

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 program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

Lucijan Marodi

Analiza in sanacija plazu Prapretno

Diplomska naloga št.: 434

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. Sebastjan Kuder

Ljubljana, 23. 9. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Lucijan Marodi izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Analiza in sanacija plazu Prapretno«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Trbovlje, 13.9.2011

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 550.348.435(497.4Prapretno)(043.2)

Avtor: Lucijan Marodi

Mentor: izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor: asist. Sebastjan Kuder

Naslov: Analiza in sanacija plazu Prapretno

Obseg in oprema: 64 str., 10 graf., 29 sl., 17 pregl.

Ključne besede: plaz, sanacija, Slide 5.0, kamnita zložba, pilotna stena

Izvleček

Diplomsko delo obravnava plaz, ki prečka lokalno cesto v naselju Prapretno, v občini Hrastnik. V začetku diplomskega dela je predstavljena lokacija plazu in poškodbe, ki jih je plaz povzročil na cestišču in bližnji okolici. Predstavljena je tudi sanacija področja, ki je že bila izvedena in predstavlja idejno izhodišče za uporabljene sanacijske ukrepe pri analizah v diplomskem delu.

V nadaljevanju so predstavljene okvirne lastnosti zemljine na tem območju, dobljene s pomočjo sondažnih vrtin in standardnih penetracijskih testov. Na podlagi teh podatkov je izvedena povratna analiza za določitev natančnejših podatkov o lastnostih zemljin na terenu pred splazitvijo. Analiza je izvedena s pomočjo programa Slide 5.0, in sicer za tri možne vzroke splazitve: nizek vodostaj in slabe karakteristike zemljine, visok vodostaj in dobre karakteristike zemljin ter arteški vodostaj in dobre karakteristike zemljin. Na podlagi ugotovitev iz povratne analize so bili obravnavani različni ukrepi za sanacijo, zgornji del plazu se je saniral s kamnito zložbo, spodnji del pa s pilotno steno. Pri slednji sta bili obravnavani dve varianti pilotne stene in sicer v sidrani oz. konzolni izvedbi. Izvedena je bila optimizacija dimenzij posameznih podpornih ukrepov, skladno s standardom Evrokod 7.

Ob koncu diplomskega dela je izvršena tudi primerjava dimenzij in pomembnih karakteristik kamnite zložbe, sidrane pilotne stene in konzolne pilotne stene, za boljšo predstavbo vpliva posameznih predpostavljenih vzrokov splazitve na dimenzije konstrukcij.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 550.348.435(497.4Prapretno)(043.2)

Author: Lucijan Marodi

Supervisor: assoc. prof. Janko Logar, Ph.D.

Cosupervisor: asist. Sebastjan Kuder

Title: Working title: Stability analysis and remediation of Prapretno landslide

Notes: 64 p., 10 ch., 29 pic., 17 tab.

Key words: landslide, remediation, Slide 5.0, packed rockfill, pile wall

Abstract

The focus of my diploma thesis is the landslide crossing the local road in Prapretno village, the town of Hrastnik. In the introductory part of the thesis, the location of the slide and the damage it caused to the road surface and the nearby area are presented. Presentation of the landslide remediation which had already been carried out and which presented the grounds for the remedial practices used for the analyses presented in the thesis is also included in the introductory part.

In continuation, basic characteristics of the area and its soil, gained through the use of boreholes and standard penetration testing, are presented. On the basis of gained data, back analysis, the aim of which is to gather detailed characteristics of the soil in the area prior to the slide, is carried out. The analysis is carried out with the use of the Slide 5.0 programme and examines three possible cases affecting the original slope stability and therefore causing a slide: low water level and weak soil characteristics, high water level and good soil characteristics and artesian water and good soil characteristics. Data gained from the analysis were used for the dimensioning of remedial measures which envisage stabilisation of the upper part of the slide with the use of a packed rockfill, while the bottom with the use of a pile wall. The latter is either an anchor pile wall system or an embedded pile wall system. Optimisation of individual supporting systems' dimensions was carried out in accordance with the Eurocode 7 standard.

In the concluding parts of the thesis, a comparison of the packed rockfill, anchor pile wall and embedded pile wall dimensions and important characteristics is presented with a purpose to provide a more clear understanding of the contributing factors causing a slide, as well as their impact on the constructions' dimensions.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge bi se rad zahvalil mentorju prof. J. Logarju in somentorju asist. S. Kudru, ki sta mi s svojimi izkušnjami in strokovnim znanjem pomagala pri premagovanju ovir na katere sem naletel med izdelavo diplomske naloge.

Zahvalil bi se tudi staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija s finančno in moralno podporo pomagala doseči cilj, ki sem si ga zadal z vpisom na študija gradbeništva.

Posebna zahvala pa gre mojemu dekletu Metki in hčerki Izabeli, brez katerih bi mi težko uspelo. Podpirali sta me v težkih trenutkih študija in med izdelavo diplomske naloge. Vedno sta mi znali znova vrniti nasmeh na obraz in me spraviti v dobro voljo.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Opis problema	1
1.2	Namen, smisel in cilji diplomske naloge.....	3
1.3	Metoda dela.....	4
2	OPIS SESTAVE TAL, GEOTEHNIČNIH RAZISKAV IN IZVEDENE SANACIJE	5
2.1	Geotehnične raziskave	5
2.2	Sestava tal.....	5
2.3	Geotehnične karakteristike materialov	9
2.4	Izvedeni sanacijski ukrepi	11
3	UPORABLJENE METODE	14
3.1	Povratna analiza	14
3.2	Metode za izračun zemeljskih pritiskov, določanje in preverjanje dimenzij kamnite zložbe in pilotne stene	14
3.2.1	Metode za izračun zemeljskih pritiskov.....	14
3.2.2	Metode za preverjanje dimenzij kamnite zložbe.....	16
4	POVRATNA ANALIZA	21
4.1	Izhodišča povratne analize	21
4.2	Varianta 1: Nizek vodostaj in slabše karakteristike zemljine.....	21
4.3	Varianta 2: Visok vodostaj in boljše karakteristike zemljine	23
4.4	Varianta 3: Arteška voda	24
4.5	Ugotovitve povratnih analiz	25
5	SANACIJSKI UKREPI	26
5.1	Princip sanacije	26
5.2	Pogoji sanacije in opis privzetih računskih modelov	26
5.3	Varianta 1: Nizek vodostaj in slabše karakteristike zemljine.....	28
5.3.1	Kamnita zložba	28

5.3.2	Sidrana stena	32
5.3.3	Konzolna stena	38
5.4	Varianta 2: Visok vodostaj in boljše karakteristike zemljine.	43
5.4.1	Kamnita zložba	43
5.4.2	Sidrana stena	47
5.4.3	Konzolna stena	50
5.5	Varianta 3: Arteška voda.	52
5.5.1	Kamnita zložba	52
5.5.2	Sidrana stena	56
5.5.3	Konzolna stena	59
6	PRIMERJAVA IN KOMENTAR REZULTATOV	61
7	ZAKLJUČEK	63
8	UPORABLJENI VIRI	64
8.1	ELEKTRONSKI VIRI	64

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristike zemljin pri Varianti 1	22
Preglednica 2: Karakteristike zemljin pri Varianti 2	23
Preglednica 3: Karakteristike zemljin pri Varianti 3	24
Preglednica 4: Primerjava karakteristik.....	25
Preglednica 5: Vplivi na kamnito zložbo-nizek vodostaj.....	30
Preglednica 6: Zemeljski pritiski zadaj - nizek vodostaj.....	32
Preglednica 7: Zemeljski pritiski pred konstrukcijo - nizek vodostaj	32
Preglednica 8: Projektne karakteristike-nizek vodostaj.....	36
Preglednica 9: Vplivi na kamnito zložbo - visok vodostaj.....	45
Preglednica 10: Zemljski pritiski za konstrukcijo - visok vodostaj.....	47
Preglednica 11: Zemeljski pritiski pred konstrukcijo - visok vodostaj	47
Preglednica 12: Vplivi na kamnito zložbo-visok vodostaj.....	54
Preglednica 13: Zemeljski pritiski za konstrukcijo-arteška voda.....	56
Preglednica 14: Zemeljski pritiski pred konstrukcijo-arteška voda	56
Preglednica 15: Primerjava dimenzij kamnite zložbe	61
Preglednica 16: Primerjava dimenzij sidrane pilotne stene.....	62
Preglednica 17: Primerjava dimenzij konzolne pilotne stene.....	62

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Obremenitve sidrane pilotne stene – Varianta 1	33
Grafikon 2: Momentne obremenitve sidrane stene.....	34
Grafikon 3: Prečne sile v sidrani pilotni steni	35
Grafikon 4: Obremenitve konzolne pilotne stene – Varianta 1	39
Grafikon 5: Momentne obremenitve konzolne pilotne stene	40
Grafikon 6: Prečne sile v konzolni pilotni steni	40
Grafikon 7: Obremenitve sidrane pilotne stene - Varianta 2.....	48
Grafikon 8: Obremenitve konzolne pilotne stene - Varianta 2.....	51
Grafikon 9: Obremenitve sidrane pilotne stene - Varianta 3.....	57
Grafikon 10: Obremenitve konzolne pilotne sten - Varianta 3.....	60

