov.

Analize stabilnosti, ki so bile narejene za primer varovalnega nasipa zahodnega portala predora Markovec, združujejo teoretske osnove, ki so opisane v diplomski nalogi. Pri izračunu stabilnosti so bili uporabljeni računalniški programi, ki so zasnovani na podlagi opisanih numeričnih metod, stabilizacijski ukrepi pa so bili izvedeni z uporabo ustreznih geosintetikov. V 4. poglavju je opisano kako so potekali izračuni, ki so pripeljali do končne rešitve v omenjenem primeru.

Nenazadnje pa danes velja, da rešitve stabilizacijskih problemov, kot je bila rešitev, uporabljena v primeru zahodnega portala predora Markovec, predstavljajo veliko bolj okolju prijazen ukrep od večine klasičnih ukrepov. Geosintetiki, kot sodobni materiali namreč v kombinaciji s sodobnimi koncepti izračunov pri iskanju novih inženirskih rešitev veliko lažje sledijo in upoštevajo vedno bolj stroge okoljske zahteve in normative glede posegov v naravo.

## 2 STABILNOST BREŽIN IN NASIPOV

### 2.1 Uvod

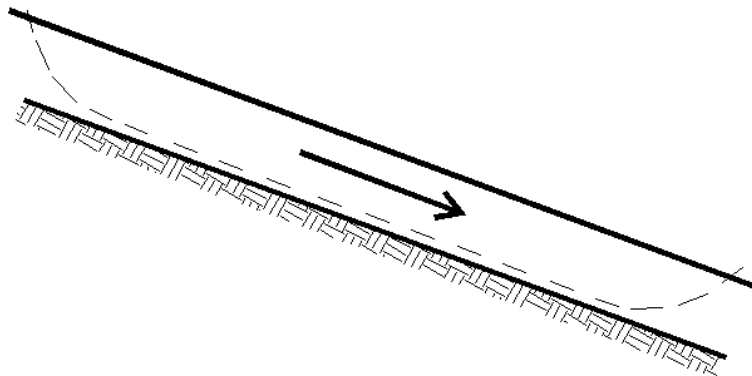
Kadar površina tal ni ravna, se pojavlja komponenta sile gravitacije, ki želi premakniti maso tal pod njo. Ker pa so zunanje obremenitve v primerjavi z maso tal majhne, je gravitacijska sila tista, ki predstavlja glavni del obremenitev. Če se vzdolž potencialne drsne ploskve pojavijo strižne napetosti, ki so enake strižni trdnosti, lahko pride do strižnega loma tal in s tem do velikih pomikov mase tal nad drsno ploskvijo ali celo do porušitve brežine. Problem nestabilnosti brežin se namreč lahko pojavi na predhodno stabilnih ali pogojno stabilnih pobočjih (plaziščih), kjer se z različnimi gradbenimi posegi poruši njihovo naravno ravnovesje in s tem poveča možnost porušitve. Posledice pa so neugodne zaradi nastale gmotne škode ali celo katastrofalne zaradi morebitne izgube človeških življenj. Zato problem stabilnosti naravnih pobočij lahko močno vpliva na projektiranje in pogoje gradnje.

Glavni vzroki za nestabilnost brežin so:

- preveliki nakloni zemeljskih mas glede na karakteristike materiala, kar pomeni, da material nima dovolj trdnosti, da bi se ohranilo ravnotežje pri dani geometriji preseka,
- veliki porni pritiski (imajo lahko odločujoč vpliv na stabilnost mase tal),
- na maso tal so ali bodo delovali neugodni zunanji vplivi kot so velike zunanje obremenitve (npr. prometne), seizmične sile ali obremenitve sosednjih objektov.

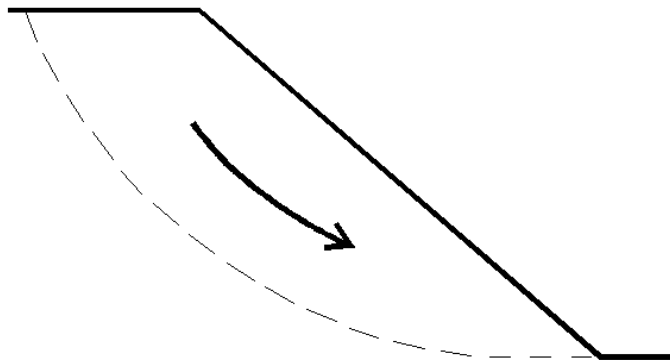
Obravnavanje stabilnosti brežin je pravzaprav obravnavanje problema nestabilnosti, kar se lahko opiše kot plazenje po eni ali več drsni ploskvi, kjer se masa tal premika kot celota ali pa kot večje število posameznih delov le-te. Tako definirani problemi se rešujejo z metodo mejnega ravnovesja. Oblike drsenja mase tal pa se lahko razdelijo na 3 osnovne tipe:

- ravne drsne ploskve, ki se najpogosteje pojavijo, ko se na neki globini nahaja sloj zemljine manjše trdnosti, vzporeden z nagibom površine terena ali pa se pojavijo na meji med primarno kamnino in zemeljskim materialom nad njo; mehanizem pomikov ravnih drsni ploskev je enostavna translacija,



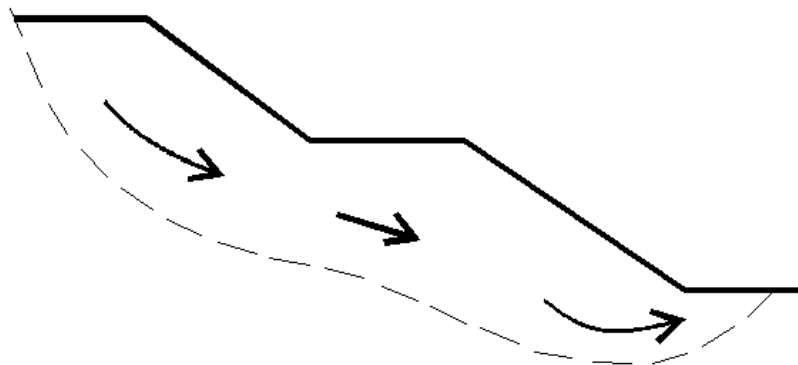
Slika 1: Primer ravne drsne ploskve

- krožno- cilindrične drsne ploskve so značilne za homogena tla; pomiki mase tal se zgodijo v obliki školjkastega loma, ki ima v vertikalnem preseku približno elipsoidno obliko; znotraj rotirajočega telesa se formirajo relativno majhne distorzijske deformacije,



Slika 2: Primer krožne drsne ploskve

- kompleksne drsne ploskve nepravilnih oblik se ponavadi pojavijo v nehomogenih tleh, v homogenih tleh se pojavijo, če pride tam do nenadne, skokovite spremembe nagiba terena; mehanizem pomikov drsnega telesa znatno odstopa od mehanizma enostavne translacije ali čiste rotacije.



Slika 3 : Primer drsne ploskve nepravilne oblike

Poleg navedenih, se na naravnih pobočjih seveda lahko pojavijo tudi druge oblike nestabilnosti. To so lahko tečenje sipkih nevezanih materialov ob ali brez prisotnosti podzemne vode in pomiki večjih količin zemeljskega materiala, ki jih povzročijo intenzivne padavine oziroma poplave. Te oblike pomikov- tečenje materiala, se obravnava z metodologijo mehanike tekočin.

Nestabilnost zemeljskih mas se pojavlja v velikem številu različnih oblik. Možnost predvidevanja teh pojavov, hitrost in obseg pomikov ni enostavna in enolična. Zato so številni avtorji podali različne oblike klasifikacij za nestabilnost zemeljskih mas. Praktično nemogoče pa je, da bi se vse klasifikacije poenotile in bi se določila povsem enotna klasifikacija.

Poleg oblike porušitev se ločijo tudi različni načini porušitev. Nekatere poružitve se dogajajo izredno hitro v navidez stabilnih brežinah, brez predhodnih znakov, medtem ko se lahko v drugem primeru nestabilnosti odvijajo zelo počasi, v več fazah. Faze nestabilnosti se v splošnem delijo na:

- stabilna brežina; pomikov v preteklosti ni bilo, niti jih ni zdaj,
- potencialno nestabilna brežina; pomiki so se v preteklosti dogajali, vendar jih trenutno ni, lahko pa jih ponovno sprožijo nepremišljeni človekovi posegi,
- zgodnja faza porušitve; pojavi drsenja, možne so vzdolžne razpoke na površini terena, stanje lahko traja leta in celo stoletja,

- srednja faza porušitve; postopen pojav razpok in lokalnih porušitev po krožno- cilindrični ploskvi, globina razpok se poveča, hitrost pomikov v deževnem obdobju se poveča (v suhih razmerah se upočasnijo),
- delna ali popolna porušitev; večja masa tal ali del nestabilne mase se pomakne v nov položaj,
- popolna porušitev; celotna nestabilna masa se pomakne v nov, končni položaj.

## 2.2 Metode mejnih ravnovesij

### 2.2.1 Uvod

Analiza stabilnosti brežin je podobna analizi stabilnosti podpornih konstrukcij, vendar med analizama obstaja nekaj bistvenih razlik. Pri določanju pritiskov na podporno konstrukcijo se predpostavi, da se strižna trdnost zasipa za podporno konstrukcijo mobilizira v polni meri in podpora konstrukcija prispeva dodatno odpornost, potrebno za skupno stabilnost. Za brežine pa velja, da se celotna odpornost ustvari znotraj same mase tal z mobilizacijo le določenega dela ali pa celotne razpoložljive strižne trdnosti. Analiza stabilnosti zemeljskih mas se prevede na odnos med razpoložljivo strižno trdnostjo in povprečno strižno napetostjo oziroma mobilizirano strižno trdnostjo, ki je potrebna za ohranjanje ravnotežja. Razmerje teh količin je prvi opisal Bishop (Bishop 1955) in ga poimenoval faktor varnosti. Definiran je kot:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (1)$$

oz.

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{FS} \quad (2)$$

Kjer je:

FS ... faktor varnosti,

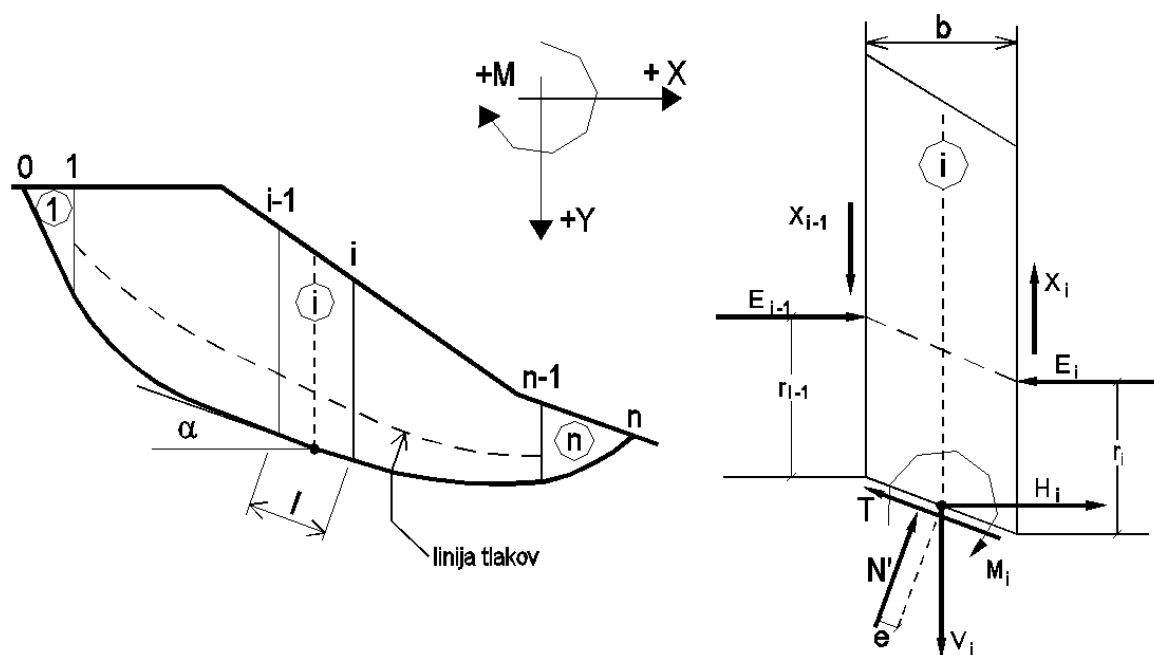
$\tau_f$  ... strižna trdnost tal,

$\tau_m$  ... mobilizirana strižna trdnost.



Faktor varnosti FS je v metodah mejnih ravnovesij v mehaniki tal definiran kot konstantna količina vzdolž celotne drsne ploskve, pri čemer je potrebno v naprej določiti možne mehanizme porušitve in drsno telo, omejeno z drsno ploskvijo, za katero se dobi merodajno najmanjšo vrednost faktorja varnosti FS. Metode za izračun faktorja varnosti FS pa so različno natančne. Delijo se na točne in približne. Točne metode zadoščajo vsem pogojem ravnotežja z vpeljavo različnih predpostavk, brez zanemarjanja posameznih komponent zunanjih in notranjih sil, približne metode pa določene komponente in/ali ravnotežne pogoje zanemarijo.

Med obstoječimi metodami za račun mejnega ravnovesja v ravnini ločimo med resultantnimi in lamelnimi metodami. Najugodnejše za računalniško programiranje in reševanje problema stabilnosti so lamelne metode, ki se poslužujejo delitve drsnega telesa na lamele. Presek drsnega telesa se razdeli na  $n$  lamel, ki da  $(n-1)$  medlamelnih presekov.



Slika 4: Sile v karakteristični lameli

Sile, ki nastopajo v posameznih lamelah, so:

$N'$  ... normalne efektivne sile v lameli,

T ... strižne sile v lameli,

E ... velikost normalnih komponent medlamelnih sil,

X ... velikost strižnih komponent medlamelnih sil,

ter

e ... ekscentričnost normalnih sil v lameli,

r ... položaj normalnih komponent medlamelnih sil.

Upoštevajoč izraz (2) ter ob predpostavki, da je zveza med strižno trdnostjo in efektivno normalno napetostjo linearna, sledi izraz:

$$T = \frac{(N' \tan \varphi' + c'l)}{FS} \quad (3)$$

oz.

$$FS = \frac{(N' \tan \varphi' + c'l)}{T} \quad (4)$$

Razpoložljive enačbe za n- lamel:

▪ Ravnovesne enačbe:

- $\Sigma X = 0$  n
- $\Sigma Y = 0$  n
- $\Sigma M = 0$  n

▪ Pogoj porušitve:

- $T = (N' \tan \varphi' + c'l)$  n

4n enačb

Število neznank za n- lamel:

- N' n
- T n
- r n-1
- E n-1

- X n-1
- e n
- FS 1

$$(6n - 3 + 1) = (6n - 2) \text{ neznank}$$

Torej, iz ravnotežnih pogojev za vsako lamelo in zveze med strižno in normalno silo sledi, da je na voljo  $4n$  enačb ter  $(6n - 2)$  neznank, kar pomeni, da je število neznank za  $(2n - 2)$  večje od števila razpoložljivih enačb in je zato sistem statično nedoločen. Da postane rešljiv, se uvedejo določene dodatne predpostavke, ki dajo približne rešitve sistema. Zato je vedno potrebno preveriti smiselnost dobljenih rezultatov.

Glede na to, katere predpostavke so bile uvedene v izračun, se med seboj razlikujejo različne numerične metode. Najbolj znane so:

- Fellenius (1922),
- Janbu (1957),
- Bishop (1955),
- Morgenstern- Price (1965).

Za nekatere posebne primere pa predpostavke niso potrebne. Če je telo na primer sestavljeno iz ene same lamele, je število neznanh količin enako številu razpoložljivih enačb, saj ni medlamelnih sil in sistem je rešljiv brez dodatnih predpostavk.

Razpoložljive enačbe za 1 lamelo:

- Ravnovesne enačbe:
  - $\Sigma X = 0$  1
  - $\Sigma Y = 0$  1
  - $\Sigma M = 0$  1
- Pogoj porušitve:
  - $T = (N' \tan \varphi' + c'l)$  1

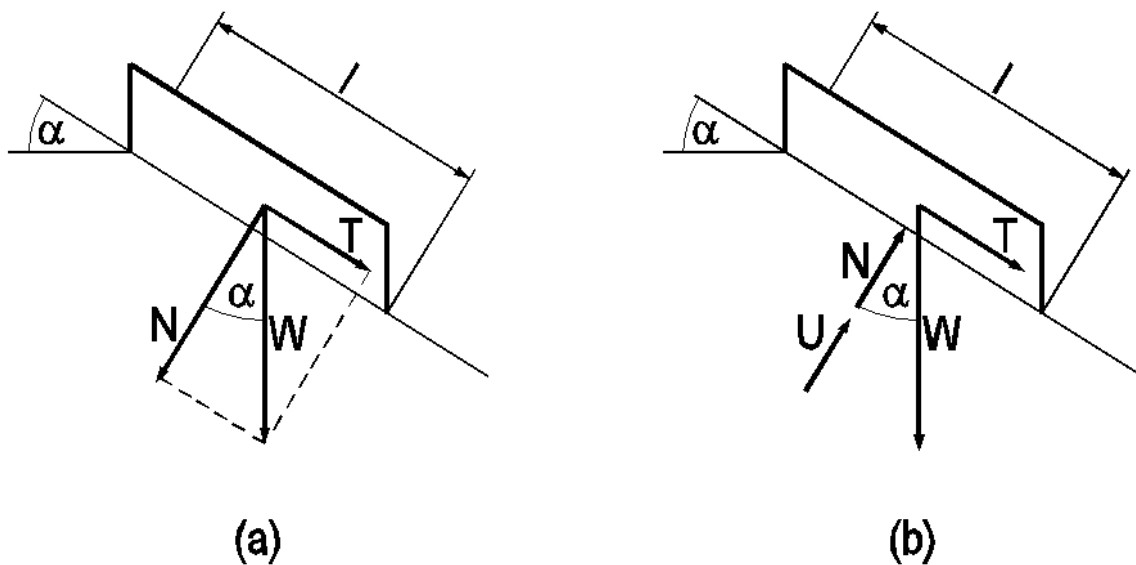
4 enačbe

Število neznank za 1 lamelo:

▪ N'	1
▪ T	1
▪ r	0
▪ E	0
▪ X	0
▪ e	1
▪ FS	1

4 neznanke

Tak primer predstavlja blok na poševni ravnini.



Slika 5: Blok na poševni ravnini

Za enostaven primer brez kohezije in pornih pritiskov (Slika 5a), kjer je trenje opisano s kotom  $\varphi$  in sta maksimalni strižni odpor  $S=N \tan \varphi$  ter strižna sila  $T=W \sin \alpha$ , iz izraza (4) sledi:

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{N \tan \varphi}{W \sin \alpha} = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (5)$$

V primeru prisotnosti pornih tlakov  $u$  (Slika 5b), katerih rezultanta je  $U = u l$  in kohezije  $c$ , je normalna sila:

$$N' = N - U = W \cos \alpha - ul \quad (6)$$

Razpoložljivi odpor je:

$$S = (W \cos \alpha - ul) \tan \varphi' + c'l \quad (7)$$

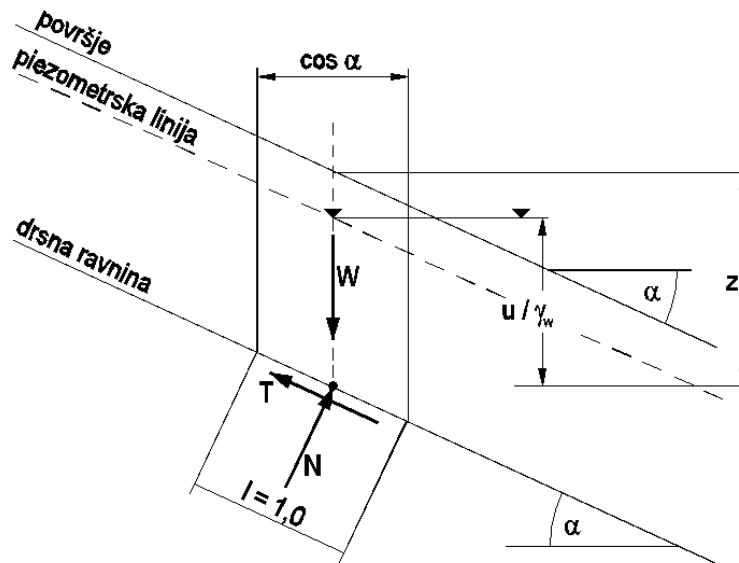
Sledi izraz:

$$FS = \frac{(W \cos \alpha - ul) \tan \varphi' + c'l}{W \sin \alpha} \quad (8)$$

Mejna vrednost faktorja varnosti je  $FS = 1$ . To je vrednost, pri kateri se blok začne premikati. Čeprav na prvi pogled izgleda, da opis mase tal z blokom na poševni ravnini ne predstavlja najboljše aproksimacije splošnega primera, se izkaže, da se lahko tudi primer telesa na poljubni drsni ploskvi preslika na ekvivalenten blok na poševni ravnini. Neposredno iz te aproksimacije pa izhajajo tudi rešitve za ravne drsne ploskve.

### 2.2.2 Ravne drsne ploskve

Ravne drsne ploskve, ki so relativno plitke v primerjavi z dolžino drsnega telesa in so vzporedne nagnjeni površini terena, se lahko obravnavajo kot brezkončne in se zato vplivi na koncih lahko zanemarijo. Obe komponenti medlamelnih sil v navpičnih prerezih sta konstantni vzdolž celotnega drsnega telesa, zato je razlika medlamelnih sil enaka nič in se le-te ne pojavljajo v ravnotežnih pogojih, kar problem ravnotežnih pogojev pretvori v že omenjene ravnotežne pogoje ekvivalentnega bloka na poševni ravnini.