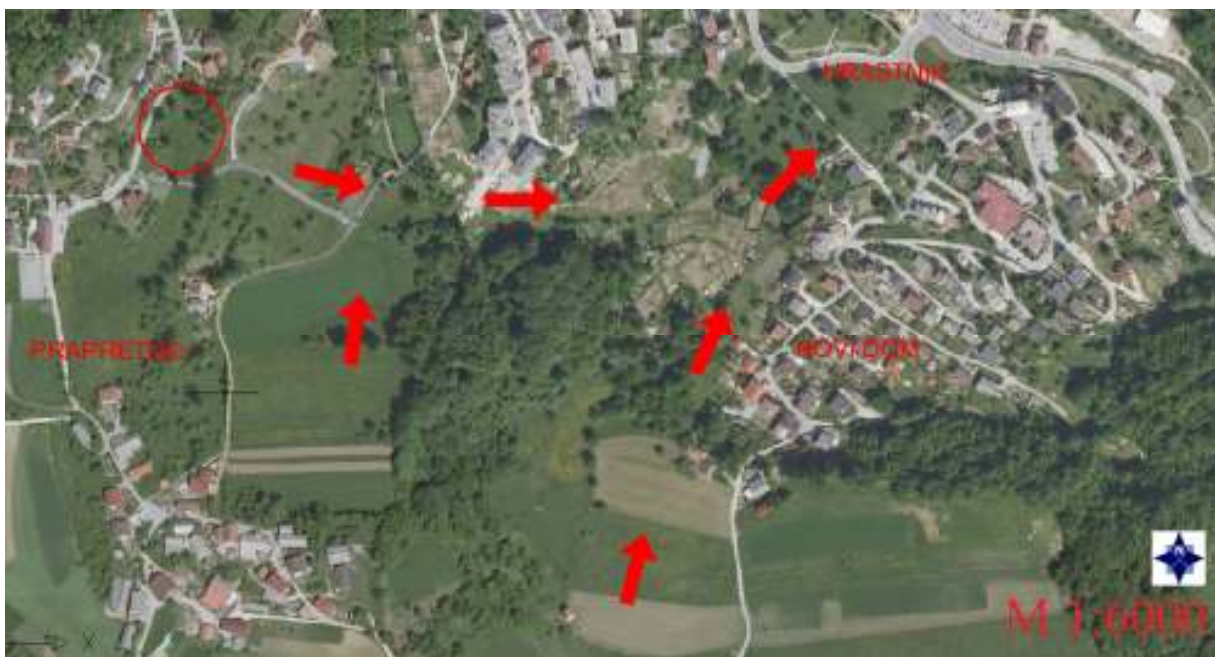
KAZALO SLIK

Slika 1: Celoten plaz.....	1
Slika 2: Lokacija plazu	2
Slika 3: Poškodbe vozišča	3
Slika 4: Položaj sondažnih vrtin	6
Slika 5: Vrtina 2.....	7
Slika 6: Vzдолžni profil	7
Slika 7: Plazenje nad cesto	8
Slika 8: Pilotna stena	12
Slika 9: Sanacija območja.....	13
Slika 10: Ponazoritev spremenljivk v enačbah.....	20
Slika 11: Osnovno stanje - nizek vodostaj.....	21
Slika 12: Osnovno stanje - visok vodostaj.....	23
Slika 13: Osnovno stanje - arteška voda.....	24
Slika 14: Kamnita zložba-sloji-nizek vodostaj.....	29
Slika 15: Računski model za presojo kamnite zložbe-nizek vodostaj.....	29
Slika 16: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 1	32
Slika 17: Sidrana pilotna stena - Varianta 1	36
Slika 18: Sidrana pilotna stena – Varianta 1: krožne drsine.....	37
Slika 19: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 1	38
Slika 20: Konzolna pilotna stena - Varianta 1	41
Slika 21: Konzolna pilotna stena – Varianta 1: krožne drsine	42
Slika 22: Kamnita zložba-sloji-visok vodostaj.....	44
Slika 23: Računski model za presojo kamnite zložbe-visok vodostaj.....	44
Slika 24: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 2	47
Slika 25: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 2	50
Slika 26: Kamnita zložba-sloji-arteška voda	53
Slika 27: Računski model za presojo kamnite zložbe-arteška voda.....	53
Slika 28: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 3	56
Slika 29: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 2.....	59

1 UVOD

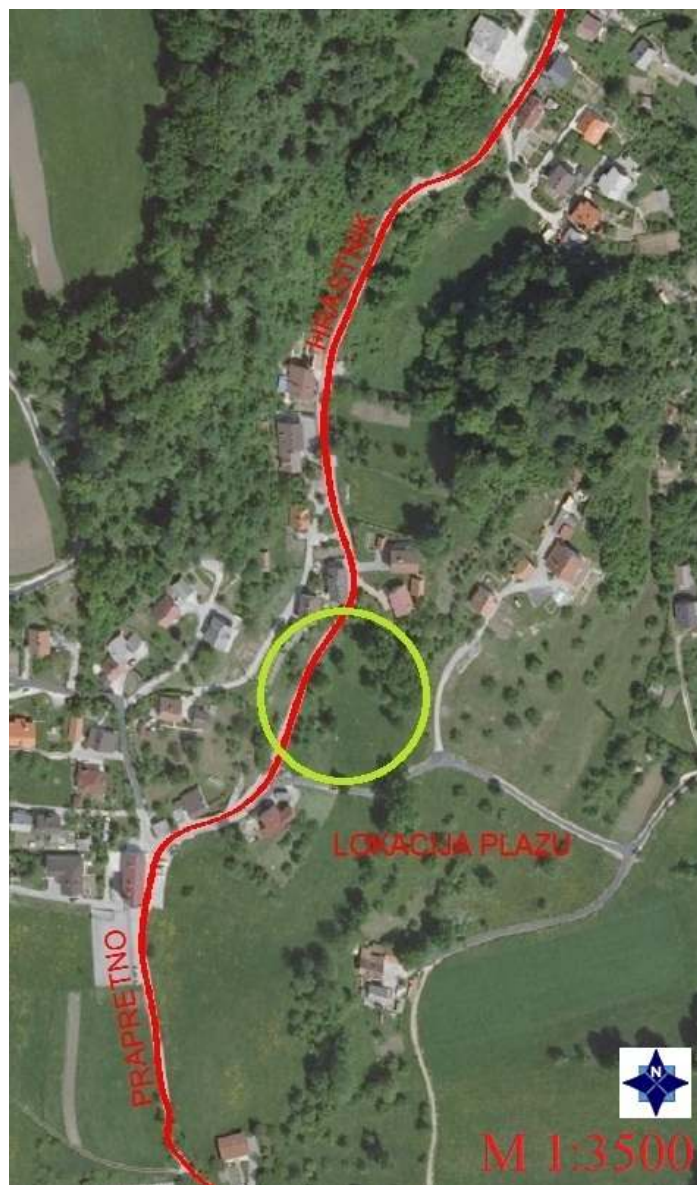
1.1 Opis problema

V občini Hrastnik je bil že leta 1969 evidentiran obsežen plaz, katerega zahodni krak je v dolžini cca 40 m poškodoval lokalno cesto v pobočju pod naseljem Prapretno. Spodnji del plazu je bil kasneje delno saniran z dreniranjem. V zgornjem delu je plaz razdeljen v dva kraka, ki potekata vsak po svoji dolini oziroma širši grapi. Odlomna robova obeh plazov se postopno širita navzgor po pobočju. Tako je leta 1999 odlomni rob južnega kraka plazu poškodoval cesto Novi dom - Prapretno.



Slika 1: Celoten plaz

V zadnjih letih pa se je močno posedla tudi cesta Hrastnik – Prapretno. S terenskim ogledom je bilo ugotovljeno, da je bila to posledica razširitve zahodnega kraka plazu po pobočju navzgor.



Slika 2: Lokacija plazu

Ob nadaljevanju plazenja je bila vprašljiva prevoznost ceste. Poleg ceste pa je zahodni krak plazu ogrožal tudi najmanj štiri stanovanjske objekte.



Slika 3: Poškodbe vozišča

V prvi fazi je bilo potrebno sanirati dovozno cesto, ki se nahaja v zgornjem delu plazu in stabilizirati vsaj ta del plazovitega pobočja.

1.2 Namen, smisel in cilji diplomske naloge

Namen te diplomske naloge je analizirati vzroke za nastanek plazu na lokalni cesti Hrastnik-Prapretno, ki je postopoma ogrozil prevoznost ceste in objekte v njegovi bližini.

V tem diplomskem delu se bomo omejili le na del plazu, ki je ogrozil prevoznost ceste, čeprav je to le zahodni krak večjega plazu, ki je bil evidentiran že pred časom in tudi že delno saniran.

Cilj diplomske naloge je predstaviti možne sanacije področja glede na različno predpostavljene vzroke za splazitev. Primerjal se bo vpliv različnih vzrokov za splazitev na dimenzije konstrukcij, s katerimi bi se lahko področje saniralo. Na zgornji strani ceste je predvidena kamnita zložba višine 3,9 m in različnih debelin, na spodnji strani ceste pa pilotna

stena s premerom pilotov 1 m in različnimi globinami. Debelina kamnite zložbe in globina pilotne stene je odvisna od predpostavljenih vzrokov za splazitev.

1.3 Metoda dela

Na podlagi vzrokov za nastanek plazu smo izvedli povratno analizo stanja ob splazitvi. V geološkem poročilu ni bil jasno naveden vzrok splazitve, zato smo povratno analizo izvedli vzporedno za tri možne vzroke splazitve. Povratno analizo smo izvajali s pomočjo programa Slide 5.0. V program smo vnesli geometrijo terena, nato pa karakteristike zemljin in vodostaj spreminjali toliko časa, da smo dobili drsino, ki je v skladu z nakaznimi deformacijami na terenu in ima vrednost faktorja varnosti drsine povsem blizu 1.

S preizkusi na terenu se je ugotovil precej nizek vodostaj, zato smo v prvem primeru kot vzrok za splazitev predpostavili nizek vodostaj in posledično nizke karakteristike zemljine. Te preiskave so bile izvedene v sušnem obdobju, torej gre realno pričakovati bistveno višji vodostaj, zato smo v drugem primeru povratne analize kot možen vzrok splazitve predpostavili bistveno višji vodostaj skupaj z bistveno višjimi karakteristikami zemljine. V tretjem primeru smo predpostavili enak vodostaj kot v drugem, vendar smo upoštevali arteško vodo in temu primerne materialne karakteristike. Na osnovi rezultatov vseh treh različic povratnih analiz smo izračunali aktivne zemeljske pritiske, ki predstavljajo obremenitev na konstrukcijo, in pasivne zemeljske pritiske, ki predstavljajo odpor, ki ga zemljina nudi konstrukciji. Glede na velikost zemeljskih pritiskov smo dimenzionirali debelino kamnite zložbe in globino pilotov v pilotni steni. S pomočjo obeh konstrukcij se bo območje saniralo in obnovila funkcionalnost ceste.

2 OPIS SESTAVE TAL, GEOTEHNIČNIH RAZISKAV IN IZVEDENE SANACIJE

2.1 Geotehnične raziskave

Večino informacij o opisu sestave tal, geotehničnih raziskavah tal in izvedenih ukrepih sanacije smo črpali iz geološko geotehničnega poročila o pogojih sanacije plazu in načrta gradbenih konstrukcij za sanacijo plazu, ki ju je izdelalo podjetje Ozzing d.o.o., Trbovlje.

Na območju poškodovane ceste so se tla preiskala s petimi sondažnimi vrtinami globine od 6,0 do 7,0 m, ki so vse segle v trdno podlago.

V vrtinah so bili izvedeni preizkusi standardne penetracije (SPT), za ugotovitev konsistenčnega stanja koherentnih in stopnje gostote nekoherentnih zemljin. Rezultati SPT so se iz vrednotili po Evrokodu 7 in so se upoštevali pri določitvi geotehničnih karakteristik materialov. Podtalna voda je bila ugotovljena le v eni vrtini, vendar je potrebno upoštevati, da je bilo vrtnanje izvedeno v izredno sušnem obdobju.

Za natančnejše podatke o lastnostih zemljin se je izvršil odvzem in popis jeder iz vrtin. Za natančnejšo računsko analizo področja je bilo izvršeno tudi terensko kartiranje, s katerim so se predvsem ugotavljali odlomni robovi.

2.2 Sestava tal

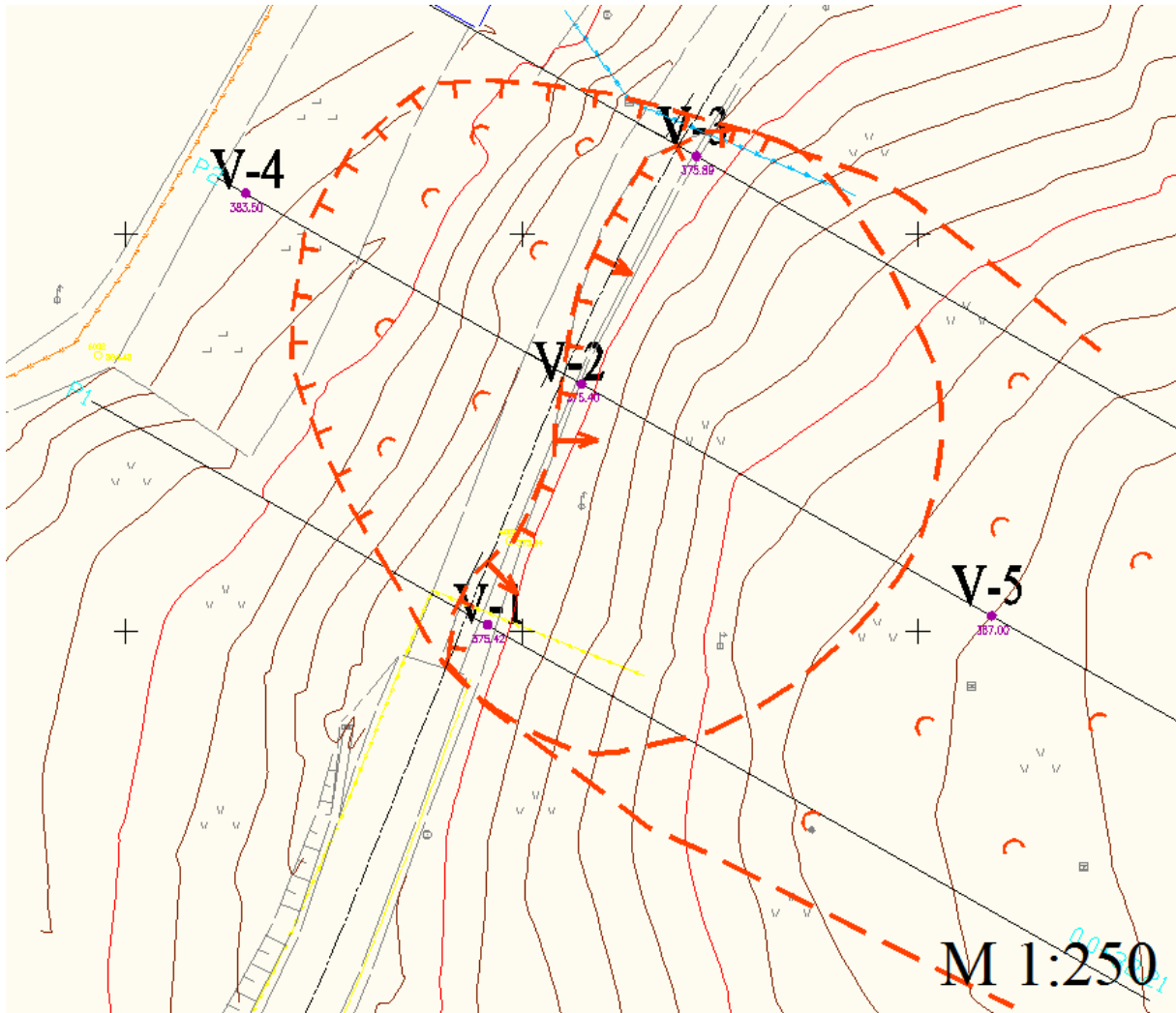
Na območju plazu gradijo podlago sarmatski skladi, ki so razviti kot siva laporasta glina z vložki peščenjaka in konglomerata. Laporasta glina je na površini prekrita z debelejšo plastjo glinene preperine, ki ima precej neugodne geotehnične karakteristike zlasti na razmočenih področjih, zato so v njej pogosti plazovi.

Po obstoječih geoloških podatkih je bil obsežnejši plaz v preperini sarmatske gline, ki poteka po srednje nagnjenem pobočju od Prapretnega do križišča v centru mesta (Slika 1), evidentiran že leta 1969. Spodnji del plazu je bil kasneje saniran z dreniranjem, podatkov o tem, ali se je plaz po sanaciji umiril, pa ni na razpolago.

Na lokalni cesti je bil jasno viden odlomni rob aktivnega plazu v dolžini 40 m s precejšnjim posedkom (cca. 30 cm, slika 3), vendar pa je bil odlomni rob plazu s posednim terenom in

znaki plazovitosti nakazan tudi v pobočju nad cesto (slika 7). Prav tako je tudi pobočje pod cesto kazalo znake razmočenosti in plazenja.

V območju poškodovane lokalne ceste so se tla preiskala s petimi sondažnimi vrtnami.



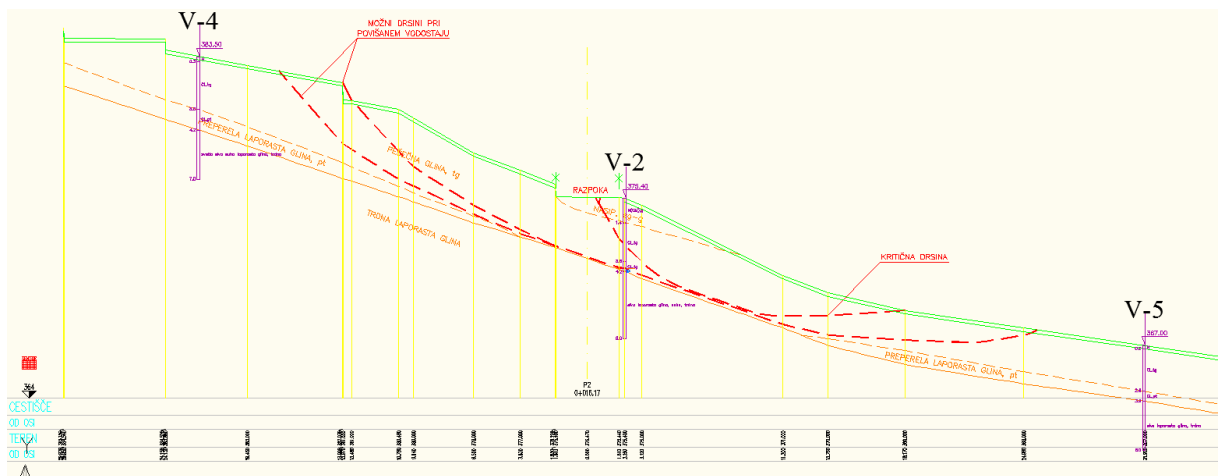
Slika 4: Položaj sondažnih vrtnin

Najbolj reprezentativna vrtina:



Slika 5: Vrtina 2

Najbolj reprezentativen vzdolžni profil:



Slika 6: Vzdolžni profil

Trdna svetlo siva laporasta glina, ki predstavlja sarmatske plasti, je bila ugotovljena na globini od 3,2 do 5,0 m pod površino. Nad trdno podlago je bila v vseh vrtnah, razen V-2, ugotovljena še plast poltrdne preperelo laporaste gline svetlo rjave do sive barve, debeline do 2,2 m. Nad preperelo laporasto glino oziroma neposredno nad trdno glino v V-2, je bila ugotovljena svetla rjava do rjavo peščena glina, ki je precej vlažna. V območju ceste je bila ta plast prekrita s cestnim nasipom, ki ga je gradil grušč z meljnim in delno tudi glinenim vezivom, srednje gost do gost.