Slika 6: Ravna drsna ploskev

Za lamelo dolžine  $l = 1,0$ , širine  $\cos \alpha$  in teže  $W = \gamma z \cos \alpha$ , je totalna normalna sila:

$$N = \sigma_N = W \cos \alpha = \gamma z \cos^2 \alpha \quad (9)$$

Maksimalna razpoložljiva sila strižnega odpora v lameli je enaka strižni trdnosti vzdolž drsne ploskve:

$$\tau_f = c' + (\sigma_N - u) \tan \varphi' = c' + (\gamma z \cos^2 \alpha - u) \tan \varphi' \quad (10)$$

Strižna sila v lameli, potrebna da lamela ostane v ravnotežju, je enaka mobilizirani strižni trdnosti vzdolž drsne ploskve:

$$\tau_m = W \sin \alpha = \gamma z \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad (11)$$

Če se izraza (10) in (11) upošteva v izrazu (1), se izraz za faktor varnosti FS za brezkrajna pobočja napiše v obliki:

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \alpha - u) \tan \varphi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (12)$$

Zgornji izraz predstavlja splošno rešitev za ravne drsne ploskve, ki upošteva kohezijo, drsni kot in prisotnost vode. Iz izraza je možna izpeljava nekaterih posebnih primerov. Za primer,

ko je kohezija  $c'=0$  ali je razmerje  $c' / (\gamma_z)$  zanemarljive velikosti in je filtracija podzemne vode vzporedna brežini in drsni ploskvi, je velikost pornega pritiska:

$$u = m z \gamma_w \cos^2 \alpha \quad (13)$$

in

$$FS = \left(1 - m \frac{\gamma_w}{\gamma_z}\right) \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (14)$$

V izrazu za faktor varnosti FS je zaradi poenostavitve zanemarljena eventualna razlika med težama tal nad in pod nivojem vode. Za drobnozrnate materiale je razlika v vsakem primeru zanemarljiva, saj pride zaradi kapilarnega dviga do zasičenja materiala z vodo tudi nad njenim nivojem. V kolikor je nivo vode na površju in je s površjem vzporeden, potem je  $m = 1$  in izraz (14) se napiše v obliki:

$$FS = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_z}\right) \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (15)$$

Da se poenostavi zapis izraza (12), se vpelje koeficient pornega pritiska  $r_u$ , ki predstavlja razmerje med velikostjo pornega pritiska in totalno vertikalno napetostjo v posamezni točki.

$$r_u = \frac{u}{\gamma z} = \frac{u b}{W} \quad (16)$$

Ob predpostavki, da je kohezija  $c'=0$ , se izraz (12) zapiše v obliki:

$$FS = \left(1 - \frac{r_u}{\cos^2 \alpha}\right) \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (17)$$

Iz izraza (17) je razvidno, da je zveza med koeficientom pornega pritiska  $r_u$  in faktorjem varnosti FS linearna. Če je porni pritisk enak nič, tj.  $r_u=0$ , izraz za faktor varnosti FS postane enak izrazu (5) za blok na poševni ravnini.

Za poseben primer, ko je smer filtracije horizontalna, je koeficient pornega pritiska:

$$r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma_z} \quad (18)$$

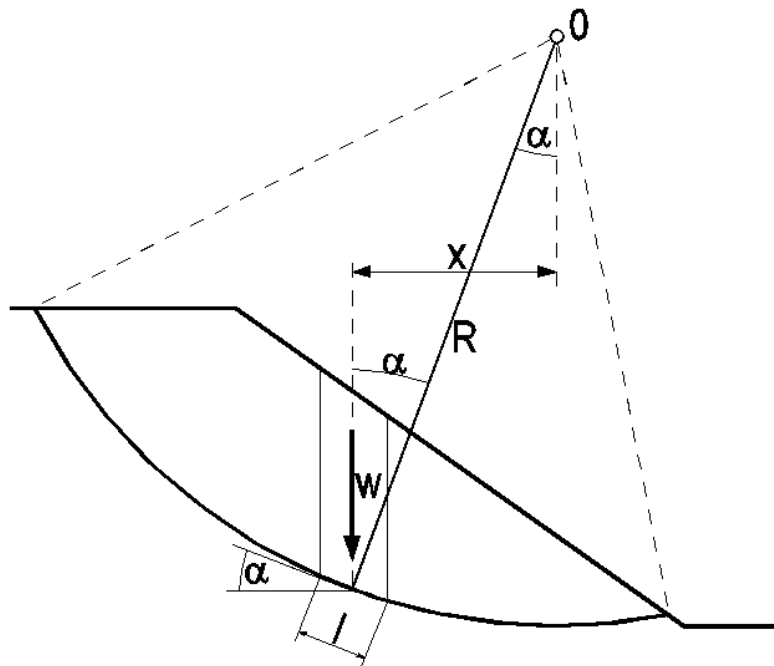
Faktor varnosti FS je tedaj:

$$FS = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_z} \frac{1}{\cos^2 \alpha}\right) \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (19)$$

Poudariti je potrebno, da imajo izrazi (12), (14), (15), (17) kljub temu, da so povsem preprosti, relativno veliko natančnost, v kolikor so izpolnjeni pogoji, za katere so napisani. Ti pogoji so, da je drsno telo plitko ter vzporedno nagnjeni površini terena in da so brežine iz nevezanega zrnatega materiala. V danih izrazih faktor varnosti FS ni odvisen niti od globine drsne površine, niti od višine brežine ali normalnih napetosti, saj je predpostavljeno, da kot strižne odpornosti za efektivne napetosti ni odvisen od velikosti napetosti.

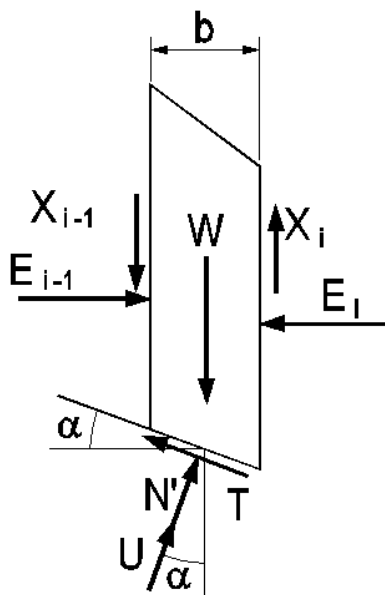
### 2.2.3 Krožno- cilindrične drsne ploskve

Krožno- cilindrične drsne ploskve s homogenim ali nehomogenim presekom tal se običajno analizirajo z lamelnimi metodami. Presek krožno- cilindrične ploskve se z navpičnimi preseki razdeli na posamezne lamele širine  $b$  tako, da je dolžina osnovne lamele  $l$ . Predpostavi se, da so lamele dovolj ozke, da se lok osnovne lamele lahko zamenja s tetivo. Zunanji vplivi na vsako lamelo se nadomestijo z ustreznimi silami.



Slika 7: Krožno- cilindrična drsna ploskev





Slika 8: Sile v lameli

Mobilizirana strižna trdnost  $\tau_m$  je celotna razpoložljiva strižna trdnost  $\tau_f$ , reducirana za faktor varnosti FS:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{FS} = \frac{1}{F} [c' + (\sigma_N - u) \tan \varphi'] \quad (20)$$

Strižna sila T v posamezni lameli je:

$$T = \tau_m l = \frac{1}{FS} [c' l + (N - u l) \tan \varphi'] \quad (21)$$

N je totalna normalna sila v posamezni lameli.

Prvi pogoj ravnovesja je ravnotežni pogoj vsote momentov  $\sum M$  po lamelah, glede na središče kroga 0. Napiše se v obliki:

$$\sum W x = \sum T R = \frac{R}{FS} \sum [c' l + (N - u l) \tan \varphi'] \quad (22)$$

Izraz za faktor varnosti FS ima obliko:

$$FS = \frac{R \sum [c' l + (N - u l) \tan \varphi']}{\sum W x} \quad (23)$$

Totalna normalna sila N je neznana količina, ki se izračuna iz izraza:

$$N = (W + X_{i-1} - X_i) \cos \alpha - (E_{i-1} - E_i) \sin \alpha \quad (24)$$

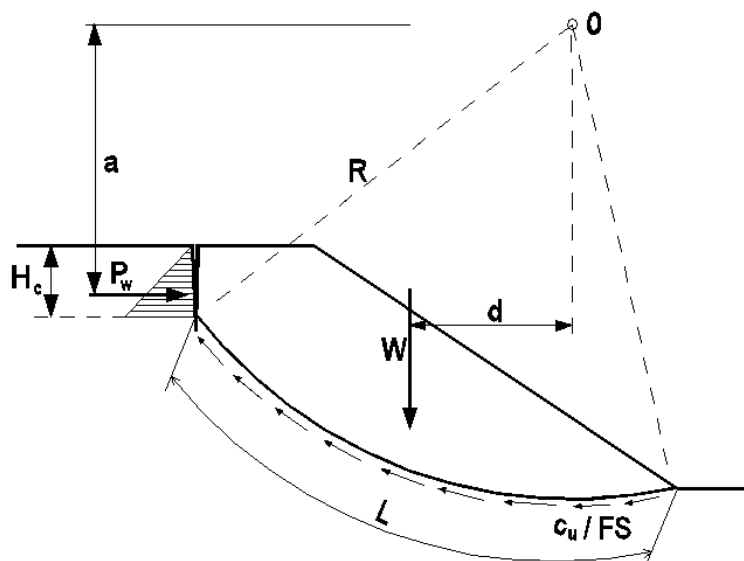
Z upoštevanjem predpostavk  $\Delta X = X_{i-1} - X_i = 0$  in  $\Delta E = E_{i-1} - E_i = 0$ , dobi izraz (24) obliko:

$$N = W \cos \alpha \quad (25)$$

Vrednost  $x$ -a se izračuna iz izraza  $x = R \sin \alpha$ . Izraz za faktor varnosti dobi obliko:

$$FS = \frac{\sum [c' l + (W \cos \alpha - u l) \tan \varphi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (26)$$

Opisani postopek za izračun faktorja varnosti se imenuje metoda Fellenius-a ali tudi "Švedska metoda" in je zasnovana tako, da zanemari oba ravnotežna pogoja za sile in upošteva samo momentni ravnotežni pogoj. V preteklosti je bila precej priljubljena, predvsem zaradi konzervativnih rezultatov, ki jih je dala. S tem je bil račun gotovo na varni strani, danes pa se za reševanje resnejših problemov v praksi ne uporablja več, saj je napaka dobljenih rezultatov v primerjavi s točnimi metodami lahko tudi več kot 50%. Omenjena metoda da ustrezne rezultate samo v primeru analize stabilnosti z vodo zasičenih drobnozrnatih tal v nedreniranih pogojih. V nedreniranih pogojih je strižna trdnost namreč praktično konstantna ter ni odvisna od normalnih napetosti in medlamelnih sil in za rešitev niso potrebne dodatne predpostavke, ki bi zmanjšale natančnost rezultata.



Slika 9: Krožna drsina v zasičeni drobnozrnatih zemljini

Če se torej v izraz (23) vpelje namesto kohezije  $c'$  nedrenirana strižna trdnost  $c_u$  in velja

$\phi' = \phi_u = 0$ , je dobljeni izraz za faktor varnosti FS osnovna enačba tako imenovane "  $\phi_u = 0$  metode":

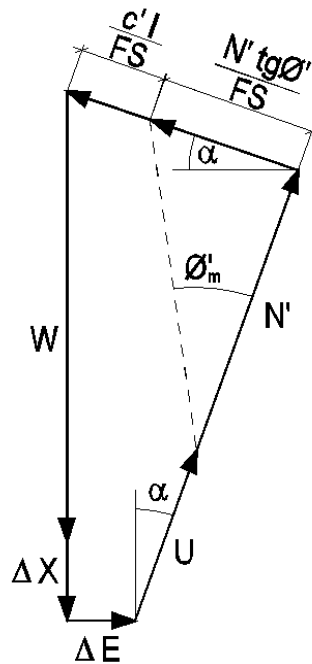
$$FS = \frac{\sum c_u l R}{\sum W \sin \alpha} = \frac{R \sum c_u l}{\sum W x} \quad (27)$$

Če pa velja še, da je nedrenirana strižna trdnost konstantna po celotnem preseku in se v zgornjem delu drsine pojavi vertikalna razpoka, napolnjena z vodo (Slika 9), se faktor varnosti FS napiše v obliki:

$$FS = \frac{c_u l R}{W d + P_w a} \quad (28)$$

Iz izraza (28) je razvidno, da se v imenovalcu pojavijo momenti zunanjih obremenitev, v števcu pa je samo moment nedrenirane strižne trdnosti. Izraz predstavlja točno rešitev, saj niso potrebne dodatne predpostavke glede notranjih sil in normalnih napetosti, saj je strižna trdnost v lameli konstantna in s tem neodvisna od normalnih napetosti in tudi od razporeditve medlamelnih sil.

V kolikor je strižna trdnost odvisna od trenja, je za račun normalnih napetosti pomembna velikost in lega medlamelnih sil. Ta problem je rešil Bishop. Osnova mu je bila metoda Fellenius- a. V račun je vpeljal komponente medlamelnih sil in tako upošteval njihov vpliv na efektivne normalne napetosti ter znatno izboljšal metode za račun krožno- cilindričnih drsnih ploskev.



Slika 10: Sile, ki delujejo na lamelo

Ob upoštevanju sil, ki delujejo na lamelo (Slika 10), dobi izraz za izračun efektivnih normalnih sil  $N'$  obliko:

$$N' = \frac{W + X_{i-1} - X_i - u l \cos \alpha - c' l \sin \alpha / FS}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi' / FS} \quad (29)$$

Izraz za faktor varnosti FS dobi obliko:

$$FS = \frac{\sum [c' b + (W + X_{i-1} - X_i - u b) \tan \varphi'] \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi' / FS}}{\sum W \sin \alpha} \quad (30)$$

Zaradi lažjega zapisa se uvede oznako  $m_\alpha$ :

$$m_\alpha = \frac{\frac{1}{\cos \alpha}}{1 + \tan \alpha \tan \varphi' / FS} = \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi' / FS} \quad (31)$$

Ob upoštevanju poenostavitve, da je  $X_i = 0$  v vsaki lameli in je torej  $\Delta X = 0$ , ostane edina neznana količina faktor varnosti FS. Nahaja se na obeh straneh izraza, zato se njegovo vrednost izračuna z iterativnim postopkom.

Numerični testi so pokazali, da se natančnost rezultatov z upoštevanjem strižnih komponent medlamelnih sil ne spremeni bistveno, zato Bishop predlaga uporabo ti. "rutinske metode", pri kateri se v izrazu (30) zanemari razlika vertikalnih komponent medlamelnih sil in izraz dobi obliko:

$$FS = \frac{\sum [c' b + (W - u b) \tan \varphi'] m_{\alpha}}{\sum W \sin \alpha} \quad (32)$$

#### 2.2.4 Poljubne drsne ploskve

Poljubne drsne ploskve so poseben primer krožno- cilindričnih drsnih ploskev. V okvirih lamelnih metod je mogoče na ustrezen način modelirati drsine poljubnih oblik tako, da se zadosti vsem trem ravnotežnim pogojem ( $\sum X = 0$ ,  $\sum Y = 0$ ,  $\sum M = 0$ ). Uvedejo pa se določene predpostavke, ki omogočijo, da sicer statično nedoločen sistem postane rešljiv. Relativno enostavno rešitev, ki je analogna Bishop-ovi metodi za krožno- cilindrične ploskve, je podal Janbu (Janbu 1954), vendar je namesto ravnotežja momentov kot drugi pogoj uporabil ravnotežje sil v horizontalni smeri. V metodi sta uporabljena le dva ravnotežna pogoja, zanemarjene so strižne komponente medlamelnih sil.

Začetna oblika Janbu- jevega izraza je:

$$F_0 = \frac{\sum [c' b + (W - ub) \tan \varphi'] n_{\alpha}}{\sum W \tan \alpha} \quad (33)$$

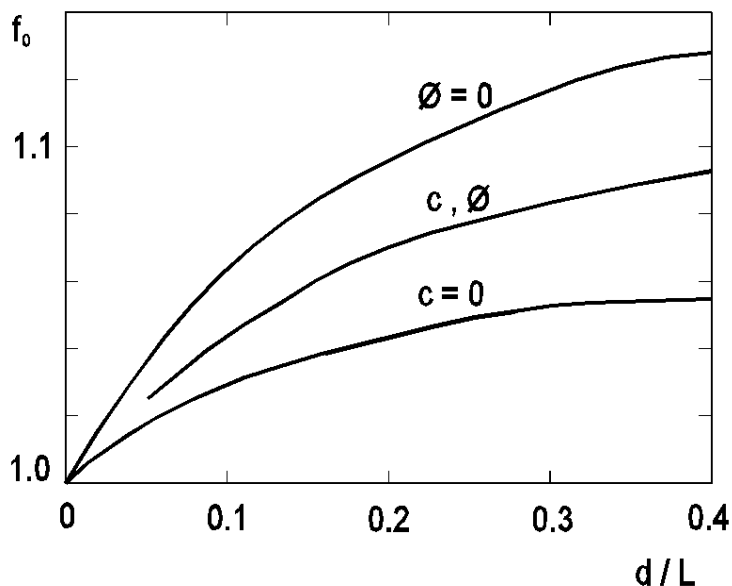
kjer je

$$n_{\alpha} = \frac{1}{1 + \tan \alpha \tan \varphi / F_0} \quad (34)$$

$F_0$  predstavlja nekorigiran faktor varnosti in je neznanka, ki se pojavi na obeh straneh enačbe, zato se metoda (podobno kot tudi Bishop- ova metoda) rešuje z iterativnim postopkom. Zaradi pomanjkanja primerjav s točnejšimi metodami je bila kmalu po objavi na podlagi primerjalnih izračunov stabilnosti homogenih presekov podana empirična korekcija rezultatov metode, ki se izvede po zaključku iteracije:

$$FS = f_0 F_0 \quad (35)$$

$f_0$  je korekcijski faktor, ki se odčita iz diagrama in je odvisen od strižnih parametrov in razmerja med globino in dolžino drsine.



Slika 11: Korekcija za metodo "Janbu- I "

Metoda je zaradi relativne enostavnosti (za račun ni potreben računalnik) dokaj priljubljena, vendar pa je potrebna določena stopnja pozornosti, saj da zadovoljive rezultate le za relativno plitke, homogene in dolge drsine. Tudi sam avtor metodo priporoča le, če ni na voljo sodobnih računskih sredstev oz. postopkov za računanje. Imenuje se "Metoda Janbu- I ".

Zavedajoč se njenih slabosti, je Janbu (Janbu 1973) metodo razvil dalje ter objavil splošnejši postopek, ki problem statične nedoločenosti sistema rešuje tako, da podaja položaj prijema sil totalnih medlamelnih sil. Postopek je za "peš račun" precej kompliciran, izkazalo pa se je, da je neugoden tudi pri uporabi računalnika, kjer se pojavijo problemi pri iteracijskem postopku in konvergenci k pravi vrednosti faktorja varnosti FS, kar je eden glavnih razlogov za redko uporabo te metode. Metoda se imenuje "Metoda Janbu- II ".

Morgenstern in Price (Morgenstern- Price 1965) sta predlagala metodo, po kateri se drsna površina razdeli vertikalno na manjše bloke, ki pa so širši od lamel. Za vsak blok se napiše tri ravnotežne pogoje v obliki diferencialnih enačb. Glavna predpostavka metode je definiranje odnosa med strižnimi in efektivnimi komponentami medlamelnih sil, ki ima obliko:

$$X = \lambda f(x) E' \quad (36)$$

kjer je  $\lambda$  konstanta, ki jo je potrebno določiti v postopku reševanja diferencialnih enačb ter  $f(x)$  poljubna funkcija razporeditve nagibov medlamelnih sil. Numerični postopek je relativno zapleten, račun pa dolg tudi pri uporabi najnovejše računalniške tehnologije. Večjih poenostavitev ne prinese niti delitev drsne površine na posamezne bloke, saj zaradi širine le-teh obremenitve delujejo ekscentrično. Nenazadnje pa se prerez v vsakem primeru razdeli na veliko število lamel, ki so še vedno dokaj ozke, da se zadovoljivo opiše oziroma definira poljubno ukrivljeno drsno ploskev.

Spencer (Spencer 1967) je uvedel predpostavko, da je razmerje med komponentami medlamelnih sil  $X_i/E_i$  konstantno, kar pomeni, da je nagib rezultante v vsakem preseku enak.

Ta metoda predstavlja poseben primer metode Morgenstern-a in Price-a, ob predpostavkah, da je lamela ozka in je  $f(x) = \text{konst.}$

Za vse omenjene metode je potrebno preveriti rezultate in oceniti ali so sploh fizikalno možni, preveriti pa je potrebno tudi razmerje strižnih in normalnih sil v prerezu, saj je v primeru, da je le- to prekoračeno, potrebno spremeniti predpostavke.

Splošna metoda za račun poljubnih drsnih ploskev je zasnovana na delitvi drsnega telesa na ozke lamele, uporabi totalnih medlamelnih sil  $E$  in uporabi oz. določitvi funkcije razporeditve nagibov medlamelnih sil. Izpolnjevati mora tudi vse tri ravnotežne pogoje. V primeru, ko je lamela dovolj ozka, se momenti na koncu vsake lamele lahko zanemarijo ( $e = 0$ ) in ravnotežni pogoji za vsako lamelo imajo obliko:

$$\sum X = 0: E_{i-1} - E_i + N'_i \sin \alpha_i - S_i \cos \alpha_i + H_i = 0 \quad (37)$$

$$\sum Y = 0: X_{i-1} - X_i - N'_i \cos \alpha_i - S_i \sin \alpha_i + V_i = 0 \quad (38)$$

$$\sum M = 0: E_{i-1} \left( r_{i-1} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \left( r_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - \frac{b_i}{2} (X_{i-1} + X_i) + M_i \quad (39)$$

Kjer so

$V_i$  ... vse vertikalne sile in vertikalne komponente sil, ki se pojavijo v lameli,

$H_i$  ... vse horizontalne sile in horizontalne komponente sil, ki se pojavijo v lameli,

$M_i$  ... momenti vseh poznanih sil v lameli.

Splošno se ravnotežni pogoj za momente napiše glede na poljubno točko v lameli. V zgornji ravnotežni enačbi pa so momenti napisani glede na središčno točko v dnu lamele, ker se s tem izniči vpliv sil  $N'$  in  $T$ .

Strižna sila v dnu lamele je:

$$S_i = N_i' \frac{\tan \varphi_i'}{FS} + \frac{b_i c_i'}{\cos \alpha_i FS} \quad (40)$$

in  $N'$  je:

$$N_i' = \frac{V_i + X_{i-1} - X_i - b_i c_i' \tan \alpha_i / FS}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i' / FS} \quad (41)$$

Parametra  $c'$  in  $\varphi'$  sta konstantni vrednosti (če gre za nelinearen kriterij porušitve, sta lahko tudi spremenljivi količini, odvisni od velikosti normalnih napetosti). Uporaba totalnih vrednosti medlamelnih sil namesto efektivnih bistveno poenostavi reševanje problema, saj se s to predpostavko zanemarijo pritiski vode oz. razporeditev le- teh, velikost njihove rezultante in moment, ki ga rezultanta povzroča na točko v dnu lamele. Rešitev se dobi z iteracijskim postopkom za  $2n$  neznank in prav toliko enačb. Izkušnje kažejo, da je metoda relativno hitra in ima stabilno konvergenco. Ob upoštevanju vseh ravnotežnih pogojev, brez zanemarjenja komponent notranjih sil, so rezultati sprejemljivo točni in enolični.

### 2.3 Določanje minimalnega faktorja varnosti

V analizi stabilnosti po metodi mejnih stanj se določajo potencialne drsne ploskve. Za vsako od drsni ploskev se izračunajo varnostni faktorji po zgoraj opisanih metodah. Kot merodajni faktor varnosti  $FS$  se smatra najmanjši izmed vseh določenih varnostnih faktorjev za vse izračunane potencialne drsine:

$$FS_{min} = \min\{FS_1, FS_2, FS_3, \dots, FS_n\}$$

Pobočje je stabilno v primeru, da ima vsaka potencialna drsna ploskev dovolj velik varnostni faktor.



Minimalni faktor stabilnosti za brežine znaša 1,25. Ta vrednost je določena v ustreznih predpisih. V Sloveniji je to evropski standard Evrokod 7, ki pokriva področje geotehničnega projektiranja.

Če je faktor varnosti FS večji od predpisane vrednosti, se pobočje smatra kot stabilno, če pa je manjši, to pomeni nesprejemljivo veliko verjetnost porušitve in potrebni so različni stabilizacijski ukrepi.