Podtalna voda je bila ugotovljena le v V-2 in sicer na globini 4,2 m, na kontaktu med peščeno glino in trdno laporasto glino. Vrtanje je bilo izvedeno v izredno sušnem obdobju, glede na konfiguracijo terena pa je podtalnico pričakovati tudi višje.

V območju plazu cesta prečka plitvejšo grapo, v katero se steka podtalna in površinska voda, ki razmaka peščeno glino in poslabšuje njene geotehnične karakteristike ter povzroča plazenje, kar je jasno vidno na terenu.



Slika 7: Plazenje nad cesto

Drсна plast se najverjetneje pojavlja v sloju poltrdne laporaste gline, vendar ni povsem jasno določena.

2.3 Geotehnične karakteristike materialov

Na podlagi izvedenih vrtin so bili ugotovljeni štiri različni sloji, ki sestavljajo zemljino na območju, kjer lokalna cesta prečka plaz. Na površju je bil cestni nasip, ki je gradil vozno konstrukcijo cestišča, pod nasipom pa so se v različnih debelinah, glede na položaj vrtin, ugotovili sloji **težkognetne** peščene gline, **poltrdne** preperete laporaste gline in **trdne** laporaste gline. Lastnosti posameznih slojev so se določile s pomočjo standardnih penetracijskih testov.

Nasip:

EC7 – klasifikacija: GM, GC

To je cestni nasip, debeline do 1,4 m, svetlo sivega do svetlo rjavega dolomitnega grušča z meljnim in delno tudi z glinenim vezivom. Ponekod grušč vsebuje tudi večje samice. Zemljina je pretežno srednje gosta do gosta.

Terenske preiskave:

- SPT: $N = 36$ (vrednotenje po Evrokod-7: $N_{60} = 47,3$)
v območju samice: $P = 60/5\text{cm}$ (vrednotenje po Evrokod-7: $N_{60} = 386,6$)

Ugotovljene vrednosti:

- prostorninska teža: $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
- strižna trdnost: $\varphi = 34^\circ$, $c = 0$
- modul stisljivosti : $M_v = 20\,000\text{--}30\,000 \text{ kN/m}^2$
- kategorija izkopa: 3.-4. kategorija (lahka do težka zemljina)

Peščena glina:

EC7 – klasifikacija: CL

To je svetlo rjava do rjava peščena glina z vložki drobnega grušča, precej vlažna, težko gnetne konsistence. Debelina sloja znaša od 4,2 m do 2,2 m, nahaja pa se na površju tik pod humusom oz. pod nasipom.

Terenske preiskave:

- ročni penetrometer: $q_u' = 150 - 200 \text{ kN/m}^2$)
- SPT: $N = 8 - 14$ (vrednotenje po Evrokod-7: $N_{60} = 10,5 - 13,8$)

Ugotovljene vrednosti:

- prostorninska teža: $\gamma = 18 - 20 \text{ kN/m}^3$
- strižna trdnost: $\varphi = 20 - 24^\circ$, $c = 0 - 7 \text{ kN/m}^2$
- modul stisljivosti: $M_v = 8800 - 12000 \text{ kN/m}^2$
- kategorija izkopa: 3. kategorija (lahka zemljina)

Preperela laporasta glina:

EC7 – klasifikacija: CL

To je svetlo rjava do svetlo siva peščena, precej preperela laporasta glina, poltrdne konsistence, ponekod tudi trdna. Nahaja se pod slojem peščene gline, na globini 4,2 m do 2,2 m, debelina sloja pa znaša od 1,2 m do 0,6 m.

Terenske preiskave:

- SPT: $N = 33 - 129$ (vrednotenje po Evrokodu-7: $N_{60} = 29,5 - 117,2$)

Ugotovljene vrednosti:

- prostorninska teža: $\gamma = 20 - 21 \text{ kN/m}^3$
- strižna trdnost: $\varphi = 20 - 30^\circ$, $c = 0 - 7 \text{ kN/m}^2$
- modul stisljivosti: $M_v = 25\,000 - 50\,000 \text{ KN/m}^2$
- kategorija izkopa: 3. - 4. kategorija (lahka do težka zemljina)

Laporasta glina:

To je svetlo siva do siva laporasta glina, trdna. Nahaja se pod slojem preperele laporaste gline torej na globini približno 5,4 m do 2,8 m.

Terenske preiskave:

- SPT: od $N = 97$ do $P = 60/5\text{cm}$ (vrednotenje po Eurocode-7: $N_{60} = 29,5 - 117,2$)

Ugotovljene vrednosti:

- prostorninska teža: $\gamma = 22 - 23 \text{ kN/m}^3$
- strižna trdnost: $\varphi = 30 - 35^\circ, c = 0 - 20 \text{ kN/m}^2$ *
- kategorija izkopa: 4. – 5. (težka zemljina do mehka kamnina)

* Komentar k strižnim karakteristikam laporaste gline. Vrednost strižnega kota je ocenjena razmeroma visoko, kohezija pa nizko. Čeprav bi bilo razmerje med vrednostma lahko bolj v korist kohezije, smo obdržali vrednosti, ki sta podani v geološko-geotehničnem poročilu (Ozzing, d.o.o., 2009). Strižna trdnost tega materiala je v obeh primerih bistveno višja kot pa v slojih peščene gline in preperele laporaste gline.

2.4 Izvedeni sanacijski ukrepi

Glede na ugotovljeno sestavo tal in konfiguracijo terena se je cesta sanirala z izvedbo pilotne stene pod cesto. Ker je bilo tudi pobočje nad cesto nestabilno, pilotna stena ne bi stabilizirala drsin z izrivom ob vznožju cestnega vkopa, zato se je brežina zavarovala z oporno kamnito zložbo.

Dolžina pilotne stene na zunanji strani ceste je 80 m. Izvedlo se je 19 pilotov, katerih dolžina je znašala 9 m, premer 1 m, v trdno podlago pa so se uvrtili približno 5 m. Izvedeni so bili v razmaku 3 m ter na vrhu povezani z AB gredo. Pred pilotno steno se je izvedla vzdolžna drenaža z dnem v prepereli laporasti glini in iztokom v obstoječo kanalizacijo.

Pilotna stena nima povsem ravne oblike, tako v vertikalni kot v horizontalni smeri (Slika 8 in Slika 9). V horizontalni smeri se os vzdolž konstrukcije dvakrat lomi, z namenom prilagajanja liniji terena. V vertikalni smeri pa je sredinski del konstrukcije nekoliko nižji, saj je na tem mestu urejen iztok v obstoječo kanalizacijo iz novozgrajene drenaže pred pilotno steno.



Slika 8: Pilotna stena

Kamnita zložba na vkopni strani je dolga 60 m. Temeljenje zložbe ni bilo možno v trdni podlagi, zato se jo je temeljilo vsaj 2 m pod niveleto ceste v težko gnetni peščeni glini. V dnu temelja zložbe se je izvedla drenaža, ki bo preprečevala dvig vodostaja v pobočju nad cesto. Z izvedbo drenaže naj bi se tudi izboljšale geotehnične karakteristike peščene glin in s tem povečala stabilnost plitvejših drsin v pobočju nad cesto. Brežina nad kamnito zložbo se je uredila v blagem naklonu – 1 : 2.



Slika 9: Sanacija območja

3 UPORABLJENE METODE

3.1 Povratna analiza

S povratno analizo smo želeli priti do podatkov o začetnem stanju na območju splazitve, ob upoštevanju različnih vzrokov za splazitev. Povratno analizo smo izvajali s pomočjo programa Slide 5.0.

Slide je program za preračunavanje stabilnosti drsin, predvsem preračunavanje varnosti drsin in možnosti porušitve krožnih in poligonalnih drsin v zemljini in kamnitih pobočjih. S programom se lahko razmeroma hitro in preprosto obdelajo dokaj kompleksni modeli, saj je sam program razmeroma preprost za uporabo. V modelu se lahko upošteva tudi zunanja obtežba, podtalna voda in različne podpore.

S programom se lahko analizirajo posamezne drsne površine, lahko pa z uporabo iskalnih metod določimo najbolj kritično drsino pobočja. S programom se lahko izvajajo deterministične analize, s pomočjo katere se lahko izračuna varnostni faktor, lahko pa se izvajajo tudi verjetnostne analize, ki nam kot rezultat podajo verjetnost porušitve.

S pomočjo programa Slide 5.0 smo prišli do ustreznih karakteristik zemljin in na podlagi teh podatkov izračunali zemeljske pritiske na oporne in podporne konstrukcije sanacijskih ukrepov. Bolj podroben prikaz sledi v poglavju 4.

3.2 Metode za izračun zemeljskih pritiskov, določanje in preverjanje dimenzij kamnite zložbe in pilotne stene

3.2.1 Metode za izračun zemeljskih pritiskov

Pri izračunu zemeljskih pritiskov na kamnito zložbo smo uporabljali metodo po Rankinu za ravno zaledje in nagnjeno zaledje;

Ravno zaledje:

$$p_a = \sigma' k_a - 2c\sqrt{k_a} \quad (1.01)$$

$$p_p = \sigma' k_p + 2c\sqrt{k_p} \quad (1.02)$$

$$k_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.03)$$

$$k_p = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.04)$$

Nagnjeno zaledje:

$$p_b = \gamma \cdot z \cos \beta \quad (2.01)$$

$$p_a = K_a p_b - 2c\sqrt{K_a} \quad (2.02)$$

$$K_a = \left(\frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'}\right)^2 \quad (2.03)$$

$$p_p = K_p p_b + 2c\sqrt{K_p} \quad (2.04)$$

$$K_p = \left(\frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'}\right)^2 \quad (2.05)$$

$$K_p = 1/K_a \quad (2.06)$$

Pri izračunu zemeljskih pritiskov na pilote smo poleg metode po Rankinu za nagnjeno zaledje in ravno zaledje uporabili tudi grafično metodo iz Evrokoda 7:

$$\sigma_a(z) = K_a^{gr} [\gamma \cdot z + q] - 2c\sqrt{K_a^{gr}} \quad (3.01)$$

$$\sigma_p(z) = K_p^{gr} [\gamma \cdot z + q] + 2c\sqrt{K_p^{gr}} \quad (3.02)$$

$$K_a^{gr} \left(\frac{\delta}{\varphi'}, \frac{\gamma}{\varphi'}, \varphi'\right) \quad (3.03)$$

$$K_p^{gr} \left(\frac{\delta}{\varphi'}, \frac{\gamma}{\varphi'}, \varphi'\right) \quad (3.04)$$

Pri izračunu zemeljskih pritiskov na pilote smo morali uporabiti dve različni metodi za nagnjeno zaledje, saj se v primeru, ki smo ga obdelali, pojavi problem, ki z metodo po Rankine-u ne bi bil zadovoljivo rešen. Ta metoda namreč ne omogoča izračuna sile aktivnega pritiska za negativen naklon pobočja in sile pasivnega pritiska za pozitiven naklon pobočja, medtem ko grafična metoda le-to omogoča. Ustrezna K_a in K_p smo odčitali iz grafa, ki ustreza razmerju $\delta/\varphi' = 0,66$ in iz linije na grafu, ki predstavlja $\beta/\varphi' = 0,60$.