#### **2.4 Uporaba računalnika pri reševanju problemov stabilnosti**

Numerične metode za račun stabilnosti brežin zahtevajo obširne izračune, ki vzamejo veliko časa in dela. Za izračun so potrebne zahtevnejše matematične operacije, poleg tega je potrebno v primeru, da rezultati izračunov niso ustrezni, celoten postopek ponoviti od začetka. Večina primerov namreč ni takih, da bi jih bilo možno prevesti na enostaven mehanizem drsnega bloka na poševni ravnini, ki je opisan v poglavju 2.2. V preteklosti so sicer bile razvite določene rešitve v obliki tabel in diagramov, ki so bile dokaj enostavne in so poenostavile postopek izračuna, vendar pa je bila njihova pomankljivost v tem, da so bile omejene le na točno določene probleme.

Z razvojem računalnikov se je postopek izračuna bistveno poenostavil ter omogočil večjo natančnost rezultatov, predvsem pa je s pomočjo računalnika možno rešiti praktično vsak problem, ki se pojavi v praksi. Kljub vsemu pa je na tem mestu potrebno poudariti, da se napake v izračunih še vedno lahko pojavijo, zato je potrebno točnost oziroma smiselnost rezultatov vedno preveriti. Za pravilnost izvedenih izračunov je namreč vedno odgovoren uporabnik računalniških programov.

Danes je na trgu veliko računalniških programov za račun problemov stabilnosti. Na voljo so tako programi za profesionalno rabo (npr. Slide, Plaxis) kot tudi komercialni programi, ki so jih razvili različni proizvajalci (npr. Maccaferri Macstars 2000, Tenax Slope). Vendar pa slednji bolj kot ne služijo promociji lastnih proizvodov in niso primerni za resnejšo uporabo pri računu splošnih problemov stabilnosti.

Računalniški programi so pripravljene na osnovi različnih metod za račun stabilnosti. Konkretnije sem se spoznala s programoma Slide in Maccaferri Macstars 2000, ki računata po metodi mejnih ravnovesij in imata za osnovo numerične metode opisane v tem poglavju.

## 2.5 Ukrepi za stabilizacijo brežin

Pri iskanju ustreznih rešitev za stabilizacijo brežin je potrebno najprej poiskati glavne vzroke za njihovo nestabilnost. Določiti je potrebno ali je dovolj zgolj lokalna stabilizacija ali pa primer zahteva stabilizacijo v globalnem smislu. Prav tako na izbiro vpliva tudi sestava tal, prisotnost vode, lokacija drsne ploskve, razpoložljiv prostor za izvedbo želenega ukrepa ter okoljske zahteve. V odvisnosti od teh in ostalih dejavnikov se nato poišče najbolj primeren ukrep, ki ponuja predvsem varno in tudi ekonomično rešitev.

Ukrepi za stabilizacijo brežin so:

- sprememba geometrije preseka,
- dreniranje,
- podporne in oporne konstrukcije,
- izvedba bočnega nasipa ob centralnem nasipu,
- armiranje ali sidranje zemljine.

Možno je tudi kombiniranje zgoraj naštetih ukrepov.

### 3 GEOSINTETIKI

#### 3.1 Uvod

Geosintetiki so dokaj mladi materiali, katerih uporaba se je zadnjih 20 let močno povečala. Uporabni so praktično na vseh področjih, ki se ukvarjajo z zemeljskimi deli in problemom podzemne vode (geotehnika, gradnja cest, hidrotehnika, varovanje okolja,...).

Razlogov za to je veliko, tu je naštetih le nekaj najbolj očitnih:

- kontrolirana proizvodnja,
- enostavna vgradnja,
- uspešna zamenjava naravnih materialov, kjer se le-ti izkažejo za neustrezne,
- realizacija projektov, ki v danih pogojih oziroma razmerah niso izvedljivi,
- konkurenčna cena v primerjavi z naravnimi materiali,
- uspešno trženje in široka dostopnost na trgu.

Danes je več kot 95% geosintetikov narejenih iz sintetičnih polimerov. Le- te sestavljajo različni monomeri, ki s povezovanjem v verige različnih tipov in dolžin določajo karakteristike polimerov kot so:

- natezna trdnost,
- togost in trdota,
- odpornost na visoke temperature,
- kemična odpornost,
- raztezek oz. nateg pri porušitvi,
- odpornost proti mehanskim poškodbam,
- prepustnost.

Na zgoraj omenjene karakteristike pa vplivata še stopnja kristalizacije, ki je prisotna tudi v polimernih materialih in se veča z večanjem gostote polimerov in jih deli na amorfne in semiamorfne ter delitev polimerov na termoplastične ali termoreaktivne materiale (razlika med njimi je, da se termoplastični polimeri lahko večkrat segrejejo do točke mehčanja, na novo obdelajo oz. oblikujejo ter nato ohladijo, da se ohrani novo nastala oblika, termoreaktivnih polimerov pa se ne da ponovno toplotno obdelati, saj bi to povzročilo trajno degradacijo materiala).

Karakteristike polimerov pa so tiste, ki končno določajo tudi karakteristike geosintetikov, ki jih sestavljajo različni polimeri. Posledično pa tudi te karakteristike vplivajo na izbiro najprimernejših področij uporabe za posamezne geosintetike. Najpogostejši polimeri, ki sestavljajo geosintetike, so sledeči:

- polietilen (PE),
- polipropilen (PP),
- polivinil klorid (PVC),
- poliester (PET),
- poliamid (PA),
- polistiren (PS) .

Naslednja preglednica prikazuje katere polimere vsebujejo posamezni geosintetiki.

Preglednica 1: Polimeri, ki se nahajajo v posameznih geosintetiki

Polietilen	Geotekstili, geomembrane, armaturne geomreže, geomreže, geokompoziti
Polipropilen	Geotekstili, geomembrane, armaturne geomreže, geokompoziti
Polivinil klorid	Geomembrane, geokompoziti
Poliester	Geotekstili, armaturne geomreže
Poliamid	Geotekstili, armaturne geomreže, geokompoziti
Polistiren	Geokompoziti

Za identifikacijo polimerov je na voljo več načinov. Eden teh je identifikacija na podlagi obnašanja polimera med gorenjem, vendar pa ni najprimernejša, saj podaja dokaj subjektivno oceno. Primernejša in veliko bolj natančna ocena je na podlagi kemičnih testov. Ti testi so za analizo geosintetičnih materialov potrebni, ker:

- se uporabljajo pri zagotavljanju kakovosti in certificiranju,
- se uporabljajo za oceno življenjske dobe vzorcev na terenu,
- se uporabljajo v laboratorijskih preiskavah degradacijskih mehanizmov in napovedi življenjske dobe,
- prispevajo k analizi porušitev,
- prispevajo k raziskavam in razvoju novih dodatkov,
- uporabljajo se pri razvoju novih geotehničnih proizvodov.

Na koncu naj omenim še, da nobenega od geosintetikov ne sestavljajo zgolj polimerne smole, ampak le- te vsebujejo tudi različne dodatke. Njihova vsebnost je lahko od 3% do 65%. Ti dodatki so razni absorbenti UV svetlobe, antioksidanti, toplotni stabilizatorji, plastifikatorji, zaviralci ognja, biocidi, lubrikanti, idr. Nastale mešanice so lahko homogene ali heterogene, kar je odvisno od razmerja med polimerno smolo in dodatki, heterogene mešanice pa se dalje delijo še na zrnate in vlaknaste (odvisno od tega katere dodatke vsebujejo). Sestava se seveda razlikuje od produkta do produkta, vendar se lahko določi splošna formula, ki približno velja za vse polimere, iz katerih se proizvajajo geosintetiki. Dodatki seveda prispevajo k izboljšanju lastnosti materiala.

### **3.2 Vrste geosintetikov in njihove funkcije**

Geosintetiki se delijo na:

- geotekstile (GTX),
- geomreže (GNE),
- armaturne geomreže (GGR),

- geomembrane (GMB),
- geosatovja (GCE),
- geokompozite (GCO),
- bentonitne membrane (GCL).

Geotekstili so med najbolj razširjenimi skupinami geosintetikov. So tekstili v klasičnem pomenu besede, vendar narejeni iz sintetičnih vlaken, ki se tkejo ali samo mehansko spojijo v fleksibilen, porozen material ali pa se, vendar zelo redko, pletejo. V odvisnosti od fizikalnih in mehanskih lastnosti različnih tipov geosintetikov, se le-ti uporabljajo v različne namene.

Armaturne geomreže so plastične mreže z relativno velikimi odprtinami (10- 100 mm), ki so napete v eni ali obeh smereh (kar izboljša njihove fizikalne lastnosti) in opravljajo ojačitveno funkcijo.

Geomreže so podobne armaturnim geomrežam, vendar imajo manjše odprtine. Imajo izključno drenažno funkcijo.

Geomembrane so tanki materiali, debeline od 1- 25 mm. Njihova najpomembnejša lastnost je neprepustnost, bodisi za tekočine ali pline.

Geosatovja so HDPE<sup>(1)</sup> trakovi (širine 100 mm in debeline 1,2 mm), ki zvarjeni skupaj tvorijo tri- dimenzionalne celice, ki imajo značilno satasto obliko. Izboljšajo strižno trdnost zemljin in s tem njihovo nosilnost.

Bentonitne membrane so posebna skupina geosintetikov. So tanki sloji bentonitne gline, stisnjene med dva sloja geosintetika ali pa so povezane v geomembrane. Njihova prednost v primerjavi z geomembranami je, da so manj občutljive in lažje za vgradnjo.

Geokompoziti so kombinacija različnih geosintetikov (npr. geotekstil- geomreža, geotekstil- armaturna geomreža, armaturna geomreža- geomembrana,...) ali pa kombinacija geosintetikov in drugih materialov (npr. jekleni kabli, sidra,...). Njihova prednost je, da lahko opravljajo prav vse funkcije, ki so zahtevane od geosintetikov.

---

<sup>(1)</sup> HDPE... High Density Polyethylene (polietilen visoke gostote).

Geosintetiki, kot jih poznamo danes, so bili prvotno uporabljeni kot erozijska zaščita in alternativa zrnatim zemeljskim filtrom. Šele kasneje so prevzeli tudi ostale funkcije. Zato je bilo razvitih veliko tipov vlaken in načinov proizvodnje za splošno uporabo geosintetikov in za specifične aplikacije, kjer se le- ti uporabljajo. Pri tem velja velika pozornost tipu polimerov, tipu vlaken in načinu proizvodnje. Glede na to, kakšna bo vloga geosintetika v konstrukciji oz. upoštevajoč njegove mehanske in fizikalne lastnosti, se določa funkcija ali funkcije, ki jih bo le- ta opravljal. Te funkcije so:

- ločevanje (separiranje),
- ojačitev,
- filtriranje,
- dreniranje,
- tesnjenje,
- zaščita in protierozijska zaščita.

Ločilne geosintetike se uporablja, kadar so v podlagi plasti iz kamenega agregata in koherentne zemljine, kadar ima zemljina nizko nedrenirano strižno trdnost ali pri zelo občutljivih materialih. Namestitev fleksibilnega poroznega geosintetika med dva različna materiala prepreči mešanje in ohrani oziroma izboljša funkcijo posameznega sloja.

Ojačitvene geosintetike se uporablja, kadar gradnja prometnic poteka na slabih tleh, na težko obremenjenih cestah (za zmanjšanje globine kolesnic in debeline kamnitega agregata), pri rekonstrukciji obstoječih železniških prog, pri gradnji nasipov (ko so strižne lastnosti materiala premajhne za podane naklone brežin), na prostorsko ali okoljsko omejenih področjih. Izkoristi se natezna trdnost, ki jo imajo geosintetiki, zemljine imajo namreč le določeno tlačno in strižno trdnost, njena natezna odpornost pa je zelo majhna.

Filtrski geosintetiki se uporabljajo, ko se s filtrskimi agregati ne da zagotoviti filtrske stabilnosti kontakta med zemljino in drenažnim agregatom in ko vgradnja večslojnih filtrov tehnološko ni možna v razumnih prostorskih in cenovnih okvirih.

Drenažni geosintetiki se uporabljajo, ko je potrebna pospešena konsolidacija, hitra gradnja visokih nasipov na malo prepustnih tleh, pri izvajanju ploskovnih drenaž na strmih brežinah, pri preprečevanju bočnih vdorov zemlje ali ko se pokaže, da je drenažni geosintetik enakovredno nadomestilo klasičnemu drenažnemu zasipu.

Tesnilni geosintetiki se uporabljajo, kadar je potrebno preprečiti pronicanje tekočin v temeljna tla (kontaminacija) ali za preprečevanje pronicanja vode iz okolice v območje objekta (predori).

Zaščitni in protierozijski geosintetiki se uporabljajo za zaščito pred vremenskimi vplivi in drugimi gradbenimi materiali ter tudi za zaščito pred vplivi mehanizacije.

Geosintetiki vedno opravljajo eno funkcijo kot primarno, vendar to ne pomeni, da hkrati ne morejo opravljati še kake od ostalih funkcij. Določitev oziroma izbira primernege materiala je odvisna od tehničnih lastnosti materiala, pogojev gradnje in tudi od ekonomskega vidika. Vendar pa slednji naj ne bi bil faktor odločitve. Na podlagi teh kriterijev se nato izbere najprimernejši geosintetik za opravljanje dane funkcije.

Preglednica 2: Funkcije, ki jih opravljajo različni geosintetiki<sup>(1)</sup>

	SEPARIRANJE	OJAČITEV	FILTRIRANJE	DRENIRANJE	TESNENJE	ZAŠČITA
Geotekstili (GTX)	•	•	•	•	•	•
Geomreže (GNE)				•		
Armaturne geomreže (GGR)		•				
Geomembrane (GMB)					•	•
Geosatovja (GCE)		•				•
Geokompoziti (GCO)	•	•	•	•	•	•
Bentonitne membrane (GCL)					•	

Ker diplomska naloga obravnava stabilnost brežin iz armirane zemljine, bo večja pozornost namenjena geosintetikom, ki imajo ojačitveno funkcijo. Le-ti so podrobneje opisani v naslednjem poglavju.

<sup>(1)</sup> Vir: A. Petkovšek: Geosintetiki- ali jih znamo uporabljati?.



### 3.3 Ojačitveni geosintetiki

#### 3.3.1 Splošno

Kot že omenjeno, je bila prvotna funkcija geosintetikov erozijska zaščita. Ostale funkcije, vključno z ojačitveno, so se razvile šele kasneje, z napredkom v razvoju geosintetikov in se danes s pridom uporabljajo na najrazličnejših področjih kot so gradnja cest, železniških prog, nasipov, jezov, ipd.

Osnovna lastnost, ki jo imajo geosintetiki, ki se uporabljajo za ojačitev zemljin, je njihova natezna trdnost s katero prevzamejo natezne napetosti v zemljini. Zemljina je namreč material, ki ima neko tlačno in strižno trdnost, njena natezna trdnost pa je majhna oz. je ta sploh nima. Za ojačitev zemljin se uporabljajo geotekstili, armaturne geomreže, geokompoziti in geosatovja.

#### 3.3.2 Geotekstili

Geotekstili so zaradi dobre natezne trdnosti med primarnimi geosintetiki, ki se uporabljajo za ojačitev zemljin. Uporabljajo se v drobnozrnatih meljastih in glinastih zemljinah. Vendar za maksimalni učinek ni dovolj, da ima geotekstil le ustrezno natezno trdnost, ampak mora biti tudi vgrajen na pravo mesto. Ker gre v splošnem za trajne konstrukcije, se pri projektiranju uporablja konzervativni pristop.

Geotekstili v funkciji ojačitve razvijejo tri možne mehanizme:

- mehanizem membrane,
- strižni mehanizem,
- mehanizem izpultitve.

Mehanizem membrane se razvije, ko je geotekstil položen v stisljiva tla, na katera deluje navpična sila. Horizontalne napetosti, ki se razvijejo v tleh, se izračuna iz izraza:

$$\sigma_H = \frac{P}{2\pi z^2} \left[ 3 \sin^2 \theta \cos^3 \theta - \frac{(1-2\mu) \cos^2 \theta}{1+\cos \theta} \right] \quad (42)$$

Kjer je:

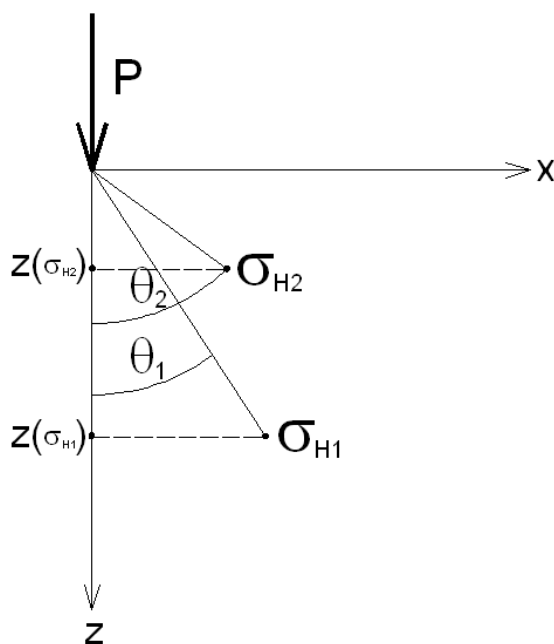
$\sigma_H$  ... horizontalna napetost,

$z$  ... globina, na kateri se računa  $\sigma_H$ ,

$P$  ... vertikalna zunanja sila,

$\mu$  ... Poissonov količnik,

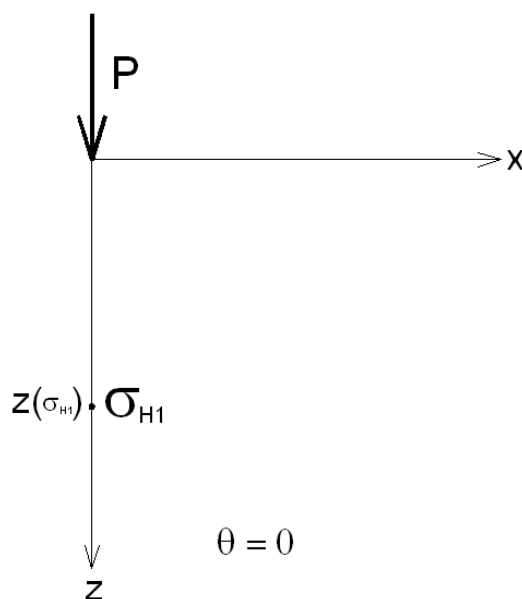
$\theta$  ... kot odmika od vertikale pod silo  $P$ .



Slika 12: Vertikalna sila in horizontalne napetosti v tleh

Iz izraza je razvidno, da je velikost horizontalnih napetosti odvisna od pozicije, na kateri se računajo, točneje, od globine  $z$  in odmaknjenosti od vertikale na kateri deluje sila  $P$  (kot  $\theta$ ). Če se horizontalne napetosti računajo tik pod obtežbo, kjer je  $\theta=0$ , dobi izraz (42) obliko:

$$\sigma_H = -\frac{P}{\pi z^2} \left( \frac{1}{2} - \mu \right) \quad (43)$$



Slika 13: Horizontalne napetosti v tleh, ki se nahajajo na osi vertikalne sile

Ker je vrednost Poissonovega količnika  $\mu$  manjša od 0,5, so vrednosti horizontalnih napetosti negativne, kar pomeni, da sila  $P$  v tleh povzroča natezne napetosti, ki so tudi razlog, da se v tla vgradi geotekstil. Večja ko je sila  $P$  in plitveje ko je geotekstil položen v tla, večje napetosti prevzame. Mehanizem membrane se največkrat pojavi v zelo mehkih tleh.

Strižni mehanizem se lahko ponazori s triosnimi testi, vendar je lažje razumljiv na osnovi strižnih testov. Torej, geotekstil se obremeni v normalni smeri in nato prestriže na stiku z zemljino. Strižna parametra (adhezija in kot trenja med zemljino in geotekstilom) se najlažje določita s pomočjo Mohr- Coulombovega porušnega kriterija:

$$\tau = c_a + \sigma'_N \tan \delta \quad (44)$$

Strižni parametri zemljine sledijo iz izraza:

$$\tau = c + \sigma'_N \tan \varphi \quad (45)$$

Kjer je

$\tau$  ... strižna trdnost,

$\sigma'_N$  ... efektivna normalna napetost na strižni ploskvi,

$c_a$  ... adhezija med geotekstilom in zemljino,

$\delta$  ... strižni kot med geotekstilom in zemljino,

$c$  ... kohezija zemljine,

$\varphi$  ... strižni kot zemljine.

Dobljene strižne parametre geotekstila in zemljine se nato primerja med seboj in napiše v obliki razmerja. To razmerje predstavlja učinkovitost E, ki se napiše v obliki izraza:

$$E_c = \left(\frac{c_a}{c}\right) 100 \dots \text{učinkovitost mobilizirane kohezije}, \quad (46)$$

oz.

$$E_\varphi = \left(\frac{\tan \delta}{\tan \varphi}\right) 100 \dots \text{učinkovitost mobiliziranega strižnega kota}. \quad (47)$$

Mehanizem izpultitve je podoben strižnemu mehanizmu, vendar v tem primeru zemljina deluje na obeh straneh geotekstila. Natezna sila skuša izpultiti geotekstil iz zemljine. Pri laboratorijskih raziskavah se uporabi mehanizem, ki je podoben direktnemu strižnemu testu, vendar v tem primeru zgornji in spodnji sloj zemljine mirujeta, geotekstil pa se zagrabi iz zunanje strani in izpuli. Rezultat je prav tako predstavljen s strižnimi parametri oziroma učinkovitostjo E. Če ta laboratorijska metoda ni na voljo, se uporabi direktni strižni preizkus in določi strižne parametre na zgornji in spodnji strani. Rezultat predstavlja aritmetična sredina vrednosti na zgornji in spodnji strani. Vendar pa je potrebna na tem mestu določena mera previdnosti, saj rezultat ni konzervativen, ker velja predpostavka, da so napetosti linearno razporejene po celotni dolžini in se zato geosintetik v celoti mobilizira, kar v praksi ne drži.

### 3.3.3 Armaturne geomreže

Armaturne geomreže, predstavljajo največjo konkurenco geotekstilom pri izbiri materiala za ojačitev. Od geotekstilov se armaturne geomreže sicer razlikujejo po izgledu, načinu proizvodnje ter načinu vgradnje, način projektiranja le- teh pa je praktično enak kot pri geosintetikih. Na trgu sta na voljo dva različna tipa armaturnih geomrež, ki se razlikujeta v nosilnosti, ki je lahko bodisi v eni smeri ali pa dveh smereh, vzdolžni in prečni. Armaturne

geomreže, nosilne v eni smeri se uporabljajo v primeru, ko je smer glavnih napetosti znana, nosilne v dveh smereh pa v primeru, da smer glavnih napetosti ni znana oziroma je naključna. Na to je potrebno biti pri vgradnji še posebej pozoren, saj nepravilno položena armaturna geomreža nima predpisanega učinka. Od geotekstilov se armaturne geomreže ne razlikujejo bistveno niti pri preizkušanju njihovih fizikalnih in mehanskih lastnosti, saj so postopki zelo podobni, prav tako se lastnosti ne razlikujejo bistveno od lastnosti geotekstilov.

### **3.3.4 Geokompoziti in geosatovja**

Čeprav pri uporabi za ojačitev prednačijo geotekstili in armaturne geomreže, se včasih v ta namen uporabljajo tudi geokompoziti in geosatovja.

Geokompoziti so sestavljeni materiali, zato je razumljivo, da se jih lahko uporabi na več različnih področjih, tudi za ojačitev zemljin, vendar pa njihove dobre lastnosti sestavljenega materiala bolj pridejo do izraza pri ostalih funkcijah in je zato njihova uporaba bolj pogosta drugje, kjer je njihov učinek večji.

Geosatovja s svojo tridimenzionalno obliko dobesedno objamejo zemljino, kar znatno izboljša njeno strižno trdnost in posledično tudi nosilnost. Uporabljajo se za utrditev temeljnih tal iz zrnatih zemljin.

### **3.4 Trajnost geosintetikov in različni degradacijski mehanizmi**

Trajnost geosintetikov je posebna kategorija lastnosti, ki ji je potrebno nameniti zadostno mero pozornosti, saj je pri geotehničnem projektiranju potrebno upoštevati oziroma oceniti pomembnost okoljskih pogojev glede na trajnost in predvideti ukrepe za zaščito oziroma ustrezno odpornost materialov.

Kriteriji, na podlagi katerih se ocenjuje trajnost, so:

- poškodbe pri vgradnji,
- lezenje,
- abrazija,
- sprostitvev napetosti.

Pri projektiranju se ti kriteriji upoštevajo kot redukcijski faktorji pri računu končne natezne trdnosti geosintetika.

Poškodbe pri vgradnji so lahko fizične poškodbe zaradi neustreznega načina vgradnje ali pa nastanejo kot posledica napetosti, ki se pojavijo med samo vgradnjo. Te napetosti so namreč v nekaterih primerih lahko celo večje od projektnih. Obstajajo testi, na podlagi katerih se da oceniti, za koliko se na ta račun zmanjša trdnost geosintetikov in so pomemben podatek za določanje ustreznih redukcijskih faktorjev.

Lezenje je proces, ki vpliva na zmanjšanje trdnosti geosintetika. Nanj so občutljivi predvsem sami polimeri, ki sestavljajo geosintetike. Na stopnjo lezenja najbolj vplivata stopnja obremenitve in tip polimera. Tudi ta vpliv se preverja s testi, ki prav tako predstavljajo pomemben podatek za določanje ustreznih redukcijskih faktorjev.

Abrazija je lahko glavni vzrok za odpoved sistema geosintetik- zemljina. Njeno stopnjo oziroma vpliv se izraža kot izgubo teže geosintetika ali kot stopnjo ohranjene trdnosti.

Sprostitev napetosti se lahko pojavi, ko je geosintetik izpostavljen konstantnim deformacijam. Testi za ugotavljanje teh sprostitvev sicer obstajajo, vendar so zahtevni in dolgotrajni, zato je v literaturi podatkov o njih malo.

Pri vprašanju trajnosti geosintetikov se pojavlja tudi pojem degradacijskih mehanizmov, ki se razvijajo z njihovim staranjem. Degradacijski mehanizmi se s časom razvijejo na makroravni kot tudi na mikroravni, torej v sami molekularni zgradbi polimerov, ki sestavljajo geosintetike, vendar pa so te spremembe v zaprtem okolju počasne. Spremembe se odražajo v napetostno deformacijski krivulji, ki preide iz plastičnega v krhko stanje, zmanjša se porušni raztezek. Spremembe se ugotavljajo s kemičnimi testi, ki pa so dragi in zahtevni. Ponavadi se testirajo naslednji degradacijski mehanizmi:

- degradacijski vpliv sončne svetlobe,
- temperaturna degradacija,
- degradacijski vpliv oksidacije,
- degradacijski vpliv hidrolize,

- kemična degradacija,
- radioaktivna degradacija,
- biološka degradacija.

Med največjimi degradacijskimi vplivi je gotovo vpliv sončne svetlobe, ki je ponavadi vzrok degradacije praktično vseh organskih materialov, tudi polimerov iz katerih se proizvajajo geosintetiki. Sončni spekter je razdeljen na 3 dele: infrardeči del spektra (IR), vidni del spektra in ultravijolični del spektra (UV). UV del spektra je tisti, ki povzroča degradacijo materialov, predvsem njegovi UV- B žarki, ki pustijo hude poškodbe, v manjši meri pa tudi UV- A žarki. Seveda je potrebno upoštevati, da se intenzivnost sončne svetlobe spreminja glede na letne čase (manjša UV radiacija pozimi), UV degradacija pa je odvisna tudi od geografske lege, temperature, oblačnosti, vetra, vlage in onesnaženosti atmosfere. Vse te faktorje je potrebno v testih upoštevati. Med najbolj občutljivimi polimeri so polietilen, poliester in polipropilen. Zato je potrebno zagotoviti, da so geosintetiki zaščiteni pred dolgotrajno izpostavljenostjo UV svetlobi. Geosintetiki naj bi bili tej svetlobi izpostavljeni maksimalno 14 dni.

Naslednja je temperaturna degradacija. Jasno je, da ekstremne temperature vplivajo na degradacijo materiala. Kritični primer predstavljajo predvsem visoke temperature v interakciji z ostalimi degradacijskimi mehanizmi. Visoke in nizke temperature se odražajo v mehčanju oz. otrditvi materiala.

Tudi oksidacija vpliva na degradacijo, saj praktično vsi polimeri reagirajo s kisikom. Najbolj dovzetni so poliolefini (polipropilen in polietilen). Pri testiranju se kombinira vpliv visoke temperature in oksidacije in se izvaja do porušitve, ki se lahko kaže kot sprememba izgleda, teže, dimenzij ali ostalih lastnosti do stopnje, da material ne služi več svojemu namenu. Kot posledica se s časom pojavijo spremembe v natezni trdnosti, raztezku in modulu elastičnosti.

Hidrolizi je najbolj podvržen poliester, še posebej pri zelo visokih PH vrednostih. Na drugi strani so na zelo nizke PH vrednosti občutljivi poliamidi. Učinek se omili, če se uporabijo polimeri z veliko molekularno težo in majhno vsebnostjo karboksilne skupine atomov.

Testi, povezani s kemično degradacijo, obravnavajo spremembe v teži, dimenzijah, izgledu in trdnosti in so stvar posameznih proizvajalcev.

Čeprav vpliv radioaktivne degradacije ponavadi ni testiran, se predpostavlja, da nizka stopnja radioaktivne izpostavljenosti ne vpliva kvarno na polimere v geosintetikih. Dodatni, specifični testi se izvajajo samo v primeru, da bo material podvržen posebnim, agresivnim vplivom iz okolja.

Učinek biološke degradacije polimerov je praktično ničen. Pravzaprav večji problem znanstvenikom predstavlja dejstvo, da polimeri niso bio razgradljivi. Občutlivejši so razni dodatki polimerov. Vendar pa v materialih, izpostavljenih testom, ni opaziti sprememb v natezni trdnosti in tudi ni posebnih sprememb v strukturi.

Vprašanje trajnosti in degradacije je najbolj kritično in pomembno za geotekstile, vendar zgoraj opisani mehanizmi in kriteriji v splošnem veljajo tudi za ostale geosintetike. Potrebno pa je upoštevati, da so testiranja zaradi kompleksnosti in številnih mehanizmov, ki bi jih bilo potrebno upoštevati, redki in izvedeni v idealiziranih pogojih ter pomenijo, da so rezultati maksimalne možne numerične vrednosti, ki se ne morejo direktno uporabiti v nadaljnjih računih, ampak morajo biti prilagojene realnim pogojem. Razlika med laboratorijsko dobljenimi vrednostmi in želeno uporabno vrednostjo je možno upoštevati na 2 načina:

- uporabi se velik faktor varnosti na koncu računa,
- laboratorijsko dobljene vrednosti se korigirajo z redukcijskimi faktorji, v končni analizi pa se uporabi običajne faktorje varnosti.

Geosintetike se torej bolj kot ne ocenjuje na izkustveni ravni. Večina opravljenih študij pa je potrdila, da geosintetik ostane v dobrem oz. odličnem stanju. To dokazuje, da je proizvodnja geosintetikov na pravi poti tako glede izbire sestavnih polimerov kot tudi načina proizvodnje. Pozornost je torej potrebna pri projektiranju v inženirskem smislu in pravilni ter pazljivi vgradnji.

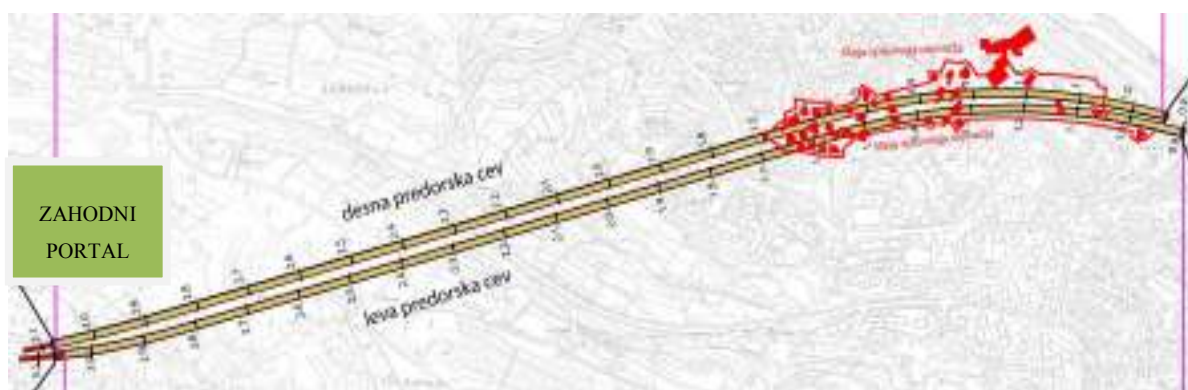


## 4 RAČUN STABILNOSTI NASIPA IZ ARMIRANE ZEMLJINE NA PRIMERU ZAHODNEGA PORTALA PREDORA MARKOVEC

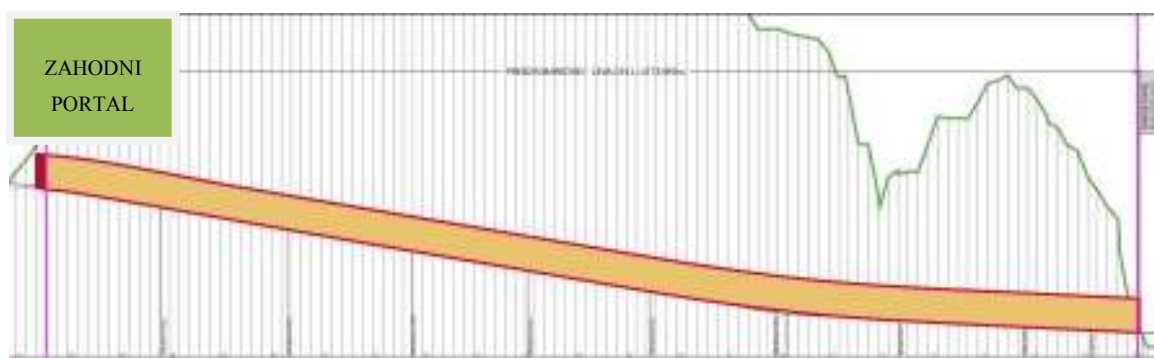
### 4.1 Uvod

#### 4.1.1 Splošno o projektu

Predor Markovec bo zgrajen na hitri cesti Koper- Izola. Predvidena dolžina predorske cevi bo 2144 m (smer Koper- Izola) oziroma 2147 m (smer Izola- Koper). Ob obeh ceveh vzhodnega portala (koprška stran) bo v večjem delu zasuta galerija, na desni strani bo deloma odprta konstrukcija na stebrih. Na območju zahodnega portala (izolska stran) bo izveden začasni vkop za portalno konstrukcijo. Brežina bo v najvišjem delu visoka 16 m in se bo z oddaljevanjem od portala manjšala. Širina čelne brežine bo 40 m, bočni brežini bosta dolgi 85 m oziroma 100 m. V območju zahodnega portala se bodo po koncu gradnje predora brežine med začasnim in končnim portalom v dolžini 30 m zasule, preostali del pa bo trajno varovan z nasipom iz armirane zemljine.



Slika 14: Pregledna situacija predora Markovec (Vir: [www.dars.si](http://www.dars.si))



Slika 15: Vzdolžni profil predora Markovec (Vir: [www.dars.si](http://www.dars.si))

V nadaljevanju bodo opisani izračuni stabilnosti, ki so bili narejeni pri projektiranju nasipa iz armirane zemljine, ki bo varoval vkopne brežine zahodnega portala predora Markovec. Izračuni so bili narejeni s pomočjo programa Slide, vzporedno pa sem rezultate primerjala tudi s programom Maccaferri Macstars 2000.

#### **4.1.2 Geološke raziskave in podatki**

Geološki podatki so bili pridobljeni in ovrednoteni na podlagi ogledov terena, inženirsko-geološkega kartiranja, sondažnih vrtanj in razkopov, nalivalnih poizkusov, geofizikalnih preiskav in laboratorijskih preiskav. Na mestih objektov so bile izvedene vrtine, na izoljski strani (območje zahodnega portala) pa so bili izvedeni razkopi, ki so služili za določitev globine trdne podlage pod preperino. Za ugotavljanje zbitosti zemljin in polhribin so bili v vrtinah izvedeni preizkusi SPT. Izvedeni so bili tudi preizkusi z žepnim penetrometrom. V okviru hidrogeološkega pregleda terena so bili izvedeni nalivalni preizkusi v vrtinah, ki so bile opremljene tudi kot piezometri. V okviru geofizikalnih preiskav so bile opravljene geofizikalne seizmične meritve, ki so pokazale 3 prevladujoče geološke plasti:

- preperina,
- preperel fliš,
- kompakten, nepreperel fliš.

V laboratoriju so bile izvedene naslednje preiskave:

- prostorninska teža,
- naravna vlažnost,
- enoosna tlačna trdnost,
- enoosna natezna trdnost,
- strižna trdnost,
- kohezija in kot notranjega trenja,
- točkovni indeks,
- modul stisljivosti,
- koeficient vodoprepustnosti,
- konsistenčne meje.

Omenjene preiskave so bile narejene v skladu s priporočili Mednarodnega društva za mehaniko hribin (ISRM) in veljavnimi standardi.

Po opravljenih preiskavah je bila podana končna ocena, da na območju trase prevladujejo flišne plasti, nad flišnimi plastmi nastopa tanka plast preperine, pojavljajo se tudi plasti apnenenga peščenjaka ter sivi laporni meljevci in morski sedimenti.

V območju zahodnega portala bosta kratka predvropa med začasnim in končnim portalom izdelana v flišni preperini in neprepereli flišni podlagi, zato so se za potrebe izračunov stabilnosti določile naslednje karakteristične plasti:

- 4 m debela plast **preperine** na vrhu,
- 3,5 m debela plast **preperelega fliša** pod plastjo preperine,
- **kompakten fliš** pod plastjo preperelega fliša.

Debeline plasti se v posameznih profilih spreminjajo, kar je v izračunih tudi upoštevano. Gelogija območja realno ni tako homogena, vendar pa je prisotnost ostalih plasti znotraj osnovnih plasti tako majhna ( $> 10\%$ ), da se lahko uporabi tako poenostavljen model, posamezno plast pa obravnava kot homogeno. Kljub temu naj bi se izkop brežin izvedel ob prisotnosti geomehanika, ki lahko po potrebi spremeni razporeditev in raster sider, če dejanske geološke razmere na terenu to zahtevajo.

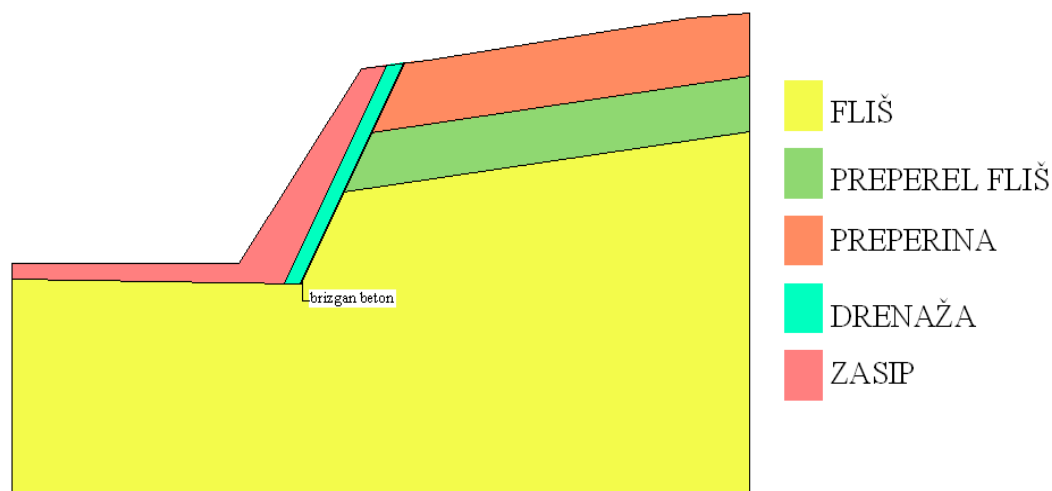
Pri dimenzioniranju geosintetika se je izračun izvršil po priporočilih, ki jih podaja Koerner (Designing with Geosynthetics, 1998). Z izračuni so se določili končna natezna trdnost geosintetika, računski natezna trdnost geosintetika, minimalna dolžina armiranja, debelina slojev med posameznimi geosintetiki ter potrebna dolžina geosintetika. Dobljeni podatki so se uporabili za definiranje lastnosti geosintetika v programu Slide.

Preglednica 3: Geomehanski podatki za osnovne plasti na območju zahodnega portala

Tip	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]
Preperina	20	26	2
Preperel fliš	23	26	20
Fliš	23	33	30

Preglednica 4: Geomehanski podatki ostalih materialov, ki so se uporabili v izračunih

Tip	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	c [kPa]
Zasip	22	35	1
Drenaža	22	40	1
Brizgan beton	24	45	50



Slika 16: Model sestave tal na območju zahodnega portala

Barve materialov, ki so prikazane na Sliki 16, se ujemajo z barvami materialov, ki se pojavijo v slikah rezultatov izračunov v programu Slide. Njihove karakteristike so podane v preglednicah 3 in 4 in so vseskozi enake, zato v nadaljnjem tekstu niso več podane.

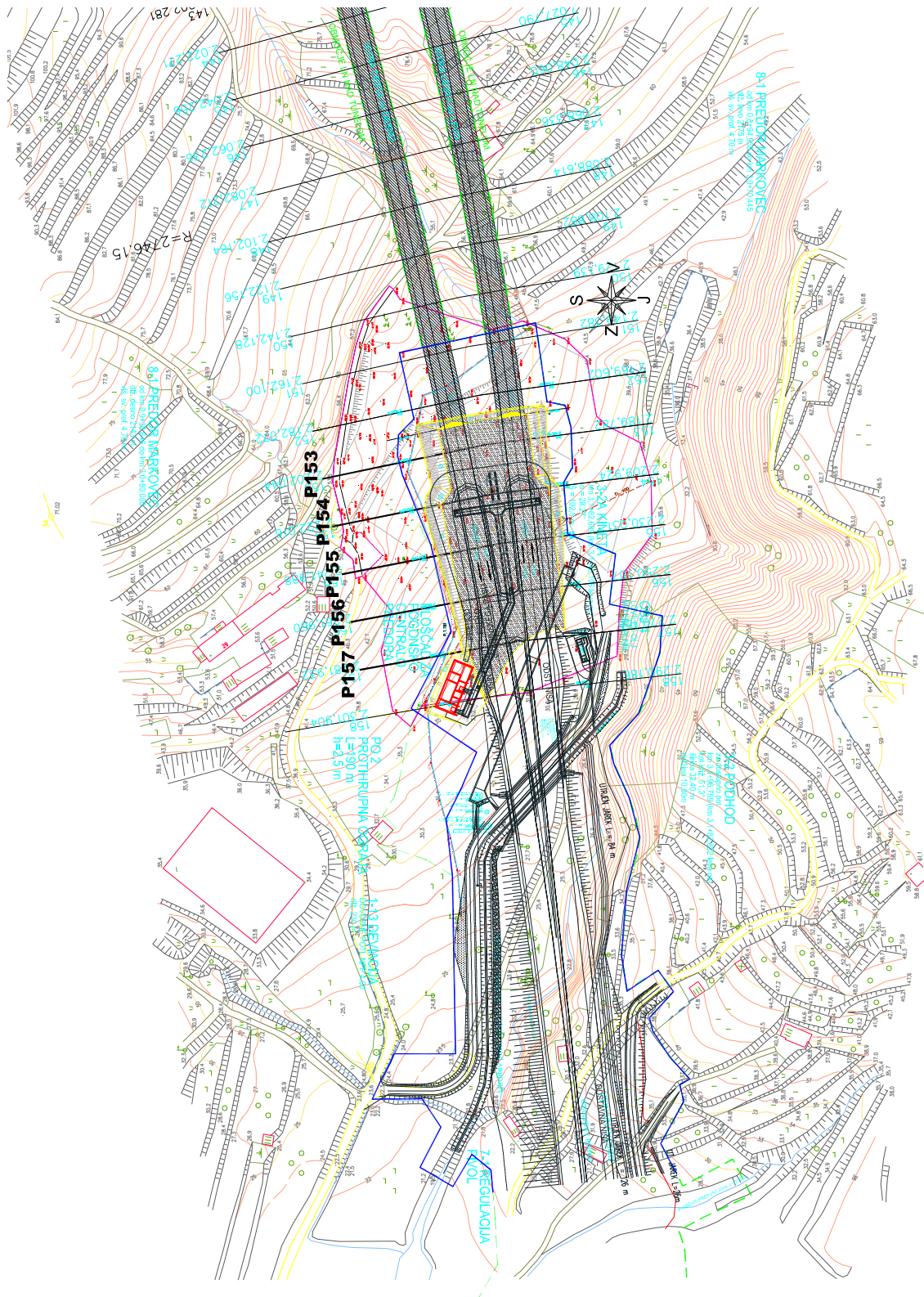
### 4.1.3 Analize stabilnosti

Analize stabilnosti nasipa iz armirane brežine sem izvedla za več različnih profilov v območju zahodnega portala in sicer so to bili naslednji profili:

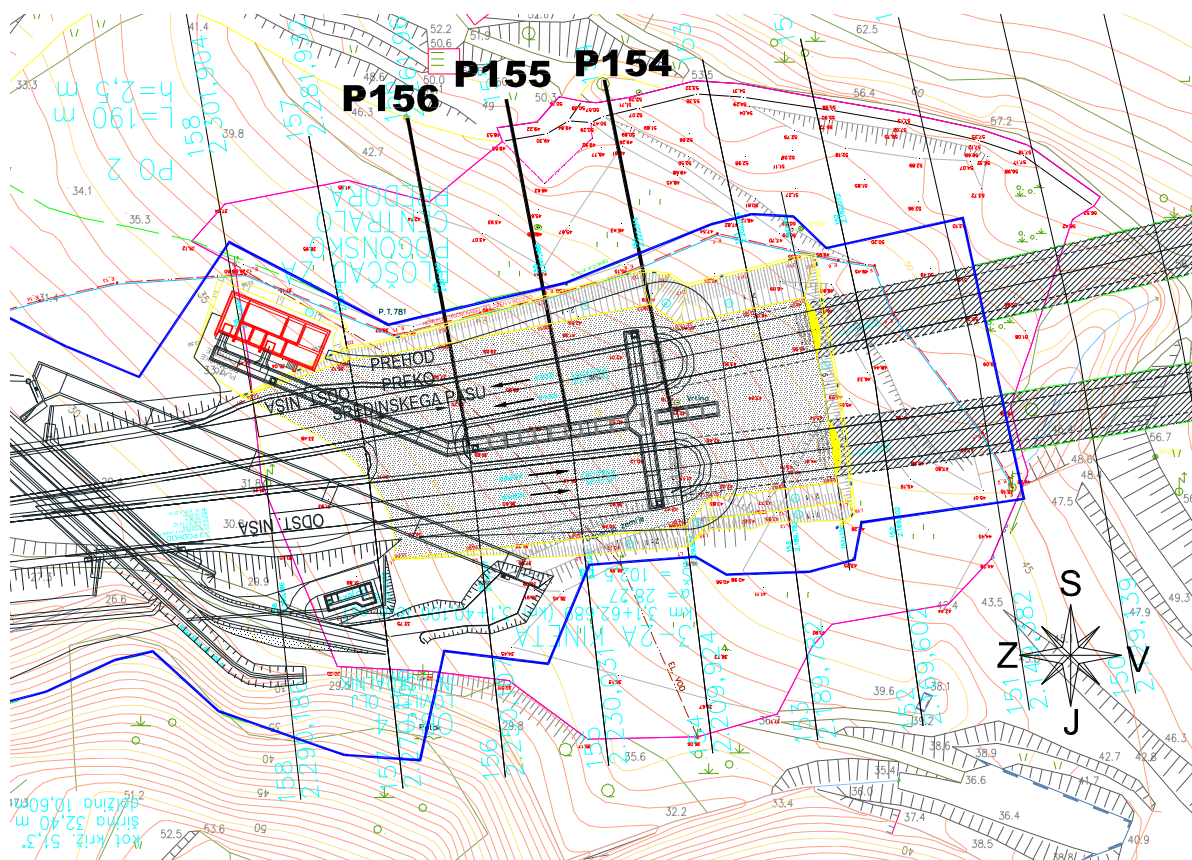
- P154 (P154 + 0.00, P154 + 5.00, P154 + 10.00, P154 + 15.00),
- P155 (P155 + 0.00, P155 + 5.00, P155 + 10.00, P155 + 15.00),
- P156 (P156 + 0.00, P156 + 5.00, P156 + 10.00, P156 + 15.00).