3.2.2 Metode za preverjanje dimenzij kamnite zložbe

- Preverjanje statične stabilnosti kamnite zložbe:

Pri izračunu stabilnosti smo za negativni vpliv upoštevali vsoto momentov, ki ju na skrajno točko konstrukcije (točka A, slika 14) povzročata vertikalna in horizontalna komponenta aktivnega pritiska. Vsoto momentov smo množili z varnostnim faktorjem $\gamma_{G,DST} = 1,1$.

Prevrnitvi nasprotuje moment, ki ga na skrajno točko povzroča lastna teža konstrukcije. Ta moment smo množili z varnostnim faktorjem $\gamma_{G,STB} = 0,9$.

$$M_{prev,d}^A < M_{odp,d}^A \quad (4.01)$$

$$(M_{aH,k}^A + M_{aV,k}^A) \cdot \gamma_{G,DST} < M_G \cdot \gamma_{G,STB} \quad (4.02)$$

- Odpornost kamnite zložbe na zdrs:

Pri preverjanju odpornosti na zdrs smo upoštevali, da zdrs povzroča le horizontalna komponenta sile aktivnega pritiska. Vrednost sile smo pomnožili s faktorjem $\gamma = 1,35$.

Zdrs konstrukcije se upirata sila pasivnega pritiska in sila trenja v temeljni ploskvi, ki jo povzročata lastna teža konstrukcije in vertikalna komponenta sile aktivnega pritiska. Pri sili lastne teže smo upoštevali karakteristično vrednost ($G_k = G_d$), vertikalno komponento sile aktivnih pritiskov pa smo množili s faktorjem $\gamma = 1,35$. Obe projektni vrednosti smo sešteli in množili s tangensom strižnega kota zemljine ($\tan\varphi'$). Na ta način smo dobili silo trenja, ki smo

jo morali še deliti z varnostnim faktorjem $\gamma_{R,H} = 1,1$. Tej sili smo še prišteli silo pasivnega pritiska, ki smo jo delili s faktorjem $\gamma = 1,4$. Vsota predstavlja celotno silo, ki se upira zdrsu konstrukcije.

$$E_{aH,d} < N_d \cdot \text{tg}\varphi / \gamma_{R,H} + E_{p,d} \quad (5.01)$$

$$N_d = G_D + E_{aV,d} \quad (5.02)$$

- Lega rezultante

S pomočjo enačb smo poiskali lego rezultante in ugotovili, ali je celoten temelj tlačno obremenjen (mala ekscentričnost), oziroma ni celoten temelj tlačno obremenjen (velika ekscentričnost). Določili pa smo tudi velikost pritiska na temelj na obeh robovih.

$$e_d < \frac{B}{6} \Rightarrow \text{mala ekscentričnost} \quad (6.01)$$

$$e_d > \frac{B}{6} \Rightarrow \text{velika ekscentričnost} \quad (6.02)$$

$$e_d = \frac{M_d}{N_d} \quad (6.03)$$

$$N_d = G_d + E_{av,d} \quad (6.04)$$

$$M_d = M_{G,d}^C + 1,35 \cdot (E_{av}^C + M_{aH}^C) \quad (6.05)$$

Mala ekscentričnost

$$p_{L,D} = \frac{N_d}{A} \pm \frac{M_d}{W} \quad (6.06)$$

$$A = B \cdot 1m \quad (6.07)$$

$$W = \frac{B^2}{6} \cdot 1m \quad (6.08)$$

Velika ekscentričnost

$$B^* = 3\left(\frac{B}{2} - e_d\right) \quad (6.09)$$

$$p_L = 2 \frac{N_d}{B^*} \quad (6.10)$$

- Za preverjanje nosilnosti tal pod kamnito zložbo smo uporabili metodo po Evrokodu 7 - projektni pristop PP2:

$$\frac{R}{A'} = c' \times N_c \times b_c \times s_c \times i_c + q' \times N_q \times b_q \times s_q \times i_q + 0,5 \times \gamma' \times B' \times N_\gamma \times b_\gamma \times s_\gamma \times i_\gamma \quad (7.01)$$

Kjer so:

R - odpornost tal,

A' - ploščina računske površine centrično obremenjenega temelja,

q' - efektivni navpični tlak ob temelju na globini temeljne ploskve,

c' - efektivna kohezija,

N_c, N_q, N_γ - koeficienti nosilnosti, odvisni od strižnega kota,

b_j, s_j, i_j - koeficienti nagiba in oblike temelja ter nagiba rezultante,

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45^\circ + \varphi'/2), \quad (7.02)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi', \quad (7.03)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \varphi' \text{ pri } \delta \geq \varphi'/2 \text{ (strižno dober stik)}, \quad (7.04)$$

$$b_q = b_\gamma = b_c = 1 \text{ (dno temelja je vodoravno)}, \quad (7.05)$$

$$s_q = s_\gamma = s_c = 1 \text{ (pasoven temelj } B' \ll L') \quad (7.06)$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q)/(N_c \times \tan \varphi'), \quad (7.07)$$

$$i_q = [1 - H/(V + A'c' \cot \varphi')]^m, \quad (7.08)$$

$$i_\gamma = [1 - H/(V + A'c' \cot \varphi')]^{m+1}, \quad (7.09)$$

$$m = m_b = 2 \ll L' \gg B' \quad (7.10)$$

Za izračun potrebne globine vpetja in sile v sidru sidrane stene smo uporabili enačbe:

$$\sum M^* = Ee - M_D^* = 0 \quad (8.01)$$

$$M_D^* = \frac{AD^3}{3} + (A(H-s) - p_{inD}) \frac{D^2}{2} - (H-s)p_{inD}D \quad (8.02)$$

$$\sum E = -E + E_D + F_{SH} = 0 \quad (8.03)$$

$$F_{SH} = E - \frac{AD^2}{2} + p_{inD}D \quad (8.04)$$

$$F_S = \frac{F_{SH}}{\cos \alpha} \quad (8.05)$$

Za izračun potrebne globine vpetja in globine vrlišča konzolne stene smo uporabili enačbe:

$$A = \gamma \left(\frac{k_p}{\gamma_R} - \gamma_E k_a \right) \quad (9.01)$$

$$p_{inL} = p_{pL}^d - p_{aL}^d \quad (9.02)$$

$$p_{inD} = p_{pD}^d - p_{aD}^d \quad (9.03)$$

$$E_D = \frac{Ad^2}{2} - p_{inD}d \quad (9.04)$$

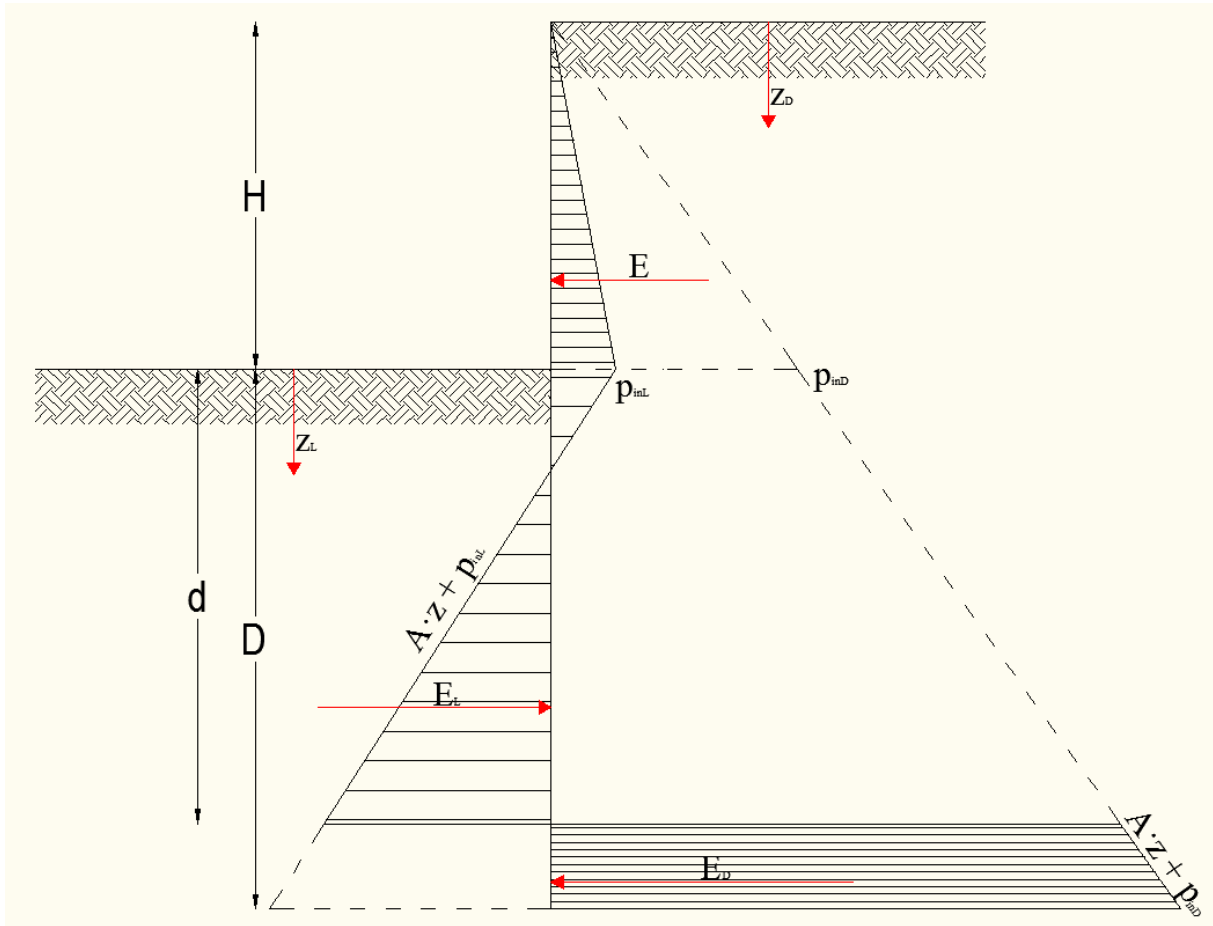
$$E_L = \frac{A}{2}(D^2 - d^2) + p_{inL}(D - d) \quad (9.05)$$