Pri izračunu stabilnosti se je izkazalo, da v večini profilov ne bo večjih problemov glede zagotavljanja stabilnosti oziroma doseganja predpisane minimalne vrednosti varnostnega faktorja FS, razen v profilu P154, kjer je brežina najvišja. Za ta profil je bila zato narejena podrobnejša analiza, ki je bila izvedena v štirih fazah. Vsaka predhodna faza je bila osnova za nadaljnje izračune v fazah, ki so sledile.

Izračuni za vse profile so bili narejeni z računalniškim programom Slide. Omenjeni program računa po metodi mejnih ravnovesij. Omogoča izračune na osnovi več različnih metod. Analize za primer zahodnega portala predora Markovec je bila izvedena s pomočjo poenostavljene metode Janbu-ja. Za izračun stabilnosti se je uporabila krožno- cilindrična drsna ploskev, v nekaterih fazah izračuna za profil P154 pa tudi poljubna drsna ploskev.



Slika 17: Pregledna situacija zahodnega portala predora z oznakami profilov



Slika 18: Pregledna situacija v območju profilov P154, P155, P156

## 4.2 Izračuni za profil P154

Spodaj opisani izračuni so bili narejeni za desni del profila P154 + 0.00. Ker je ta del predstavljal največjo težavo v smislu stabilnosti, so bile zanj narejene bolj podrobne analize.

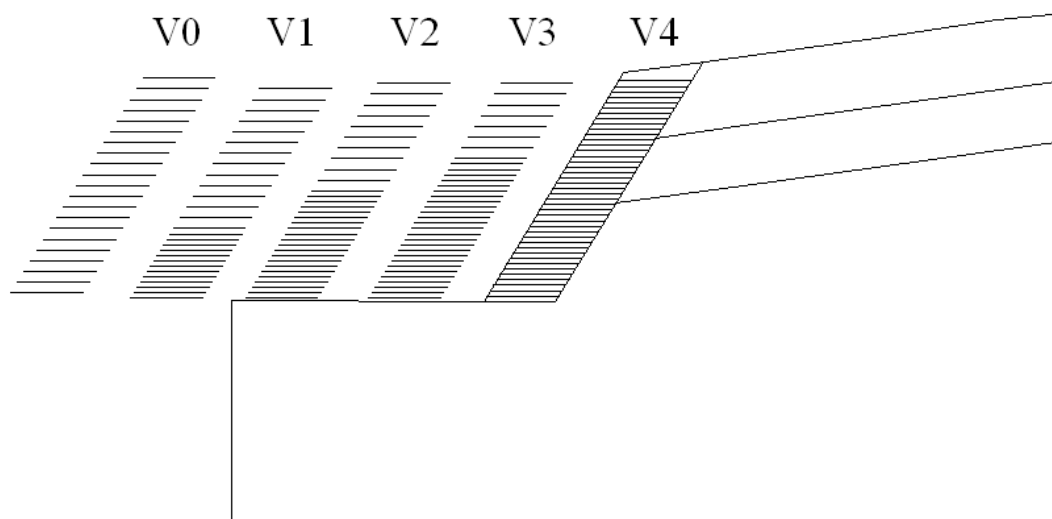
### 4.2.1 Faza 1: Začetna faza

V začetni fazi je bil naklon brežine in varovalnega nasipa enak in sicer  $58^\circ$ . Širina varovalnega nasipa je bila enaka vzdolž celotne višine in je znašala 4m. Višina nasipa v tem delu je 12 m. Minimalni predpisani faktor varnosti FS smo poskušali doseči tako, da smo predvideli različne načine razporeditve geosintetika v varovalnem nasipu. V naprej smo določili minimalno in maksimalno debelino sloja med geosintetiki, ki je znašala 0,3 m oz. 0,6 m. Računi so bili narejeni za krožno- cilindrično drsno ploskev.

Preglednica 5: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 1

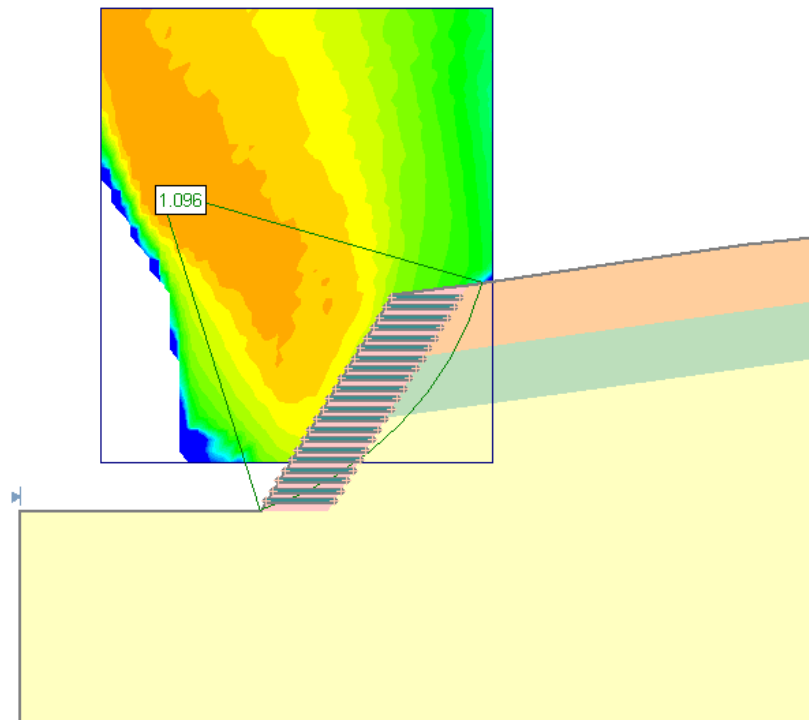
	FS	OPIS
V0	1,096	Geosintetik po celotni višini na 0,6 m
V1	1,174	Geosintetik do 1/3 višine na 0,3 m nato na 0,6 m
V2	1,226	Geosintetik do 1/2 višine na 0,3 m nato na 0,6 m
V3	1,226	Geosintetik do 2/3 višine na 0,3 m nato na 0,6 m
V4	1,226	Geosintetik po celotni višini na 0,3 m
	<b>1,250</b>	Predpisani faktor varnosti

Za doseganje zadostne stabilnosti je poleg izbire ustreznega geosintetika pomembna tudi razporeditev le- tega. To je razvidno iz Preglednice 5, saj se je ob spreminjanju razporeditve geosintetika spreminjala tudi vrednost varnostnega faktorja FS. V določenem trenutku pa to ni več vplivalo na rezultat (vrednost varnostnega faktorja v variantah V2, V3 in V4 se ni spreminjala), zato so bile potrebne drugačne rešitve problema.

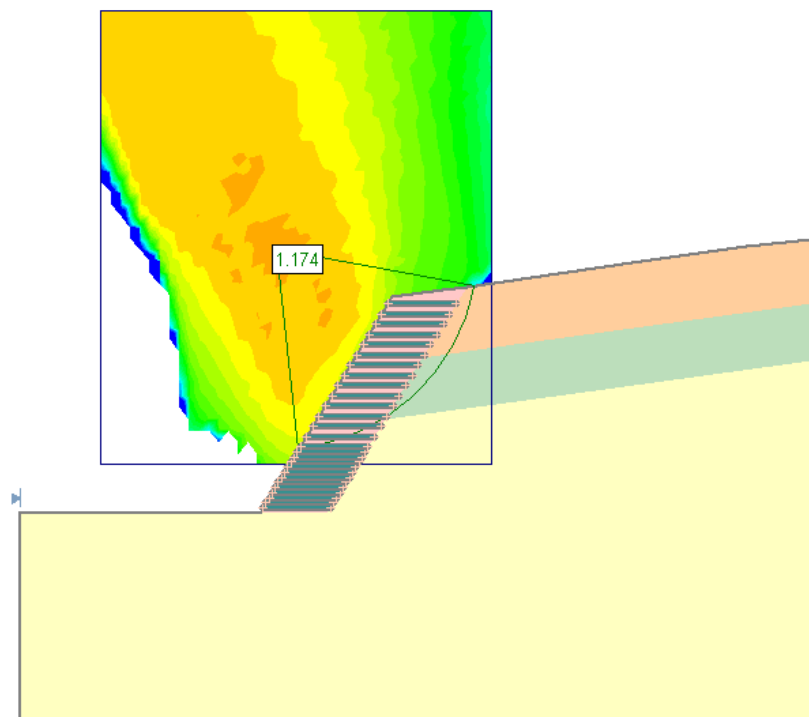


Slika 19: Razporeditev geosintetika v različnih variantah Faze 1

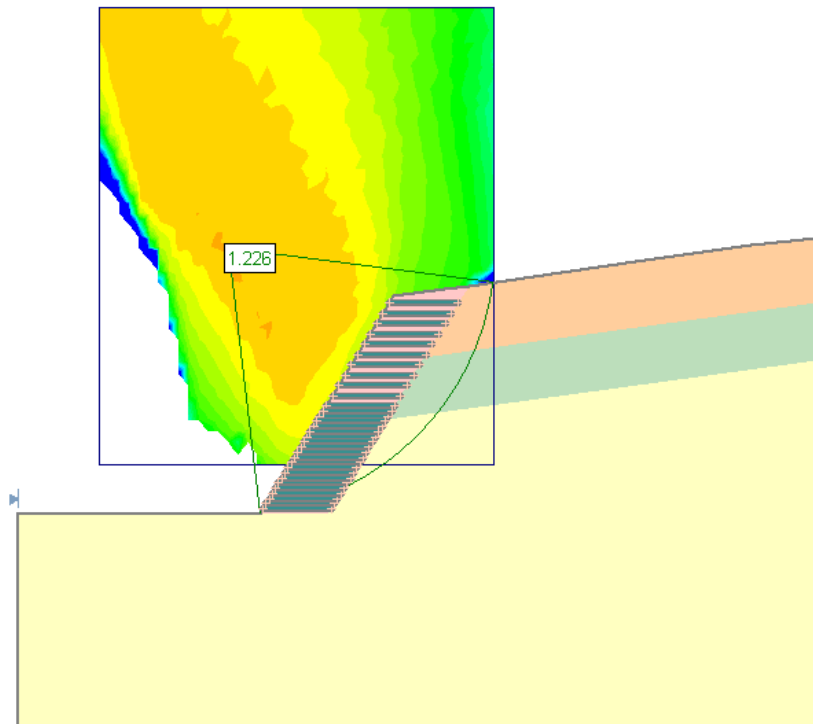




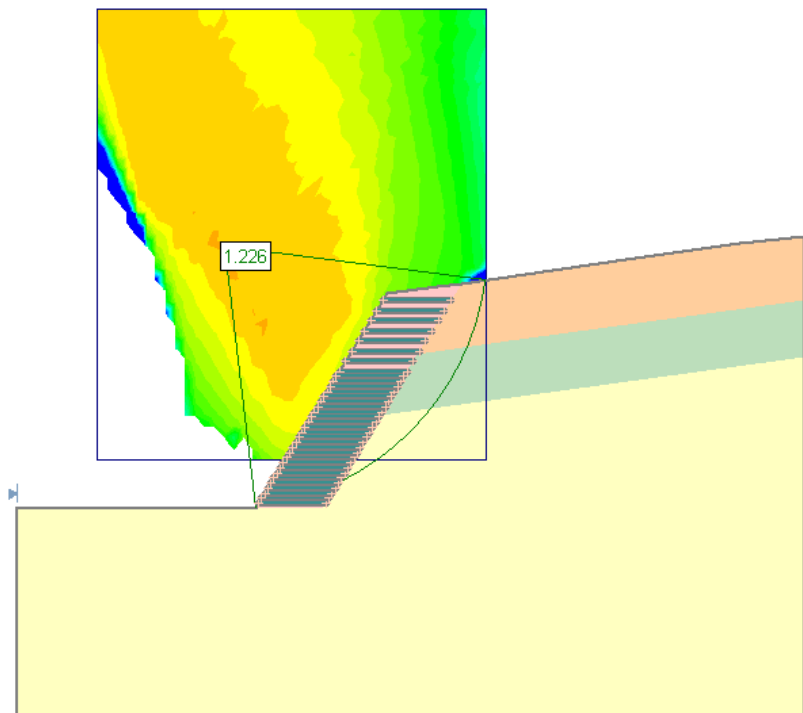
Slika 20: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 1)



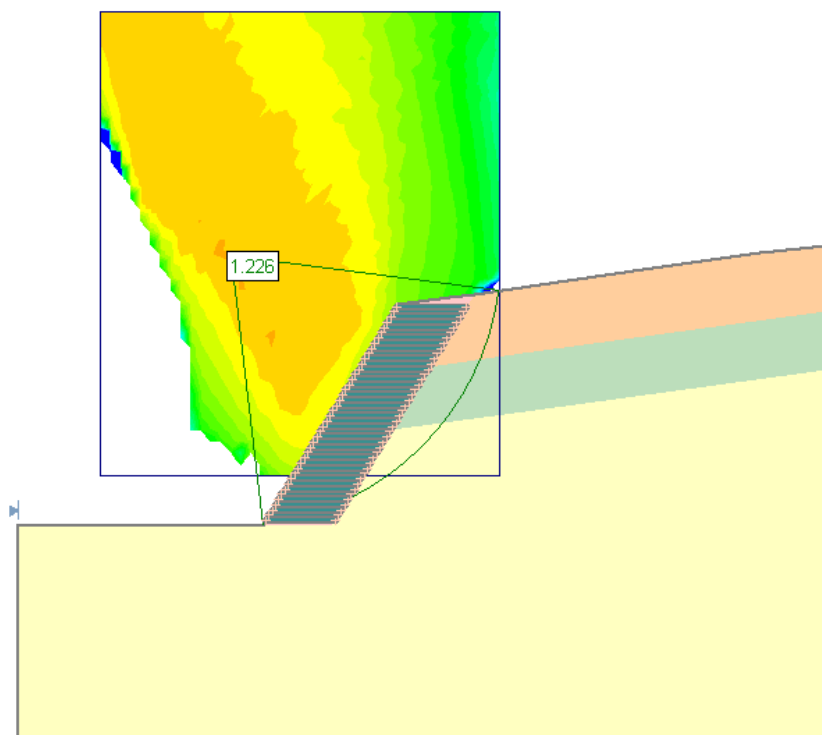
Slika 21: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 1)



Slika 22: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 1)



Slika 23: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 1)



Slika 24: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 1)

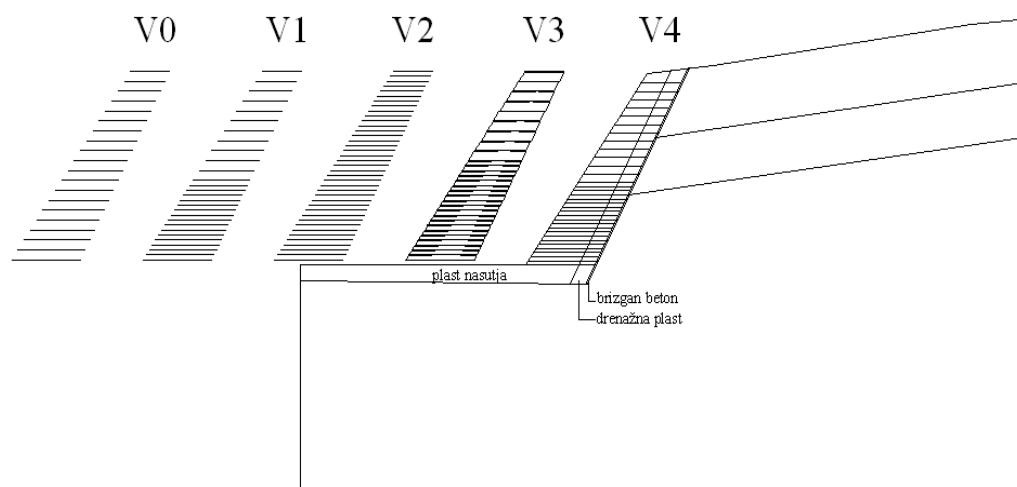
#### 4.2.2 Faza 2: Popravljen geometrija

Iz Preglednice 5 je torej razvidno, da do ustrezne rešitve nismo prišli, zato smo se odločili, da bomo najprej optimizirali geometrijo brežine in podpornega nasipa, nato pa smo ponovno z različno razporeditvijo geosintetika skušali doseči ustrezen faktor varnosti FS. V novi varianti je tako brežina imela nagib 2:1 oz.  $63^\circ$ , podporni nasip pa nagib 3:2 oz.  $56^\circ$ . Širina varovalnega nasipa se je po višini enakomerno spreminjala in sicer je ob vznožju znašala 4,4 m na vrhu pa 2,5 m. Debelina plasti med geosintetiki je ostala nespremenjena in je torej znašala tako kot v začetni varianti 0,3 m oz. 0,6 m. Račun je bil narejen za krožno- cilindrično drsno ploskev. V izračunu je bila na novo upoštevana tudi plast nasutja, debeline 1 m, ki bo izvedena pri gradnji predora. Poleg tega je bila v varianti V4 dodana drenažna plast, debeline 1 m ter plast brizganega betona, debeline 0,1 m.

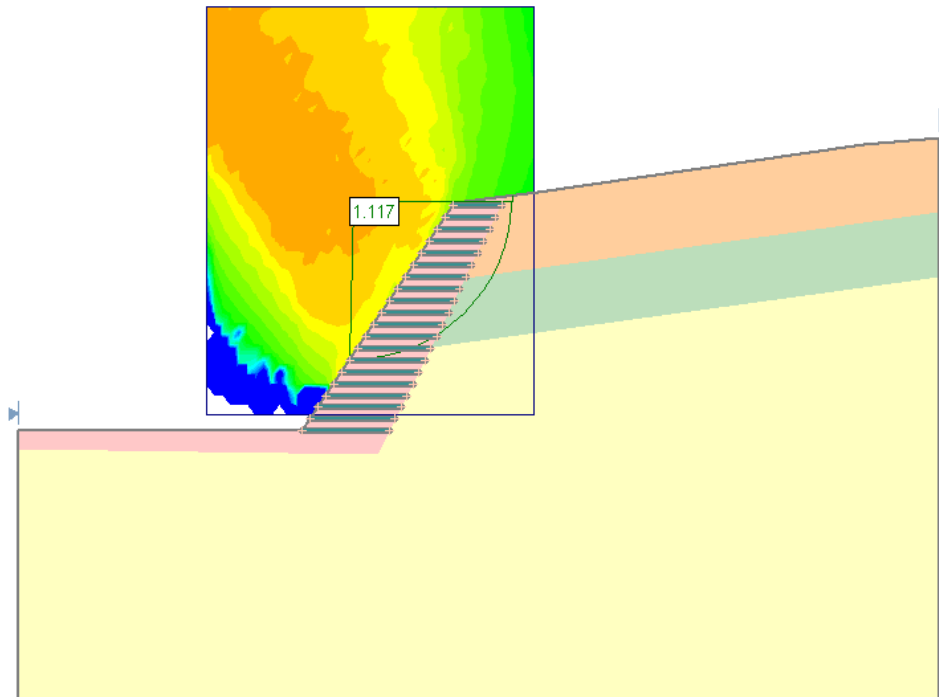
Preglednica 6: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 2

	FS	OPIS
V0	1,117	Geosintetik po celotni višini na 0,6 m
V1	1,246	Geosintetik do 1/2 višine na 0,3 m nato na 0,6 m
V2	1,246	Geosintetik po celotni višini na 0,3 m
V3	<b>1,261</b>	Geosintetik do 1/2 višine na 0,3 m nato na 0,6 m; geosintetik uvihan
V4	<b>1,266</b>	Geosintetik do 1/2 višine na 0,3 m nato na 0,6 m; dodana drenažna plast in plast brizganega betona
	<b>1,250</b>	Predpisani faktor varnosti

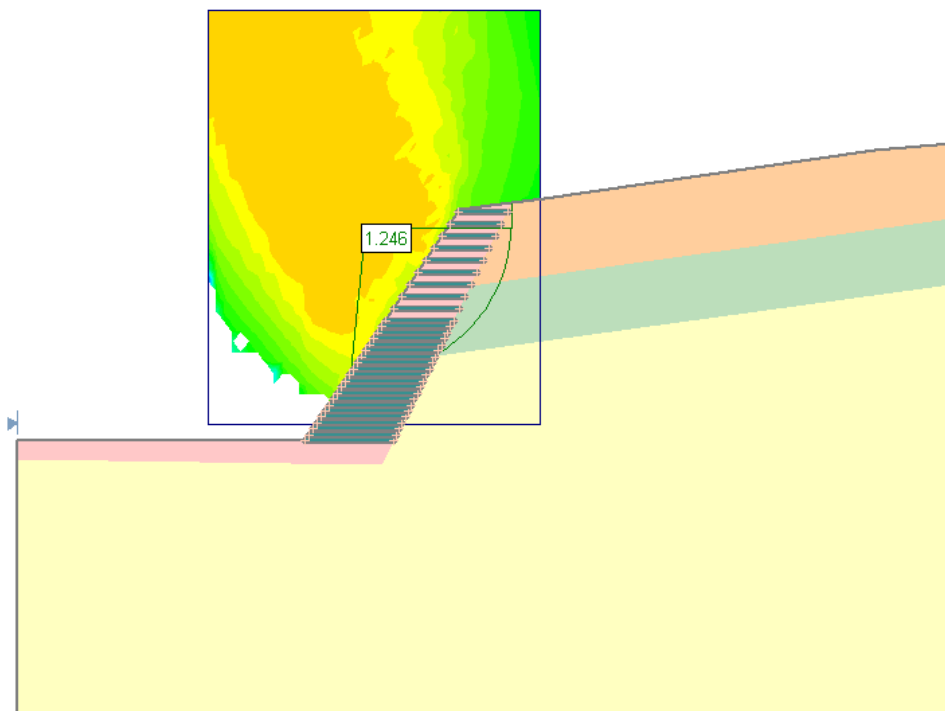
Z novo geometrijo brežin in spreminjanjem razporeditve geosintetika smo ponovno skušali doseči ugoden rezultat. Tudi v tej fazi v določenem trenutku razporeditev geosintetika ni imela več vpliva na rezultat (vrednost faktorja varnosti FS v variantah V1 in V2 je enaka). V varianti V3 se je zato predvidila vgradnja geosintetika tako, da se le- ta uviha, v varianti V4 pa sta bili dodani drenažna plast in plast brizganega betona. Oba ukrepa sta dala ugoden rezultat, saj je bila predpisana vrednost varnostnega faktorja FS dosežena tako v varianti V3 kot v varianti V4.



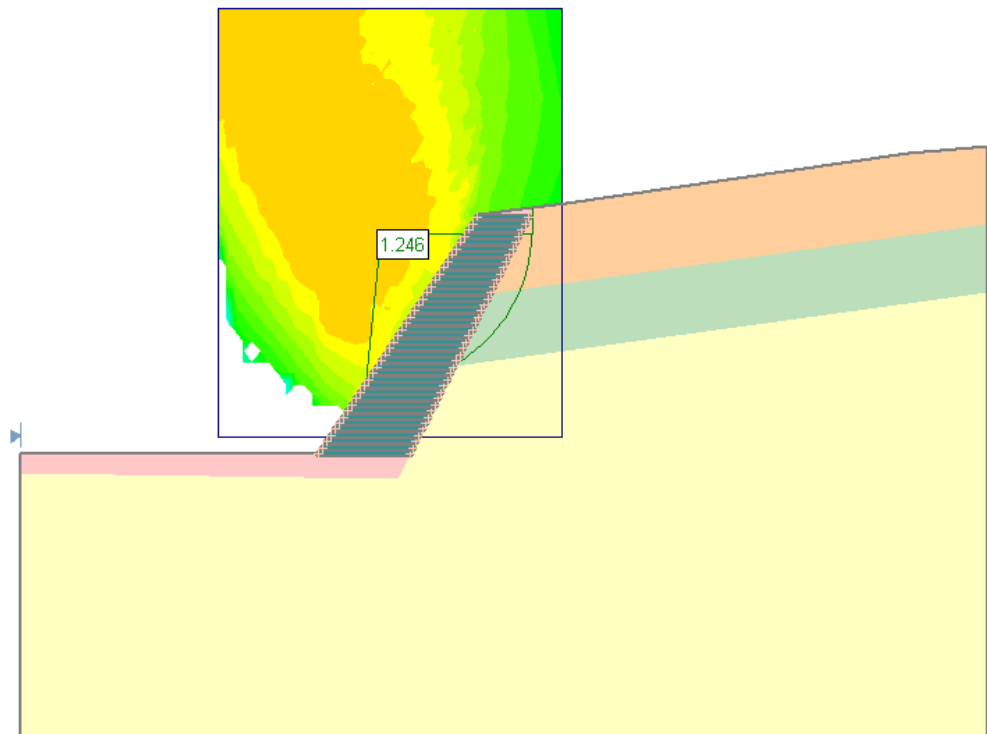
Slika 25: Razporeditev geosintetika v različnih variantah Faze 2



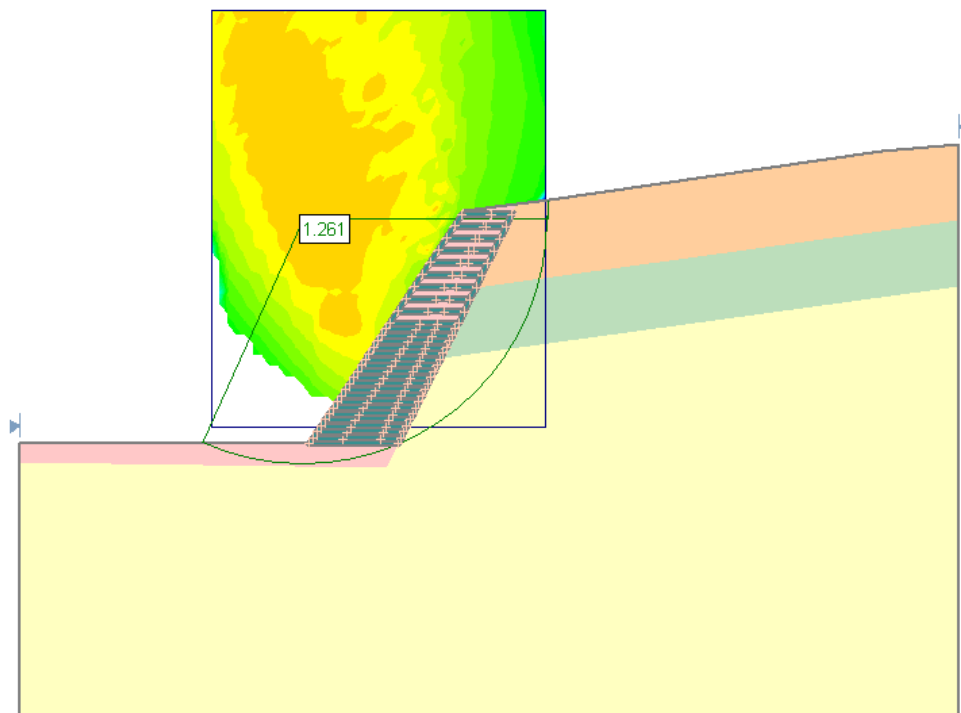
Slika 26: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 2)



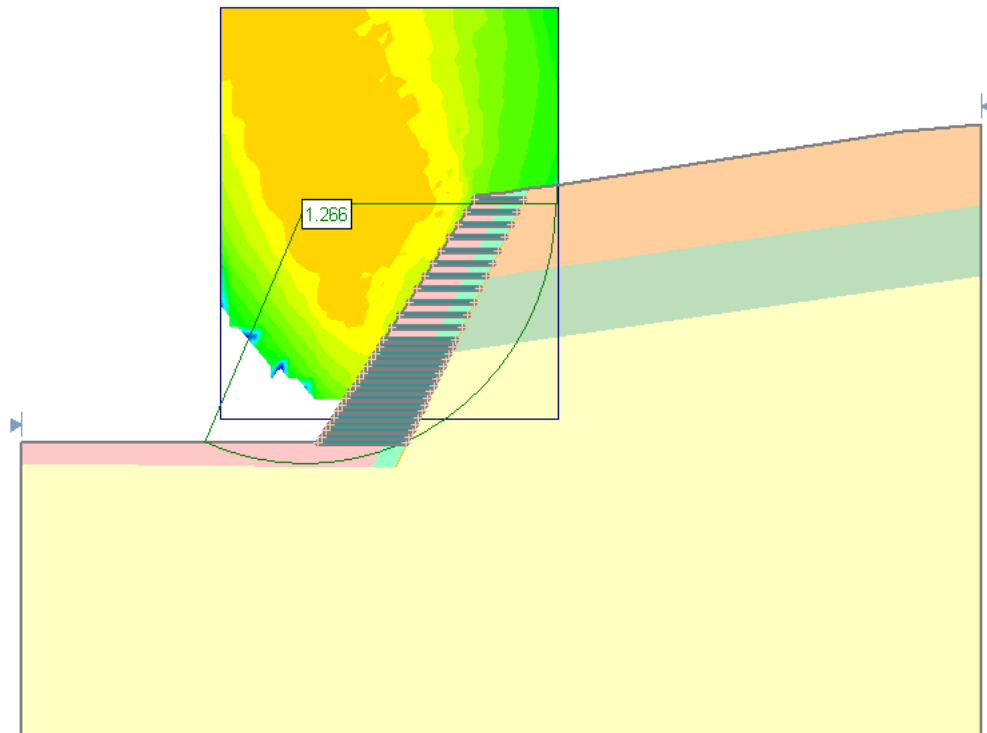
Slika 27: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 2)



Slika 28: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 2)



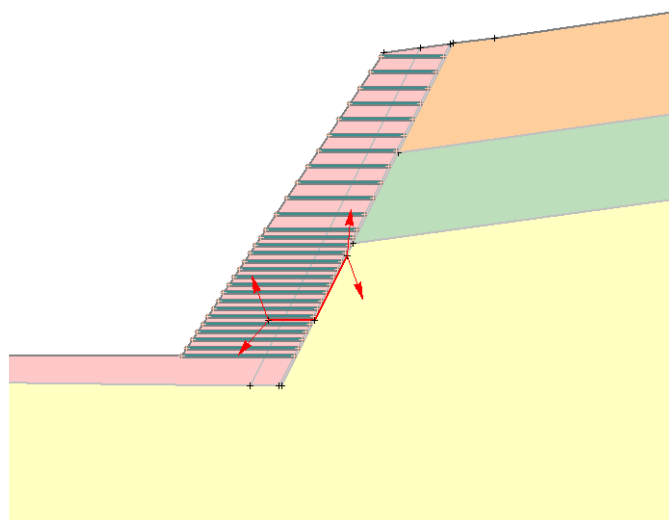
Slika 29: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 2)



Slika 30: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 2)

#### 4.2.3 Faza 3: Poljubna drsna ploskev

V Fazi 2 je bila za krožno- cilindrično drsno ploskev torej dosežena ustrezna vrednost faktorja varnosti FS, v Fazi 3 pa so se izračuni iz te faze ponovili še za poljubno drsno ploskev.

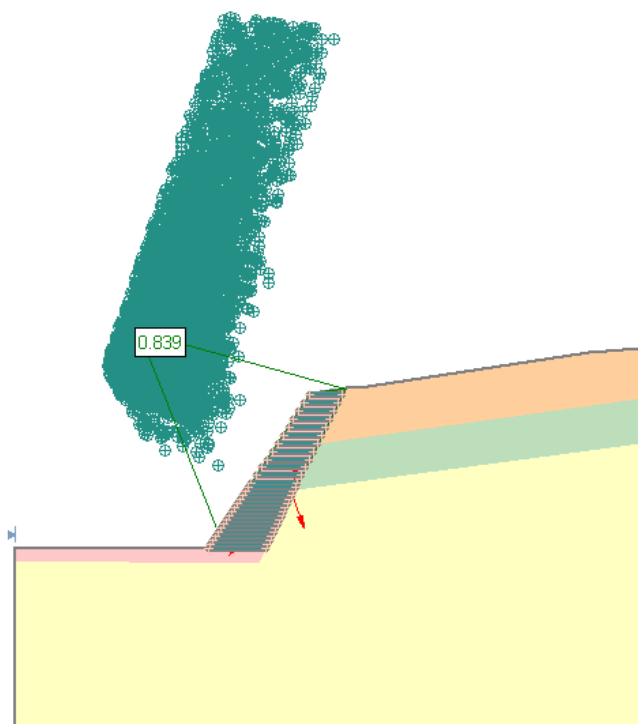


Slika 31: Predpostavljena poljubna porušna ploskev

Preglednica 7: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 3

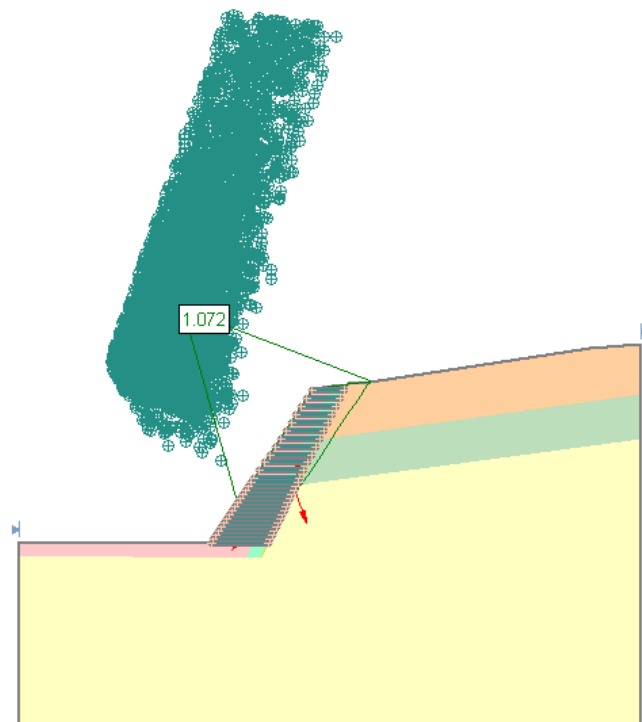
	FS	OPIS
V0	0,839	Varianta V4 iz Faze 2 brez drenažne palsti in plasti brizganega betona
V1	1,072	Varianta V4 iz Faze 2
V2	1,081	Geosintetik po celotni višini na 0,3 m z drenažno plastjo in plastjo brizganega betona
V3	1,095	Geosintetik do 1/2 višine na 0,3 m nato na 0,6 m, geosintetik uvihan
V4	1,098	Geosintetik do 1/2 višine na 0,25 m nato na 0,5 m
	<b>1,250</b>	Predpisani faktor varnosti

Po pričakovanjih so bile vrednosti varnostnega faktorja za poljubno drsno ploskev manjše od tistih, ki so bili izračunane za krožno- cilindrično drsno ploskev. Seveda predpisana vrednost varnostnega faktorja ni bila dosežena, zato so bili potrebni dodatni ukrepi, s katerimi smo nato prišli do ustrezne rešitve, ki je kasneje predstavljala tudi končno rešitev.

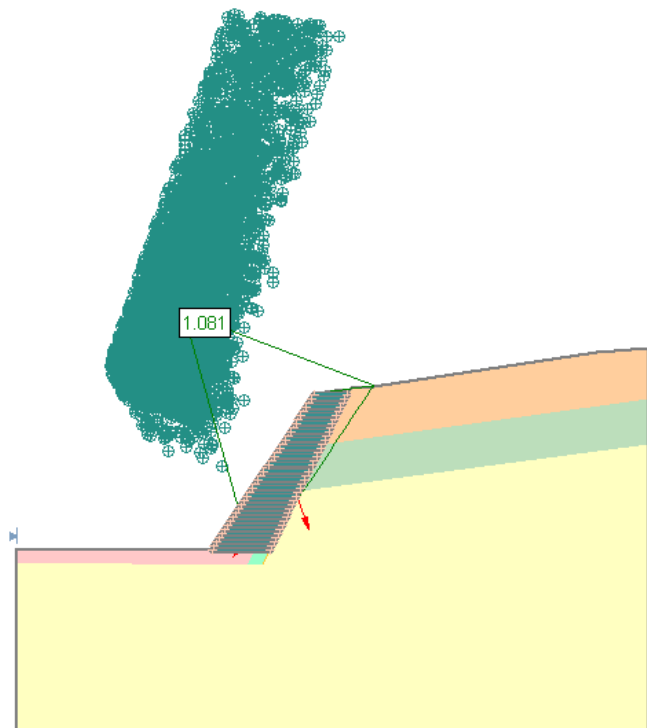


Slika 32: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 3)

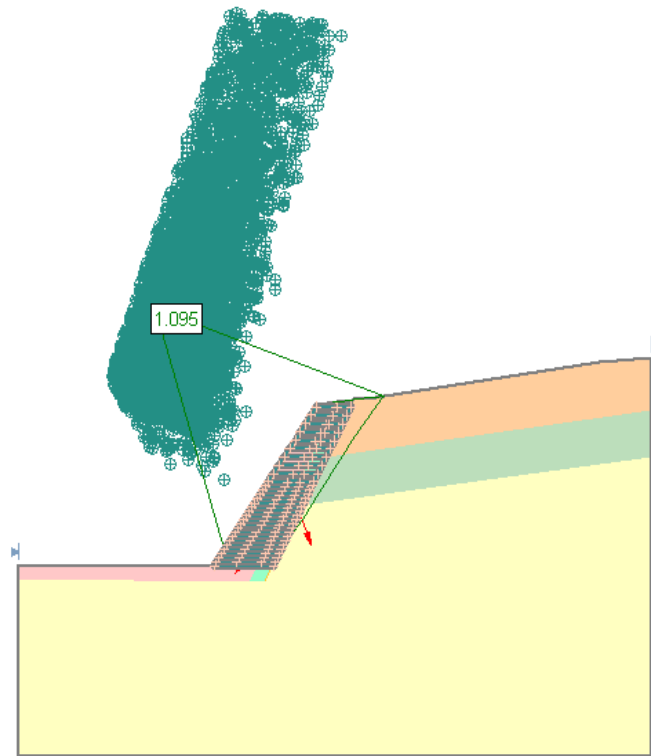




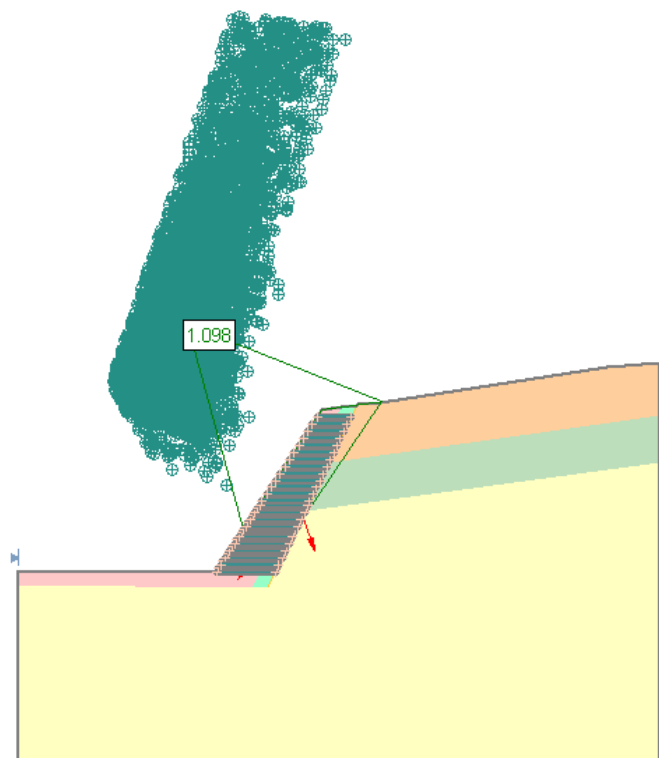
Slika 33: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 3)



Slika 34: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 3)



Slika 35: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 3)



Slika 36: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 3)

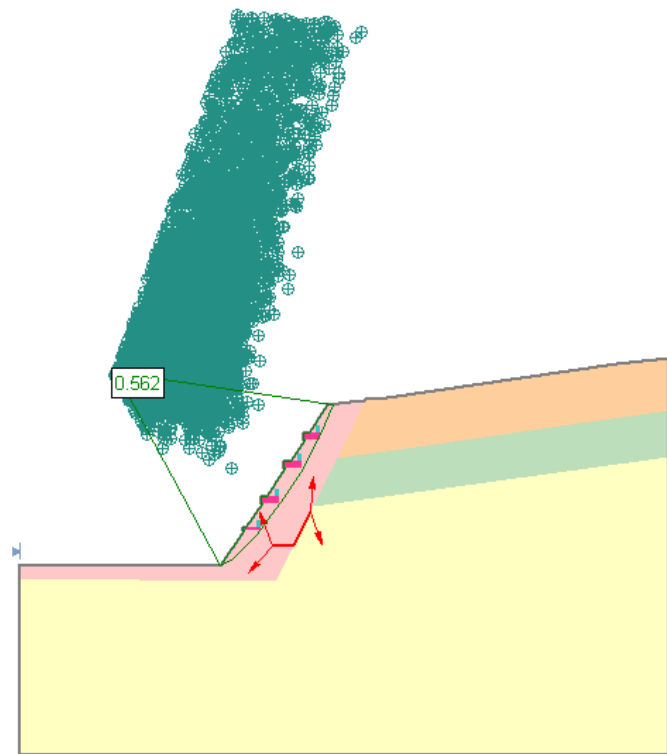
#### 4.2.4 Faza 4: Končna rešitev

V končni rešitvi je bil v izračunu upoštevan tudi naravni kamen, ki predstavlja del končnega izgleda varovalnega nasipa. Zaradi njegove razporeditve se je spremenila tudi razporeditev geosintetika, kar je nakazano že v varianti V4 v Fazi 3. Končna debelina plasti med posameznimi geosintetiki tako znaša 0,25 m oz. 0,5 m. Taka razporeditev se predvidi, ker ta ukrep bistveno poenostavi vgradnjo.