$$\sum E = E + \frac{A}{2}(D^2 - 2d) + p_{inD}d + p_{inL}(D - d) = 0 \quad (9.06)$$

$$M_L = \frac{A}{3}(D^3 - d^3) + \frac{1}{2}(AH - p_{inL})(D^2 - d^2) + Hp_{inL}(D - d) \quad (9.07)$$

$$M_D = \frac{Ad^3}{3} + (AH - p_{inD}) \frac{d^2}{2} - Hp_{inD}d \quad (9.08)$$

$$\sum M^0 = Ee - M_D + M_L = 0 \quad (9.09)$$



Slika 10: Ponazoritev spremenljivk v enačbah

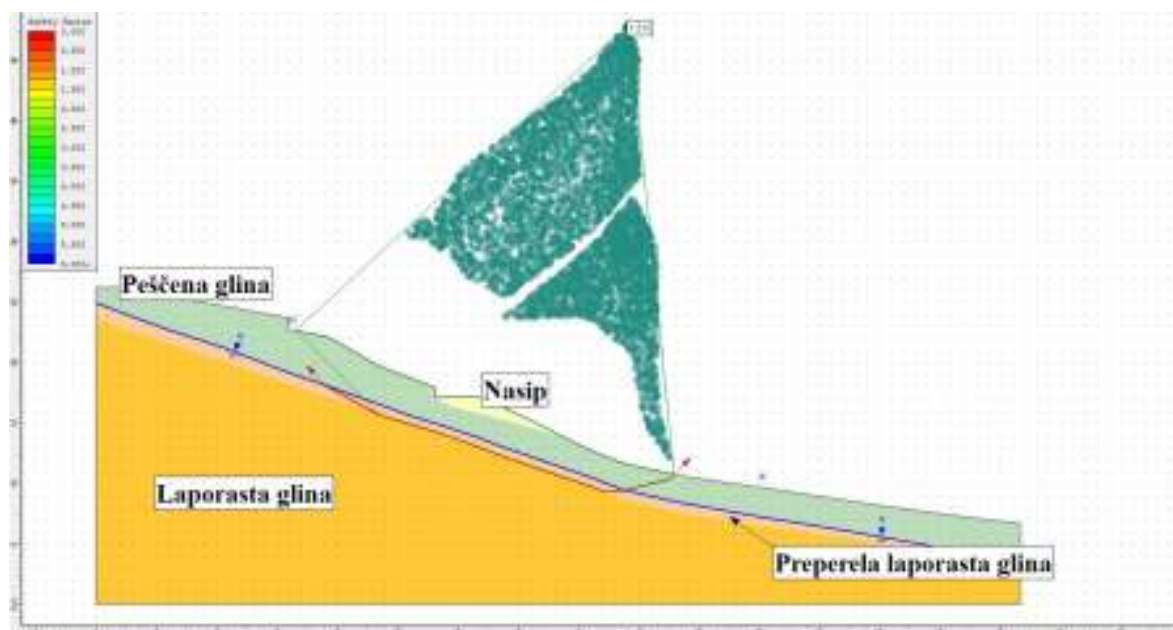
4 POVRATNA ANALIZA

4.1 Izhodišča povratne analize

S preizkusi na terenu je bilo določeno približno območje, znotraj katerega se nahajajo trdnostne karakteristike obravnavanih slojev. Hkrati je bil s preiskavami ugotovljen precej nizek vodostaj. Zato je bil v prvem primeru (varianta 1) kot vzrok za splazitev predpostavljen nizek vodostaj, ki je ustrezal ugotovljenemu stanju na terenu. S povratno analizo smo želeli preveriti, da takemu vodostaju ustrezajo tiste vrednosti trdnostnih karakteristik, ki so blizu spodnjih mej ocenjenih območij. Terenske preiskave, pri katerih je bil vodostaj izmerjen, so bile izvedene v sušnem obdobju. Posledično je bolj verjetno, da je bil ob splazitvi vodostaj bistveno višji. Zato je bil v drugem primeru povratne analize (varianta 2) ocenjen višji vodostaj, ki pa mu ustrezajo povišane vrednosti karakteristik zemljine. V tretjem primeru (varianta 3) se predpostavi enak vodostaj kot v drugem, vendar se upošteva arteško vodo in temu primerne materialne karakteristike.

4.2 Varianta 1: Nizek vodostaj in slabše karakteristike zemljine

Kot prvi možni vzrok za splazitev smo upoštevali nizke karakteristike zemljine in nizek vodostaj. S programom smo prišli do mehanizma, ki odgovarja dejanskemu stanju na terenu in ima varnostni faktor (F) povsem blizu 1.



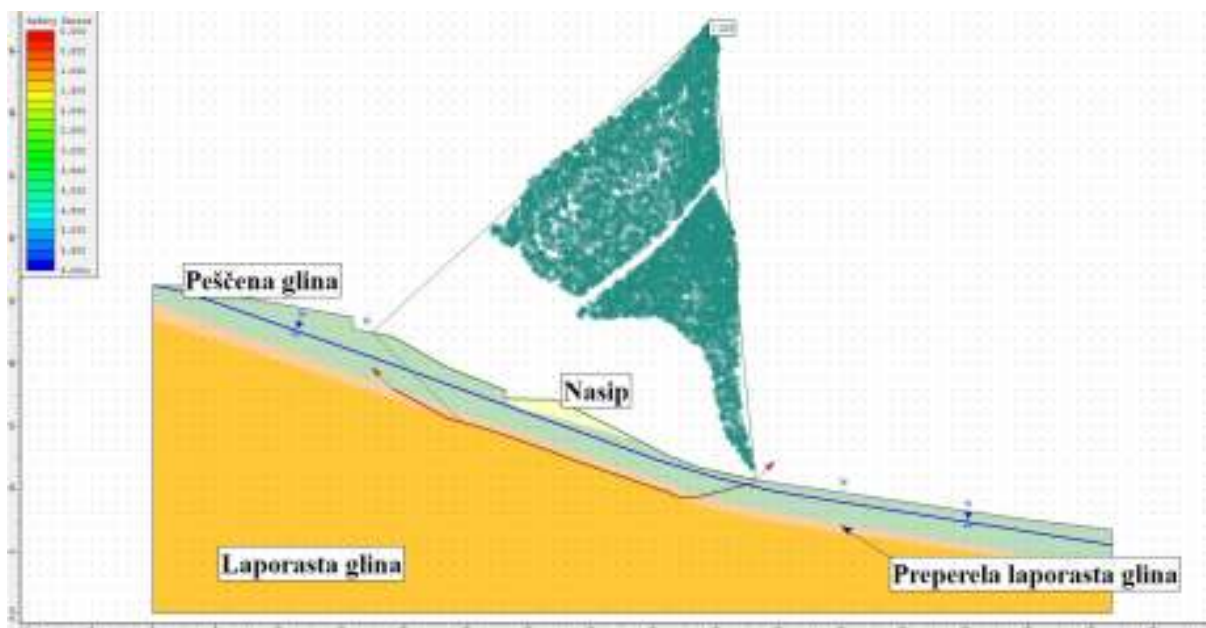
Slika 11: Osnovno stanje - nizek vodostaj

Preglednica 1: Karakteristike zemljin pri Varianti 1

Varianta 1	F = 1,015			
Sloj	Nasip	Peščena glina	Preperela laporasta glina	Laporasta glina
Strižni kot (φ')	34°	21°	20°	32°
Kohezija (c')	0 kPa	3 kPa	0 kPa	10 kPa
Prostorninska teža (γ)	21 kN/m ³	19 kN/m ³	20 kN/m ³	23 kN/m ³

4.3 Varianta 2: Visok vodostaj in boljše karakteristike zemljine

V drugem primeru pa smo kot vzrok za splazitev upoštevali dobre karakteristike zemljine in bistveno višji vodostaj. Zopet smo s programom prišli do mehanizma, ki odgovarja dejanskemu stanju na terenu in ima varnostni faktor (F) povsem blizu 1.