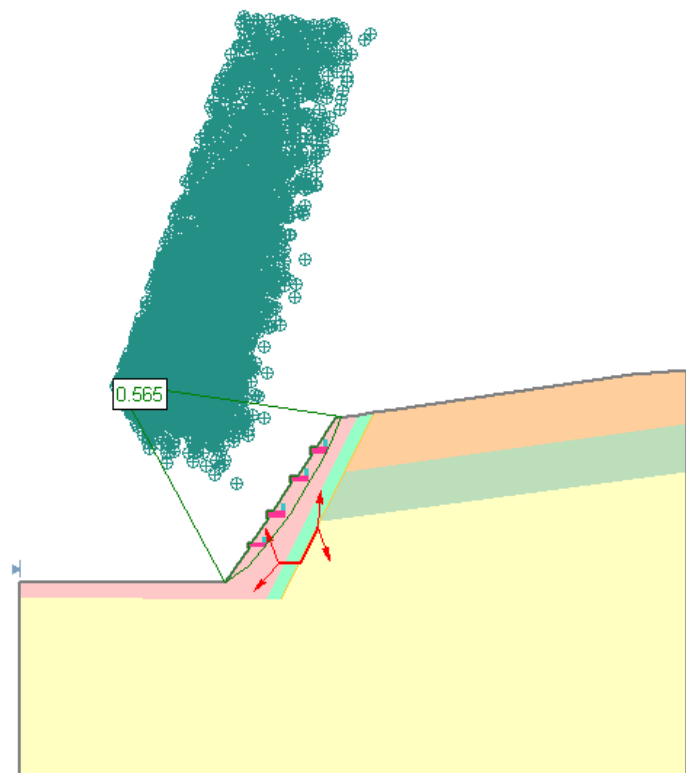
Preglednica 8: Vrednosti varnostnega faktorja v različnih variantah Faze 4

	FS	OPIS
V0	0,562	Začetna varianta, upoštevan naravni kamen, brez ostalih ukrepov
V1	0,565	Dodana plast brizganega betona in drenažna plast
V2	1,106	Dodan tudi geosintetik po celotni višini na 0,25 m
V3	1,106	Geosintetik do 1/2 višine na 0,25 m nato na 0,5 m
V4	<b>1,311</b>	Dodana še pasivna sidra
	<b>1,250</b>	Predpisani faktor varnosti

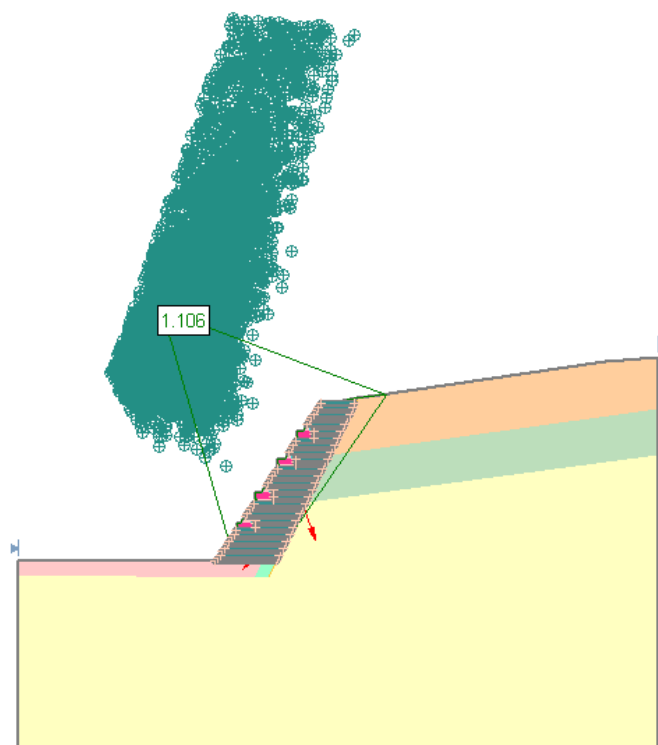
Izračuni so pokazali, da razporeditev geosintetika praktično ne vpliva na vrednost faktorja varnosti FS, kar je razvidno iz primerjave med rezultati v variantah V2 in V3 (Preglednica 8). V iskanju ustrezne končne rešitve je bila tako predvidena vgradnja pasivnih sider, ki predstavlja tisti ukrep, ki je zagotovil ustrezno vrednost faktorja varnosti FS.



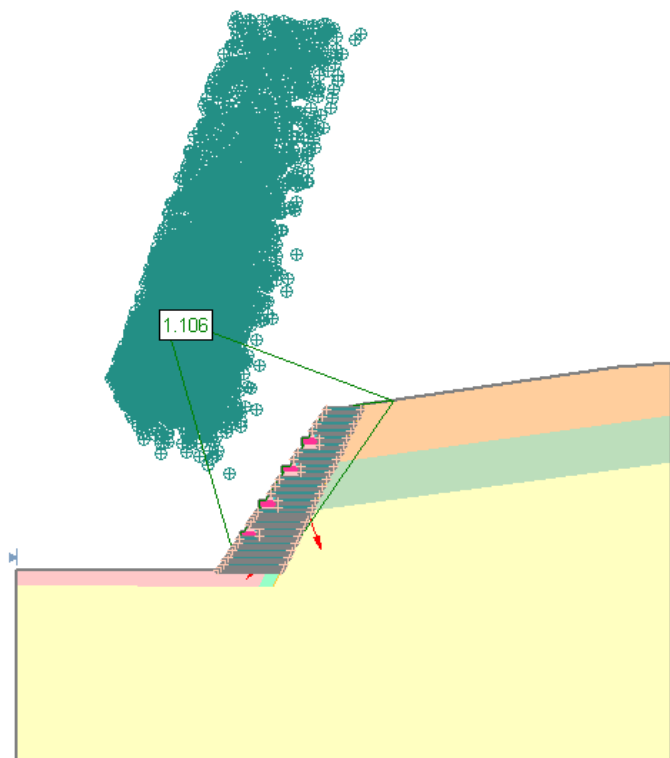
Slika 37: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V0- Faza 4)



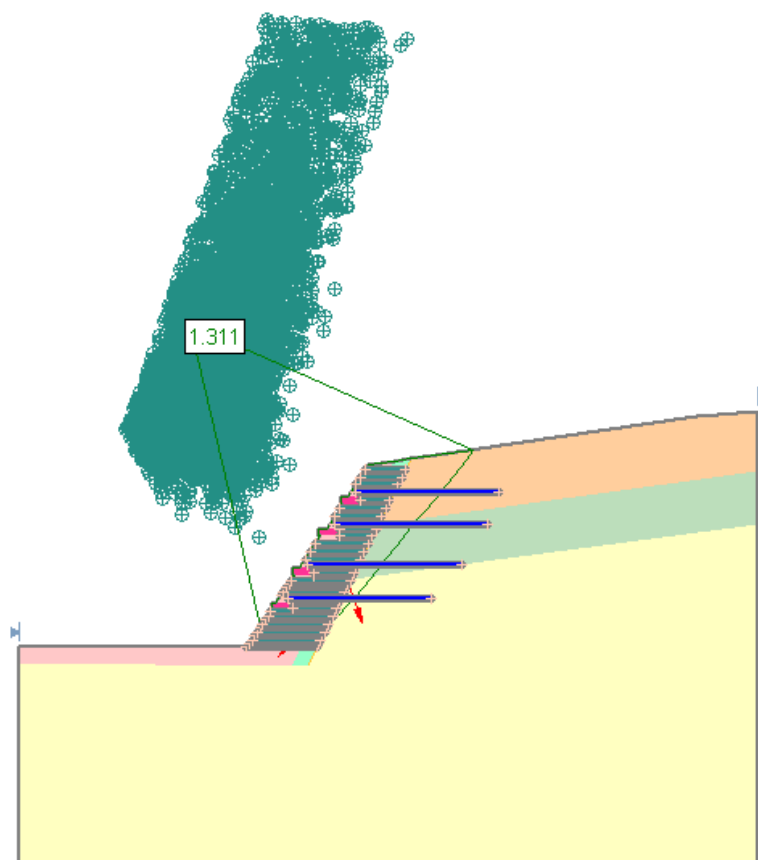
Slika 38: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V1- Faza 4)



Slika 39: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V2- Faza 4)



Slika 40: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V3- Faza 4)



Slika 41: Vrednost FS in kritična drsina (varianta V4- Faza 4)

#### 4.2.5 Ostali izračuni

V sklopu analize stabilnosti za profil P154 so bili poleg zgoraj opisanih opravljeni tudi nekateri drugi izračuni, pri katerih pa zaradi nižje višine brežin ni bilo posebnih težav pri zagotavljanju stabilnosti, kar je razvidno tudi iz rezultatov izračunov, ki so prikazani v spodnjih preglednicah. Postopki izračunov in ukrepi so bili enaki kot pri izračunu za kritični profil (P154 + 0.00) v Fazi 4, razen v levem profilu, kjer v izračunu niso bila upoštevana pasivna sidra, saj v tem delu zaradi geometrije nasipa, ki je razvidna iz slik karakterističnih profilov, niso bila potrebna.

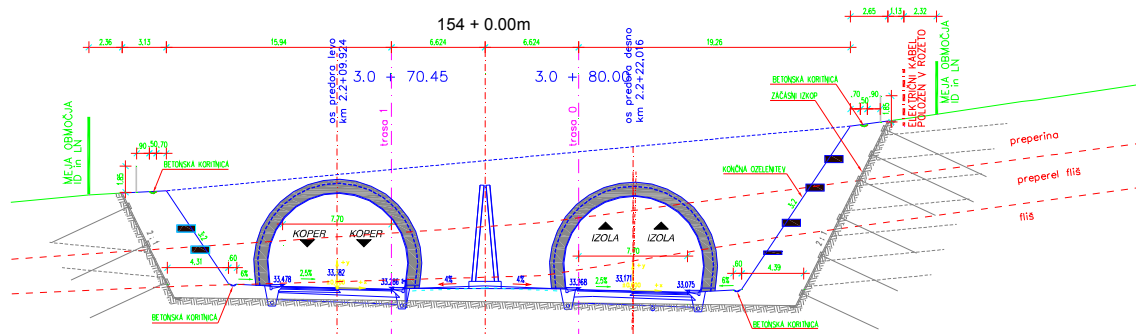
Preglednica 9: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P154

PROFIL	H [m]	FS
P154 + 0.00	12	1,311
P154 + 5.00	11,1	1,425
P154 + 10.00	10,4	1,256
P154 + 15.00	9,5	1,376

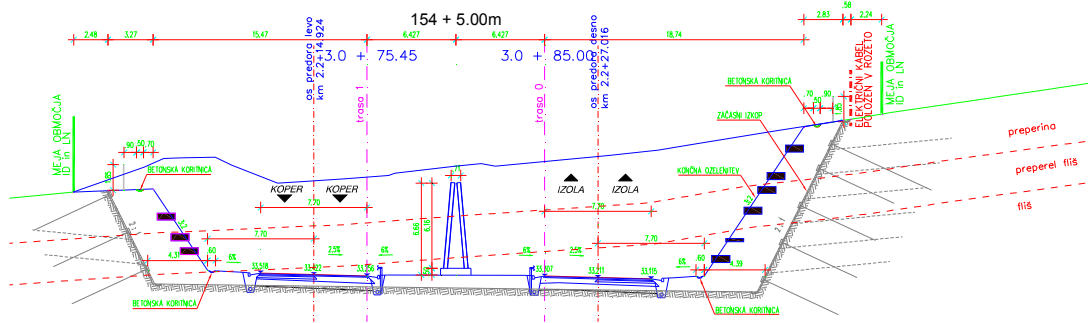
Preglednica 10: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P154

PROFIL	H [m]	FS
P154 + 0.00	6,5	1,372
P154 + 5.00	5,9	1,590
P154 + 10.00	5,3	1,747
P154 + 15.00	4,6	2,237

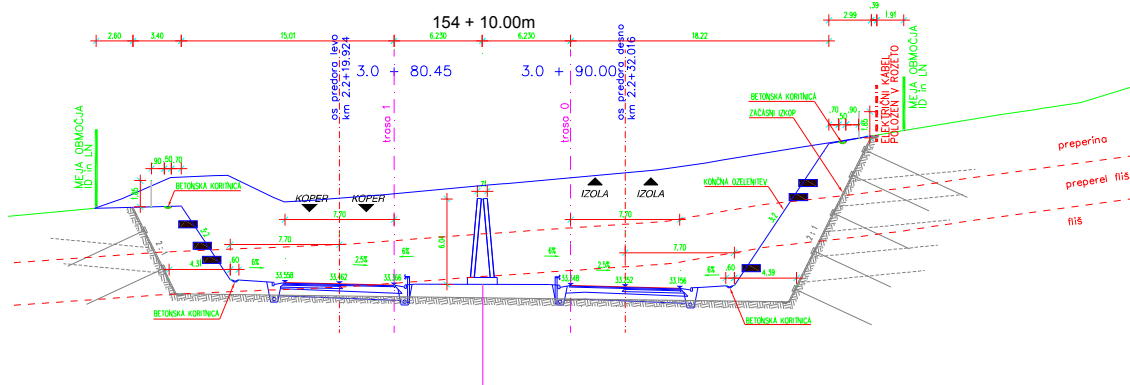
#### 4.2.6 Karakteristični profili



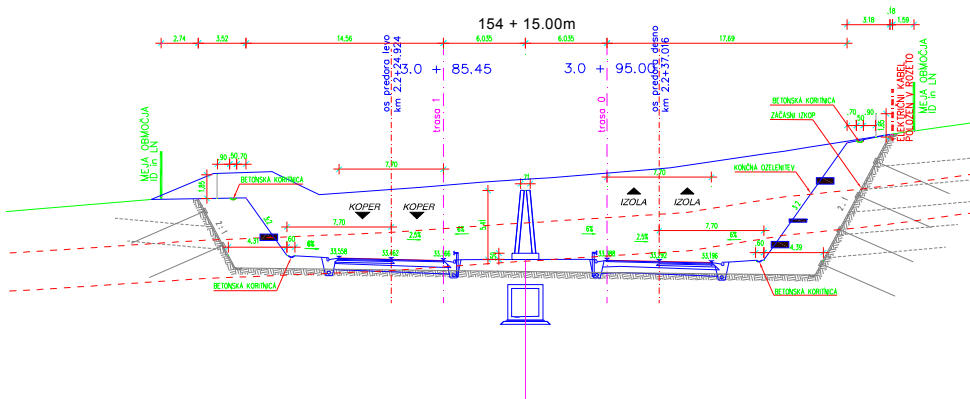
Slika 42: Karakteristični profil P154 + 0.00



Slika 43: Karakteristični profil P154 + 5.00



Slika 44: Karakteristični profil P154 + 10.00



Slika 45: Karakteristični profil P154 + 15.00



### 4.3 Izračuni za profile P155 in P156

#### 4.3.1 Rezultati izračunov

V spodnjih preglednicah so podani rezultati ostalih izračunov, ki so bili izvedeni za profile P155 in P156. Kot je že bilo omenjeno, v nobenem od preostalih profilov ni bilo pričakovati problemov z zagotavljanjem stabilnosti. Izračuni so to potrdili. Tudi v teh profilih so bili uporabljeni ukrepi iz Faze 4 izračuna za kritični profil (P154 + 0.00). Pasivna sidra v izračunu niso bila upoštevana v naslednjih profilih:

- levi del profila P155: P155 + 0.00, P155 + 05.00, P155 + 10.00, P155 + 15.00
- desni del profila P155: P155 + 15.00
- levi del profila P156: P156 + 00.00, P156 + 05.00, P156 + 10.00, P156 + 15.00
- desni del profila P156: P156 + 00.00, P156 + 05.00, P156 + 10.00, P156 + 15.00

Pasivna sidra niso bila upoštevana, ker v teh profilih zaradi njihove geometrije, ki je razvidna iz karakterističnih profilov, niso bila potrebna.

Preglednica 11: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P155

PROFIL	H [m]	FS
P155 + 0.00	8,7	1,364
P155 + 5.00	7,7	1,393
P155 + 10.00	6,7	1,524
P155 + 15.00	5,7	1,478

Preglednica 12: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P155

PROFIL	H [m]	FS
P155 + 0.00	4,1	2,026
P155 + 5.00	3,2	2,423
P155 + 10.00	2,7	2,963
P155 + 15.00	2,1	3,546

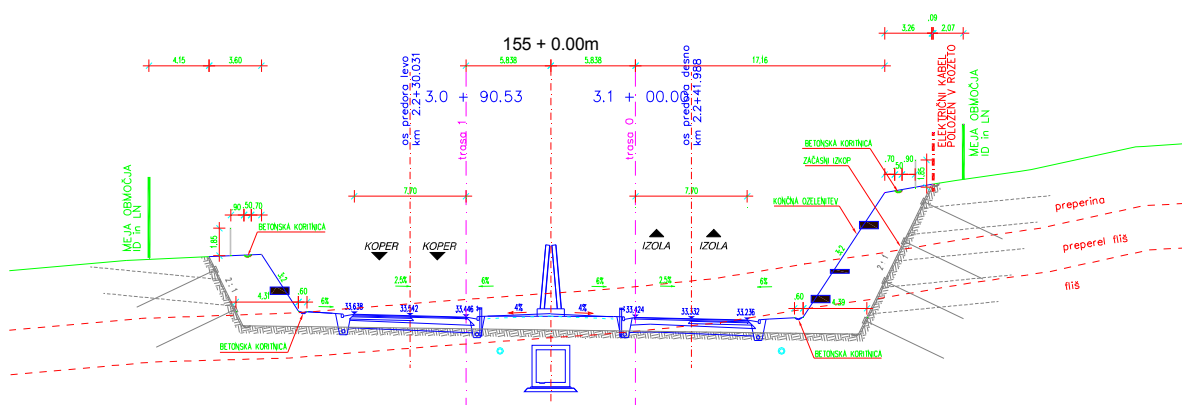
Preglednica 13: Vrednosti varnostnih faktorjev v desnem delu profila P156

PROFIL	H [m]	FS
P156 + 0.00	5,4	1,623
P156 + 5.00	4,5	1,696
P156 + 10.00	3,8	2,069
P156 + 15.00	2,9	1,651

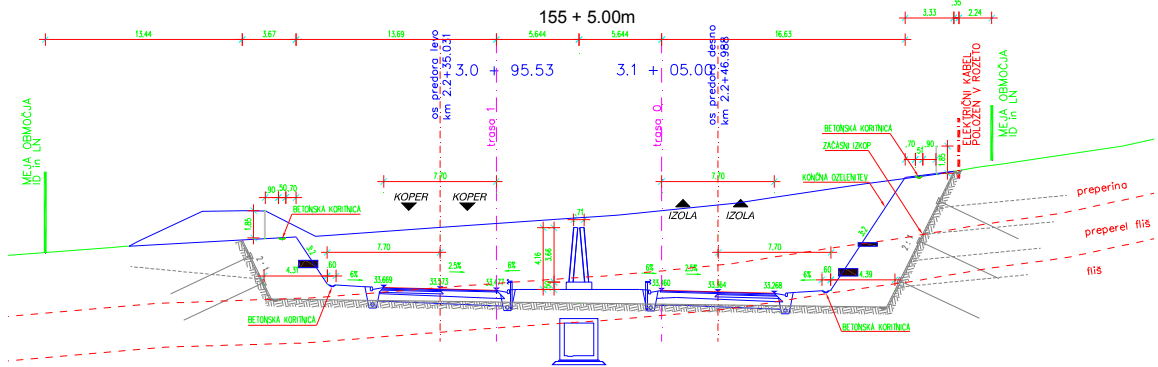
Preglednica 14: Vrednosti varnostnih faktorjev v levem delu profila P156

PROFIL	H [m]	FS
P156 + 0.00	1,6	/
P156 + 5.00	0,8	4,911
P156 + 10.00	0,5	1,881
P156 + 15.00	vkop	/

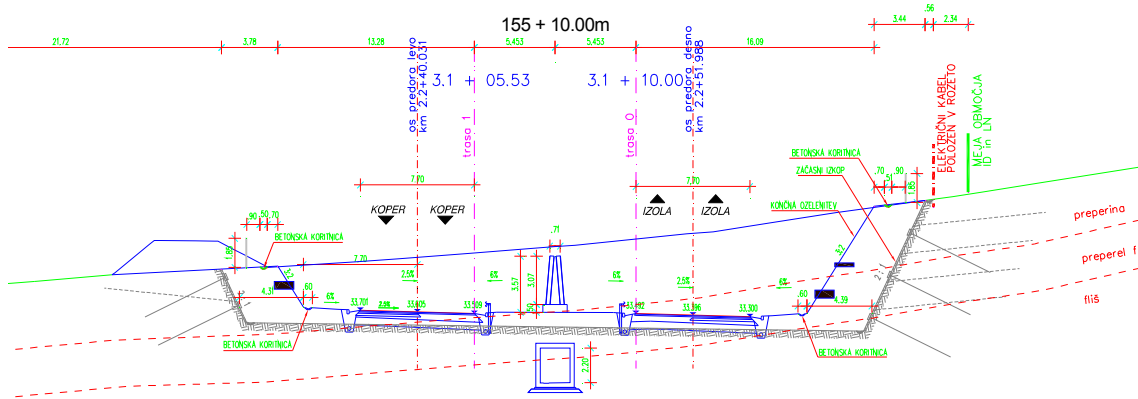
### 4.3.2 Karakteristični profili



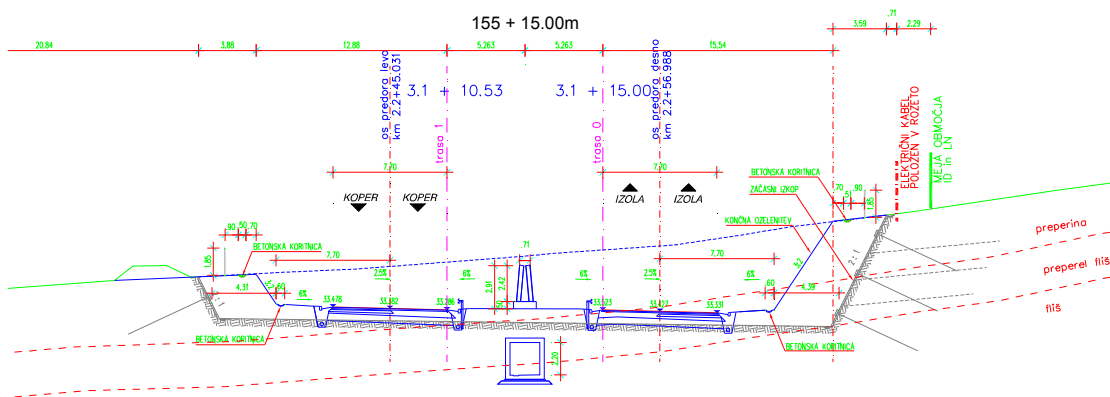
Slika 46: Karakteristični profil P155 + 0.00



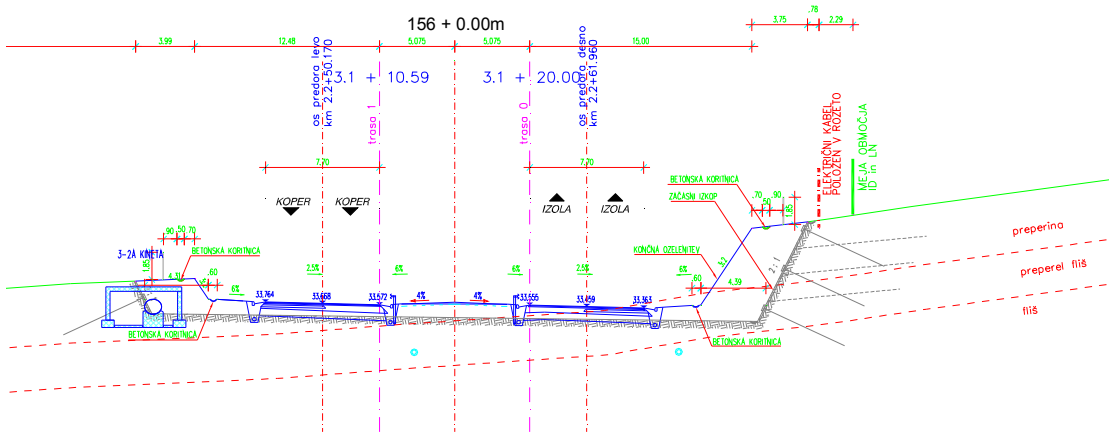
Slika 47: Karakteristični profil P155 + 5.00



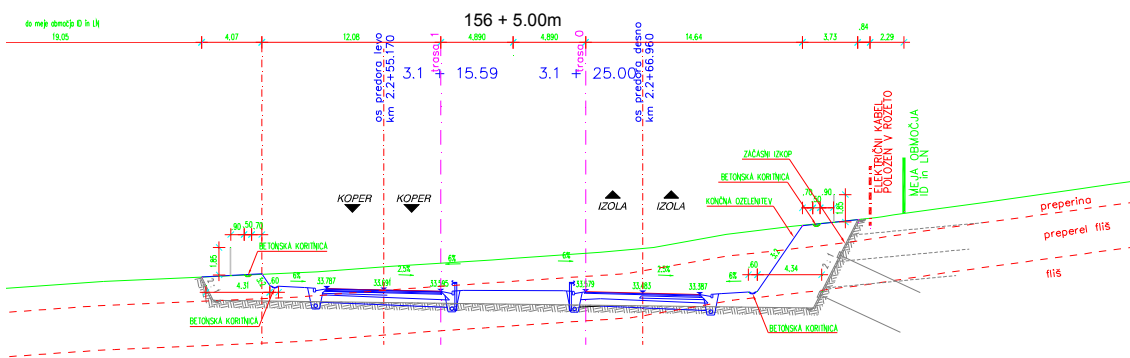
Slika 48: Karakteristični profil P155 + 10.00



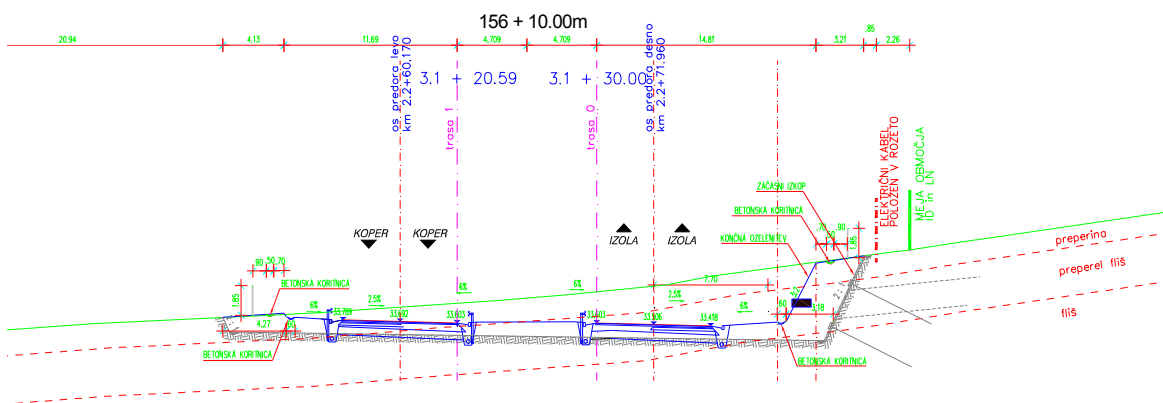
Slika 49: Karakteristični profil P155 + 15.00



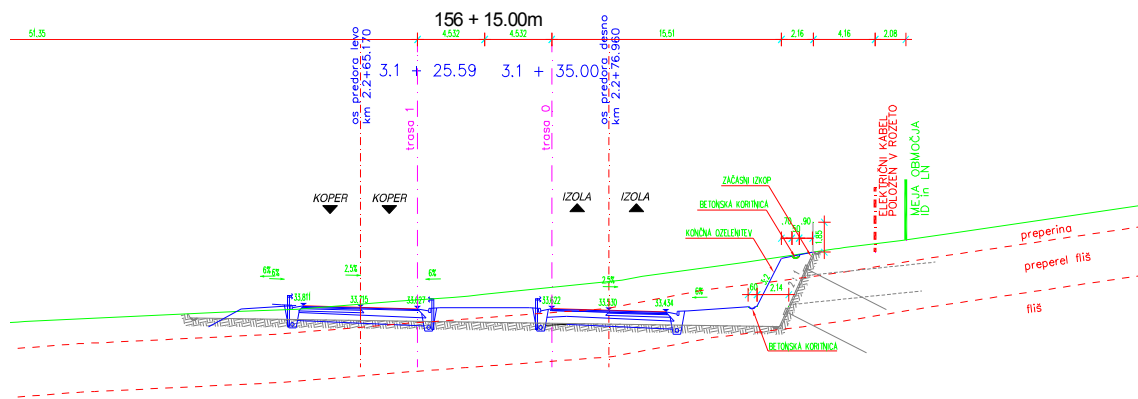
Slika 50: Karakteristični profil P156 + 0.00



Slika 51: Karakteristični profil P156 + 5.00



Slika 52: Karakteristični profil P156 + 10.00



Slika 53: Karakteristični profil P156 + 15.00

#### 4.4 Izračuni s programom Maccaferri Macstars 2000

Maccaferri Macstars 2000 je program podjetja Maccaferri, ki se ukvarja s proizvodnjo geosintetičnih materialov. Tako kot Slide, tudi ta program računa po metodi mejnih ravnovesij. Za izračun sta na voljo metodi Janbu- ja in Bishop- a. Račun je mogoče izvesti za krožno- cilindrične ali poljubne drsne ploskve. Program je zasnovan na osnovi numeričnih metod, opisanih v 2. poglavju.

Za izvedbo izračuna z omenjenim programom sem se odločila v želji primerjati rezultate obeh programov. Zato sem najprej določila brežino brez kakršnihkoli ukrepov (drenaža, uporaba geosintetika, ...) in izračunala vrednost varnostnega faktorja FS v obeh programih.

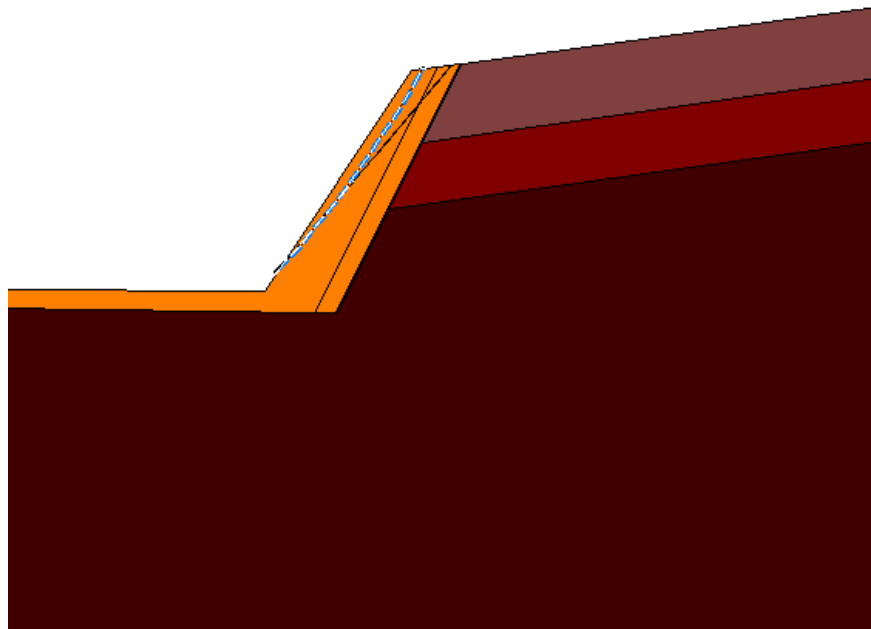
Rezultat je bil sledeč:

M. Macstars 2000 → FS= 0,613

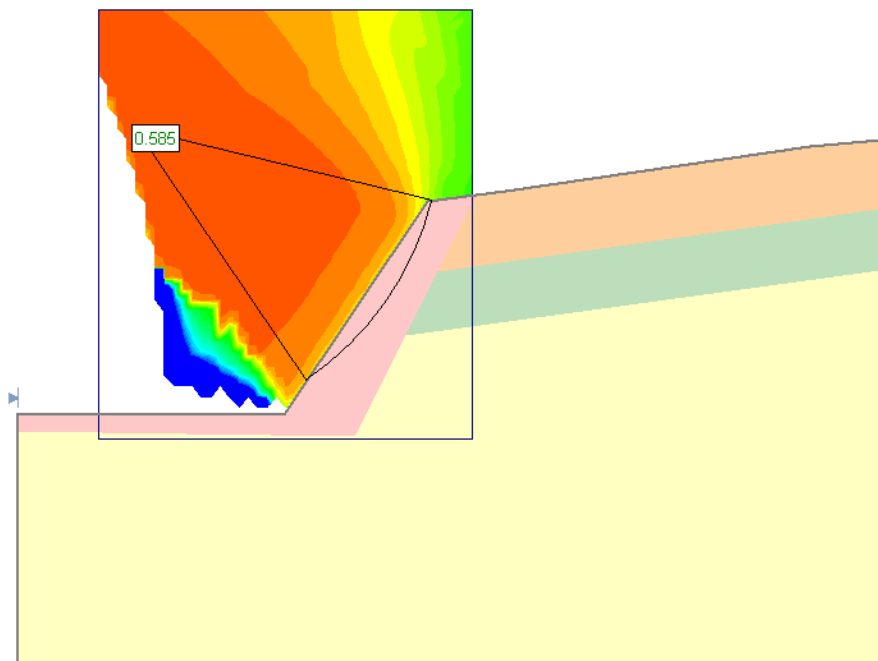
Slide → FS= 0,585

Rezultata sta bila dokaj enaka, če vzamemo v obzir, da do takih razlik lahko pride že, če v istem programu računamo z različnimi metodami. Kljub temu sem se želela prepričati, če so lahko rezultati obeh programov še bolj enaki. Na podlagi dobljene kritične drsine v programu Slide, v tem programu je določanje kritičnih drsin namreč popolnoma avtomatizirano, sem nato v programu Maccaferri Macstars 2000 uspela določiti take robne točke potencialnih kritičnih drsin, da je bil izračunani faktor varnosti FS praktično enak. Njegova vrednost je bila 0,586. Naj omenim, da na tem mestu velikost faktorja varnosti FS ni bila pomembna, cilj je bil namreč določiti odstopanja v rezultatih.

Global stability analysis (Calculation method : Rigid)  
SF = 0.613

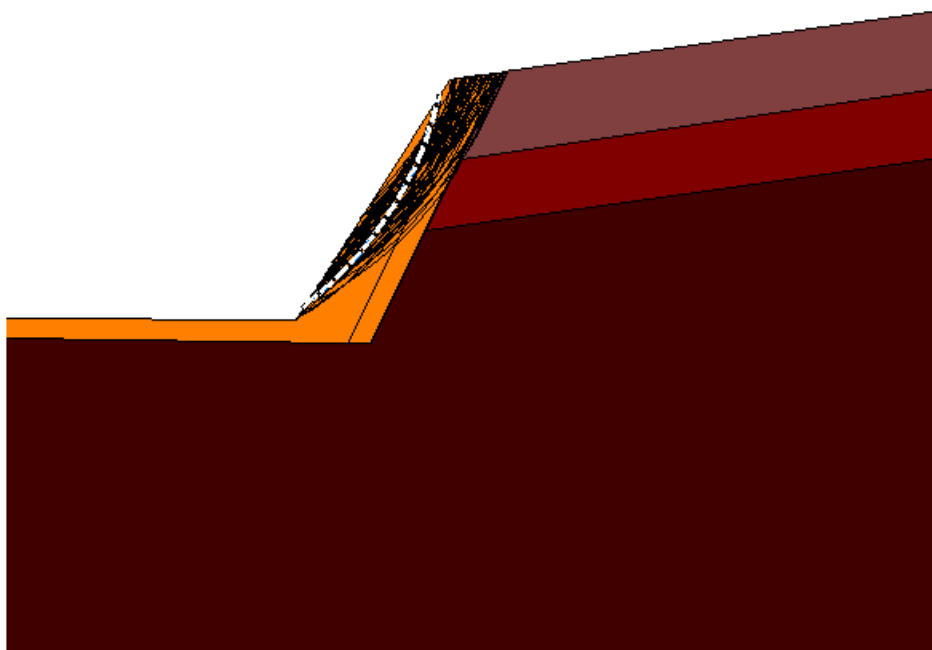


Slika 54: Prvotna kritična drsna ploskev (M. Macstars 2000)



Slika 55: Kritična drsna ploskev (Slide)

Global stability analysis (Calculation method : Rigid)  
SF = 0.586



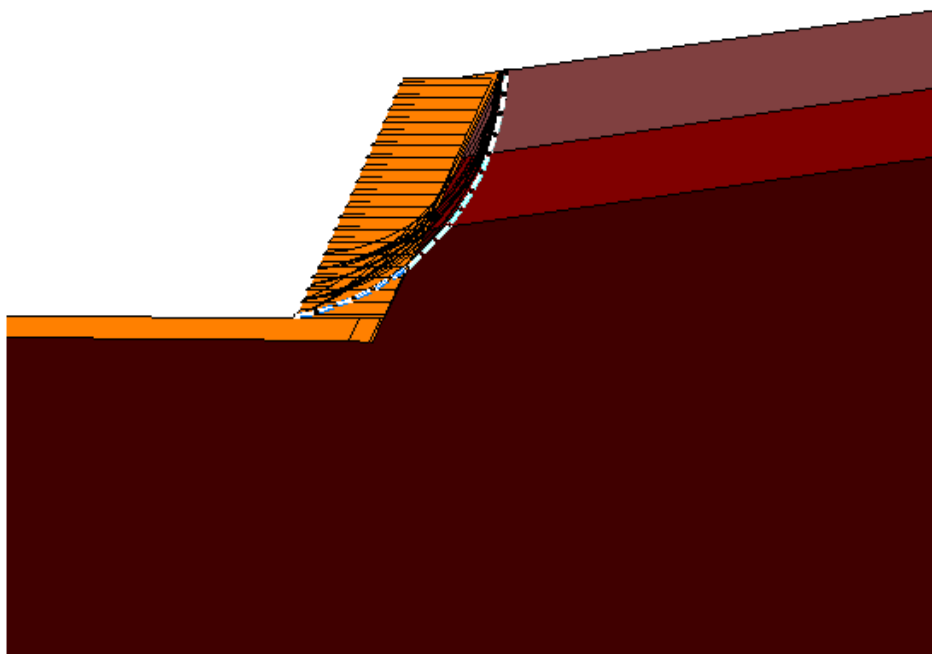
Slika 56: Popravljena kritična drsna ploskev (M. Macstars 2000)

Pomankljivost programa, ki to pravzaprav ni, če upoštevamo, da je to program proizvajalca geosintetičnih materialov, je ta, da le- ta ne dopušča možnosti uporabe poljubnih geosintetikov, ampak ima bazo lastnih proizvodov med katerimi nato uporabnik programa lahko izbira. Prav tako program ne dopušča proste izbire pri debelini plasti med posameznimi geosintetiki, ampak je le- ta določena z izbiro določenega proizvoda. Omejene so tudi možnosti glede naklona in širine nasipa iz armirane brežine. Program omogoča le 2 možna naklona in ne dopušča možnosti različne širine nasipa po višini. Na podlagi naštetih dejstev zato nadaljnja primerjava rezultatov žal ni imela več pravega smisla.

Na Sliki 57 je prikazan primer izračuna stabilnosti brežine z nasipom iz armirane zemljine.



Global stability analysis (Calculation method : Rigid)  
SF = 1.125



Slika 57: Izračun za nasip iz armirane zemljine (M. Macstars 2000)

#### 4.5 Povzetek rezultatov

Za izračun stabilnosti varovalnega nasipa iz armirane zemljine na območju zahodnega portala predora Markovec sem uporabila program Slide. Slide je zasnovan na numeričnih metodah, opisanih v 2. poglavju. V konkretnem primeru je bila za izračun uporabljena metoda Janbuja. Analize so bile v začetnih fazah izvedene za krožno- cilindrično drsno ploskev, v fazah, ki so sledile pa tudi za poljubno drsno ploskev. Podrobnejše analize so bile izvedene za profil P154, pri katerem so se zaradi njegove višine pojavili problemi pri zagotavljanju stabilnosti. Izračuni so bili izvedeni tudi za profile P155 in P156, ki pa so pokazali, da v omenjenih profilih ne bo posebnosti.

Torej, v začetnih fazah so bili izračuni narejeni za krožno- cilindrično drsno ploskev. Ker je bila kot stabilizacijski ukrep predvidena uporaba geosintetika, sem ustrezno vrednost faktorja varnosti FS skušala doseči z različnimi načini razporeditve le- tega v nasipu. Na začetku se je

vrednost varnostnega faktorja FS sicer večala, vendar pa v določenem trenutku ni več vplivala na rezultat. Zato so se predvideli še drugi ukrepi. Pred pričetkom izračunov v naslednji fazi pa je bila najprej optimizirana geometrija brežine in varovalnega nasipa. Spremembe pa niso bile drastične, saj bo nasip zgrajen na prostorsko zelo omejenem območju. V začetnih variantah Faze 2 sem ustrezne rezultate spet poizkušala dobiti z različnimi razporeditvami geosintetika v nasipu, kar mi je uspelo tako, da je bila predvidena vgradnja uvihanega geosintetika. Ker pa je tak način vgradnje precej zapleten, je bila izračunana še ena varianta, v kateri sta bili v izračunu upoštevani novi plasti in sicer drenažna plast in plast brizganega betona. Tudi v tem primeru je bil rezultat ugoden. Z optimizirano geometrijo brežine in nasipa ter ustrezno razporeditvijo geosintetika v nasipu oziroma upoštevanjem dodatnih materialov v nasipu, je bila za krožno- cilindrično drsno ploskev izračunana ustrezna vrednost faktorja varnosti FS. Z uporabo krožno- cilindrične drsne ploskve pa v izračunu ni bilo mogoče zajeti potencialne šibke točke sistema- stika med brežino in varovalnim nasipom. Zato se je v Fazi 3 izračun iz Faze 2 ponovil še za poljubno drsno ploskev. Le- ta je bila predpostavljena tako, da ni zajela nobenega geosintetika, pozicionirana je bila namreč v plasti med dvema geosintetikoma (Slika 31). Na ta način je bila gotovo predpostavljena najbolj kritična situacija, različna razporeditev geosintetika v nasipu pa zato ni imela več vpliva na faktor varnosti FS. To je privedlo do odločitve, da se predvidi vgradnja pasivnih sider, zaradi katerih je bila nato dosežena ustrezna vrednost faktorja varnosti FS in s tem tudi globalna stabilnost. Izračuni, ki so bili izvedeni za ostale profile, so potrdili, da v teh profilih ne bo večjih težav pri zagotavljanju stabilnosti in bo ta dosežena že z ustrezno razporeditvijo geosintetika v varovalnem nasipu.

Na podlagi opravljenih izračunov lahko na koncu podam naslednje zaključke:

- krožno- cilindrična drsna ploskev v konkretnem primeru ni bila primerna metoda, njena uporaba namreč ni zajela vseh potencialno neugodnih situacij,
- bolj primeren način analize je ponudila uporaba poljubne drsne ploskve, ki je na koncu privedla do rešitve, ki predvidi uporabo pasivnih sider- s tem se zagotovi globalna stabilnost sistema,
- vgradnja geosintetika v nasip zagotovi lokalno stabilnost le- tega,

- komercialni programi, ki jih ponujajo različni proizvajalci geosintetičnih materialov, se v zahtevnejših problemih stabilnosti kot je ta, izkažejo za popolnoma neustrezne saj ne ponujajo ustreznih orodij za rešitve problemov nestabilnosti.

## 5 ZAKLJUČEK

Danes si pri uresničevanju najrazličnejših ciljev pomagamo z najnaprednejšimi tehnološkimi dosežki. Gradbena panoga pri tem ni nobena izjema. Tako se je z uporabo računalnika bistveno poenostavil tudi postopek izračuna stabilnosti, ki je s tem postal dokaj enostaven in rutiniran postopek, ki ponuja večjo preglednost nad obravnavanim problemom in tudi večjo natančnost rezultatov. Vendar pa je potrebno poudariti, da je uporabnik računalnika oziroma računalniških programov tisti, ki določa parametre za izračun in je torej le on sam odgovoren za pravilnost računskih postopkov in korektnost rezultatov.

Praktično neomejene možnosti se ponujajo tudi pri razvoju in proizvodnji novih materialov. Razvoj sintetičnih materialov je namreč omogočil izredno raznovrstnost le- teh, s tem pa odprl tudi nove možnosti in področja za njihovo uporabo. Tak primer predstavljajo tudi geosintetiki in samo vprašanje časa je, kdaj se bo začela kontrolirana proizvodnja materialov, ki bodo imeli točno določene lastnosti in se bodo uporabili za točno določen namen. Že danes pa je jasno, da so sintetični materiali materiali prihodnosti. Njihova glavna prednost v primerjavi z naravnimi materiali je namreč v tem, da kažejo ustrezno večjo odpornost na različne degradacijske mehanizme. S tem pa je v kombinaciji z ustreznimi detajli in projektnimi izračuni zagotovljena tudi trajnost konstrukcij, v katerih so ti materiali uporabljeni. Nenazadnje pa tovrstne konstrukcije predstavljajo tudi bolj okolju prijazne rešitve.

Ko sem sodelovala pri načrtovanju podpornega nasipa zahodnega portala predora Markovec, sem se spoznala z vsemi prednostmi, ki jih ponuja moderno projektiranje. To seveda pomeni uporabo modernih računalniških programov in materialov, ki so danes na voljo na tržišču, kar je bila zame zelo pozitivna izkušnja. Poleg tega sem se naučila, da veliko pozornost velja posvetiti izbiri projektnih metod, saj je izbira le teh ključnega pomena za pravilnost oziroma ustreznost rezultatov, kar se je pokazalo tudi pri izračunih stabilnosti za omenjeni nasip, kjer se je uporaba krožno- cilindrične drsne ploskve izkazala za neustrezno in je pravo rešitev ponudila uporaba poljubne drsne ploskve. Previdnost pa velja tudi pri izbiri računalniških programov za izračun stabilnosti, ki jih je na trgu na voljo veliko. Previdnost velja predvsem

pri komercialnih programih, ki ponavadi ne ponujajo ustreznih metod za korekten izračun stabilizacijskih problemov.

Danes si ne predstavljamo več, da bi najrazličnejše probleme reševali brez uporabe računalnika oziroma računalniških programov, kar pa ne velja pri uporabi in izkoriščanju modernih materialov, ki so na voljo na tržišču. To velja tudi za geosintetike, katerih uporaba se je sicer v zadnjem času zelo povečala, še vedno pa ne izkoriščamo vseh možnosti, ki nam jih ponujajo. Odprtost za nove možnosti, ki se ponujajo, naj bo zato cilj vsakega dobrega inženirja. Le dobro zastavljen projekt, ki izkorišča vse vire in metode, ki so na voljo namreč zagotavlja, da bo projekt izpeljan korektno, okolju prijazno in nenazadnje tudi ekonomično.

## VIRI

Đulsić, A. 2010. Načini gradnje nasipov s strmimi brežinami. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 68 str.

Koerner, R. M. 1998. Designing with geosynthetics (Fourth edition), Upper Saddle River, New Jersey, Prentice- Hall. Inc: 761 str.

Logar, J., Geotehnične gradnje, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: Oporne in podporne konstrukcije, Ukrepi za izboljšanje stabilnostnih razmer

Majes, B., Mejna napetostna stanja v tleh- Stabilnostne analize, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 50 str.

Maksimović, M. M. 2001. Mehanika tla (Drugo izdanje), Beograd, Čigoja štampa: str.513-580.

Projektna dokumentacija načrtovanja gradnje nasipa iz armirane zemljine na območju zahodnega portala predora Markovec, december 2009, IRGO Consulting d.o.o.

SIST EN 1997-1 Evrokod 7: Geotehnično projektiranje- 1. del: Splošna pravila, 2005

Spletni viri:

Geosintetiki- ali jih znamo pravilno uporabljati?

<http://www.ravago.si/clanki.php> (14.12.2009)

Geosintetiki- naučimo se jih bolje uporabljati.

<http://www.ravago.si/clanki.php> (14.12.2009)

[www.dars.si](http://www.dars.si) (5.5.2010)