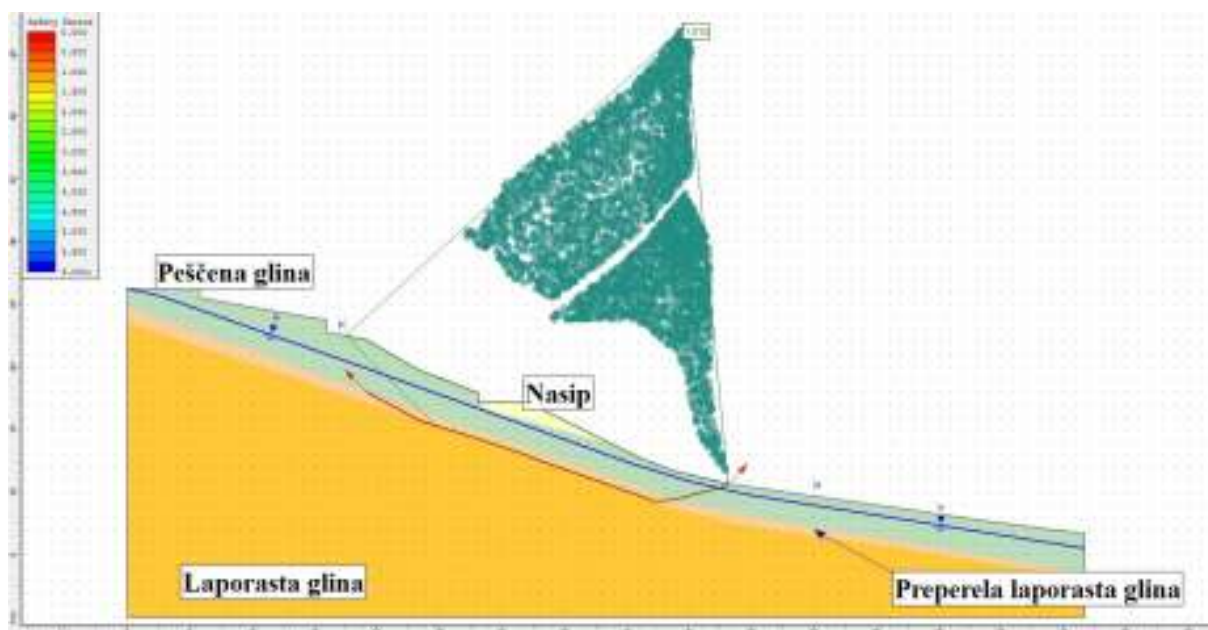
Slika 12: Osnovno stanje - visok vodostaj

Preglednica 2: Karakteristike zemljin pri Varianti 2

Varianta 2	F = 1,029			
Sloj	Nasip	Peščena glina	Preperela laporasta glina	Laporasta glina
Strižni kot (ϕ')	34°	23°	27°	32°
Kohezija (c')	0 kPa	5 kPa	0 kPa	10 kPa
Prostorninska teža (γ)	21 kN/m ³	19 kN/m ³	20 kN/m ³	23 kN/m ³

4.4 Varianta 3: Arteška voda

V tretji varianti smo upoštevali enako višino vodostaja kot v drugi varianti, le da smo upoštevali arteško vodo. To pomeni, da se pri izračunih v sloju peščene gline voda ne upošteva, medtem ko je na meji s slojem preperela laporasta glina skok pornih tlakov, ki so na meji med slojema že enaki kot pri Varianti 2. Karakteristike zemljine morajo biti nekoliko slabše kot v drugi varianti, da smo dobili varnostni faktor (F) povsem blizu 1.



Slika 13: Osnovno stanje - arteška voda

Preglednica 3: Karakteristike zemljin pri Varianti 3

Varianta 3	F = 1,014			
Sloj	Nasip	Peščena glina	Preperela laporasta glina	Laporasta glina
Strižni kot (φ')	34°	22°	25°	32°
Kohezija (c')	0 kPa	5 kPa	0 kPa	10 kPa
Prostorninska teža (γ)	21 kN/m ³	19 kN/m ³	20 kN/m ³	23 kN/m ³

4.5 Ugotovitve povratnih analiz

S povratnimi analizami so bile pri predpostavljenih vodostajih določene trdnostne karakteristike obravnavanih slojev. Za lažjo primerjavo jih podajamo v skupni preglednici (preglednica 4). Ugotovljeno je bilo, da se vrednosti trdnostnih karakteristik v vseh treh primerih nahajajo znotraj območij, ki so bila ocenjena s terenskimi preiskavami. V tem pogledu so torej vse tri variante splazitve možne. Za nobeno ne moremo z gotovostjo trditi, da je prava, z zelo veliko verjetnostjo pa lahko rečemo, da se tista kombinacija vodostaja in trdnostnih karakteristik, pri kateri je dejansko prišlo do splazitve, nahaja nekje med obravnavanimi tremi variantami, ki predstavljajo skrajne možne scenarije. Glede na te tri možne variante bomo v nadaljevanju dimenzionirali podporne ukrepe.

Primerjava karakteristik vseh treh variant:

Preglednica 4: Primerjava karakteristik

	Sloj	Nasip	Peščena glina	Preperela laporasta glina	Laporasta glina
Varianta 1	Strižni kot (φ')	34°	21°	20°	32°
	Kohezija (c')	0 kPa	3 kPa	0 kPa	10 kPa
Varianta 2	Strižni kot (φ')	34°	23°	27°	32°
	Kohezija (c')	0 kPa	5 kPa	0 kPa	10 kPa
Varianta 3	Strižni kot (φ')	34°	22°	25°	32°
	Kohezija (c')	0 kPa	5 kPa	0 kPa	10 kPa

5 SANACIJSKI UKREPI

5.1 Princip sanacije

Sanacijo področja smo predvideli s podobnimi ukrepi, kot so bili dejansko izvedeni na terenu. Na zgornji strani ceste smo dimenzionirali kamnito zložbo izdelano z betonom C25/30 ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$) na spodnji strani pa smo predvideli stabilizacijo področja na dva možna načina. V prvem primeru s sidrano pilotno steno, v drugem pa s konzolno pilotno steno (C25/30, $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$). Obe varianti smo preračunali za nizek vodostaj in slabše karakteristike zemljine, za višji vodostaj in boljše karakteristike zemljine ter za arteški vodostaj.

5.2 Pogoji sanacije in opis privzetih računskih modelov

Zaledje kamnite zložbe naj bi se zasipalo in utrdilo s predhodno izkopano peščeno glino. Pobočje bi se uredilo v naklonu 20° od vrha kamnite zložbe, humusiralo in zatravilo. Pred kamnito zložbo se na utrjeno podlago iz peščene gline uredi nasip iz gramoza, pripeljanega iz bližnjega peskokopa, v višini 2 m od dna temelja zložbe. Nasip se izravna do minimalnega naklona potrebnega zaradi odvodnjavanja cestišča.

V računskem modelu za izračun zemeljskih vplivov na kamnito zložbo je upoštevan naklon zaledja 20° , pred zložbo pa 0° . Evrokod 7 veleva znižanje računske višine zasutja pred kamnito zložbo vsaj 10 % svetle višine konstrukcije oz. največ 0,5 m. V našem primeru je svetla višina kamnite zložbe 2 m zato znaša zmanjšanje višine zasutja 0,2 m. Računska globina temeljenja je torej znašala 1,8 m (slika 15).

Zaledje pilotne stene je enako kot material pred kamnito zložbo. Na sprednjem delu pa se izvede drenaža z odvodom v obstoječo kanalizacijo. Plast peščene gline se utrdi in izravna v naklonu 23° , nanjo pa se izvede nasip iz gramoza v naklonu 30° , ki se humusira in zatravi.

V računskem modelu se je zaledje pilotne stene upoštevalo brez naklona, prav tako pa tudi zasutje pred pilotno steno. Realna izvedba zasutja pred pilotno steno je višja, izvedena je tudi drenaža, zato smo v računih upoštevali nekoliko nižji vodostaj. Kljub neupoštevanju nivoja vode pred pilotno steno smo zaradi manjše višine zasipa pred steno še vedno na varni strani.

Pri izračunu se je upoštevalo dejstvo, da imajo piloti premer 1 m in so na medsebojni razdalji 3 m. To je trikratnik premera, zato lahko statične kontrole računamo, kot da je konstrukcija monolitna.

5.3 Varianta 1: Nizek vodostaj in slabše karakteristike zemljine

Za računanje zemeljskih pritiskov smo uporabili karakteristike zemljin, ki smo jih določili v Varianti 1.

5.3.1 Kamnita zložba

S pomočjo enačb 2.01-2.06 za nagnjeno zaledje smo izračunali zemeljske pritiske, ki delujejo na kamnito zložbo. Kamnita zložba ima zaledje le v sloju peščene gline, zato smo za izračun aktivnih pritiskov potrebovali le te karakteristike, medtem ko je pred konstrukcijo še nasip, ki prispeva k pasivnim pritiskom:

Peščena glina	Nasip
$\varphi' = 21^\circ$	$\varphi' = 34^\circ$
$c' = 3 \text{ kPa}$	$c' = 0 \text{ kPa}$
$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$

$$K_a = 0,80$$

$$\delta = \beta = 20^\circ$$

$$E_a = 87,2 \text{ kN/m}$$

$$E_{ah} = 81,9 \text{ kN/m}$$

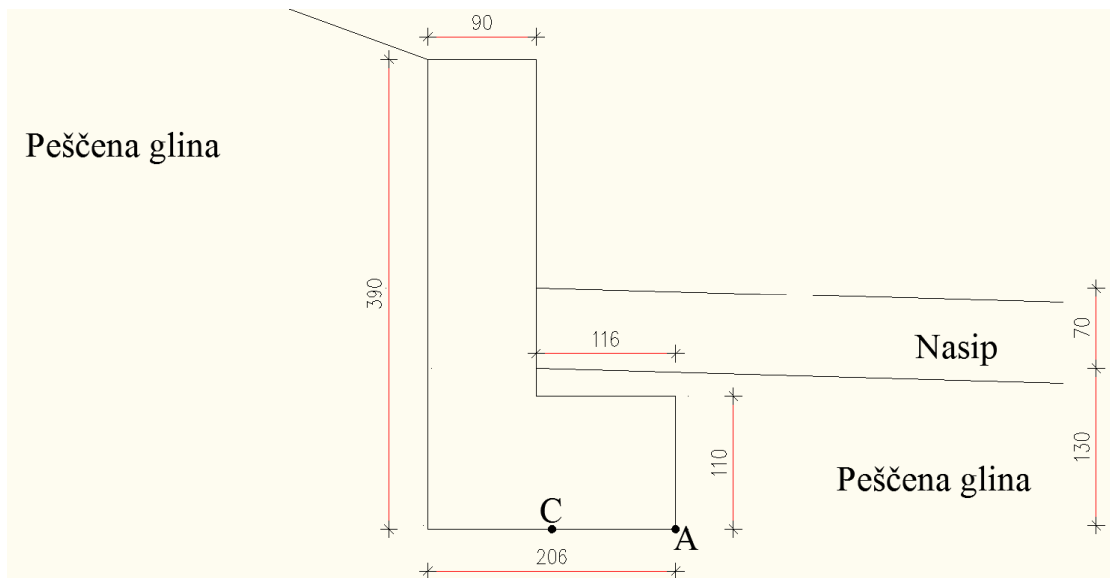
$$E_{av} = 29,8 \text{ kN/m}$$

$$K_{p1} = 3,54$$

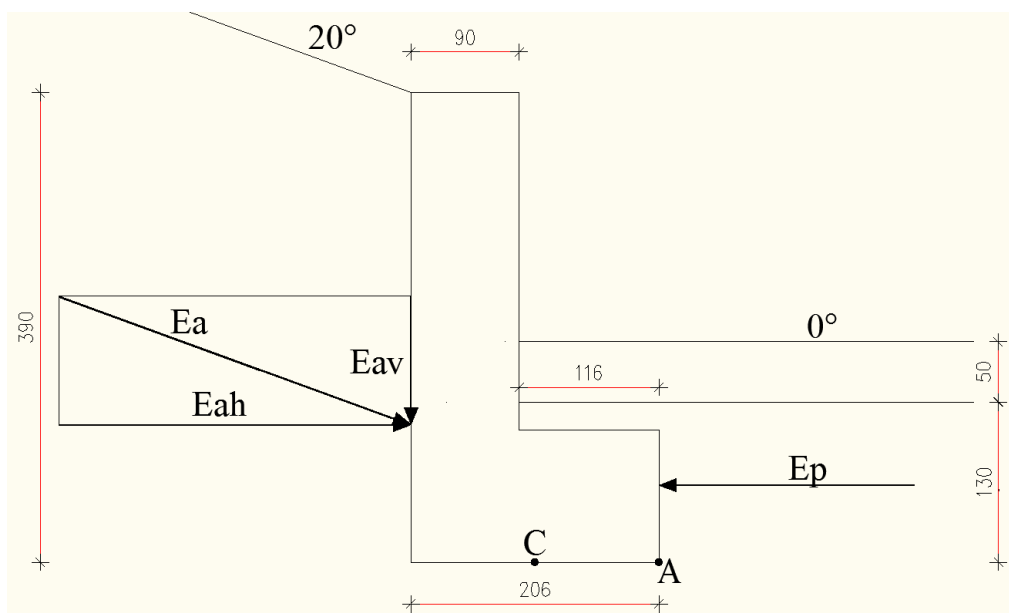
$$K_{p2} = 2,12$$

$$E_p = 79,9 \text{ kN/m}$$

Na osnovi izračunanega zemeljskega pritiska smo dimenzionirali kamnito zložbo.



Slika 14: Kamnita zložba-sloji-nizek vodostaj



Slika 15: Računski model za presojo kamnite zložbe-nizek vodostaj

Z optimizacijo dimenzij in oblike zložbe se je izkazalo, da izbranim kriterijem glede prevrnitve, zdrs in nosilnosti temeljnih tal, najbolj ustreza zložba z vertikalno izvedbo zaledne in vidne stene, kar je neobičajno in težko izvedljivo. V praksi bi se lice zložbe izvedlo v strmem vendar ne povsem vertikalnem naklonu.

Zemeljski pritiski so izračunani po metodi Rankine-a z upoštevanjem kohezije.

Izračunani vplivi na konstrukcijo znašajo:

Preglednica 5: Vplivi na kamnito zložbo-nizek vodostaj

	G	E_{ah}	E_{av}	E_p
SILA	136,2 kN/m	81,9 kN/m	29,8 kN/m	79,9 kN/m
ROČICA A	1,24 m	1,14 m	2,06 m	0,64 m
M^A	-169,4 kNm/m	93,7 kNm/m	-61,4 kNm/m	-51,4 kNm/m
ROČICA C	0,21 m	1,14 m	1,03 m	0,64 m
M^C	-29,1 kNm/m	93,7 kNm/m	-30,7 kNm/m	-51,4 kNm/m

Na osnovi delujočih sil smo z enačbama 4.01 in 4.02 preverili odpornost zložbe proti prevrnitvi;

$$M_{prev,d}^A < M_{odp,d}^A$$

$$35,5 \text{ kNm/m} < 152,5 \text{ kNm/m} ,$$

s pomočjo enačb 5.01 in 5.02 pa odpornost proti zdrsru;

$$E_{ad} < T_d$$

$$110,6 \text{ kN/m} < 118,6 \text{ kN/m} .$$

Z enačbami 6.01 - 6.10 smo določili lego rezultante in ugotovili, da leži 26 cm od središča temelja, torej gre za malo ekscentričnost. To pomeni, da je celoten temelj tlačno obremenjen in smo lahko izračunali še velikosti tlačnih obremenitev na obeh robovih temelja.

$$e_d = 0,32m < 0,34m = \frac{B}{6} \Rightarrow \text{mala ekscentričnost}$$

$$p_L = 6,50 \text{ kPa}$$

$$p_D = 164,8 \text{ kPa}$$

Pri izračunu ekscentričnosti smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov E_{av} in oba momenta, ki ju okrog točke C (Slika 15) povzročata obe komponenti rezultante, množili z 1,35. Težo smo upoštevali v nefaktorirani vrednosti.

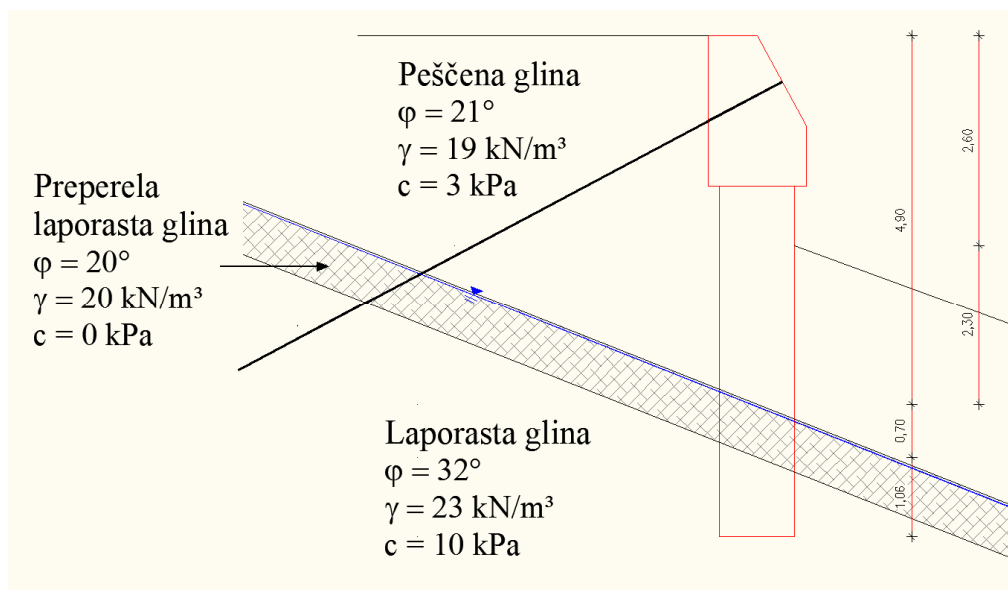
S pomočjo enačb 7.01 – 7.10 pa smo preverili tudi, ali je nosilnost tal pod kamnito zložbo dovolj velika, da bo prenesla obremenitev zaradi lastne teže kamnite zložbe:

$$R_d/A' > V_d/A'$$

$$124,2 \text{ kPa} > 123,8 \text{ kPa}$$

Pri kontroli nosilnosti tal smo za horizontalni vpliv sil upoštevali razliko faktoriranih vrednosti horizontalne komponente rezultante aktivnih pritiskov E_{ah} in rezultante pasivnih pritiskov E_p . E_{ah} smo množili z varnostnim faktorjem 1,35, E_p pa smo delili s faktorjem 1,4. Za vertikalni vpliv sil pa smo upoštevali nefaktorirano lastno težo konstrukcije, medtem ko smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov množili z 1,35.

5.3.2 Sidrana stena



Slika 16: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 1

S pomočjo enačb 1.01-1.04 in 2.01-2.06 smo izračunali zemeljske pritiske za in pred konstrukcijo, nad vpetjem:

Preglednica 6: Zemeljski pritiski zadaj - nizek vodostaj

E_{az}									
z [m]	σ_v [kPa]	u [kPa]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c^*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]
0,00	20,56	0,00	20,56	0,47	4,12	5,59	135,12	182,42	3,10
4,90	113,66	0,00	113,66	0,47	4,12	49,56			
4,90	113,66	0,00	113,66	0,49	0,00	55,73	40,21	54,28	5,25
5,60	127,66	7,00	120,66	0,49	0,00	59,16			
						Eu	2,45	3,31	5,37
								240,01	3,62

Preglednica 7: Zemeljski pritiski pred konstrukcijo - nizek vodostaj

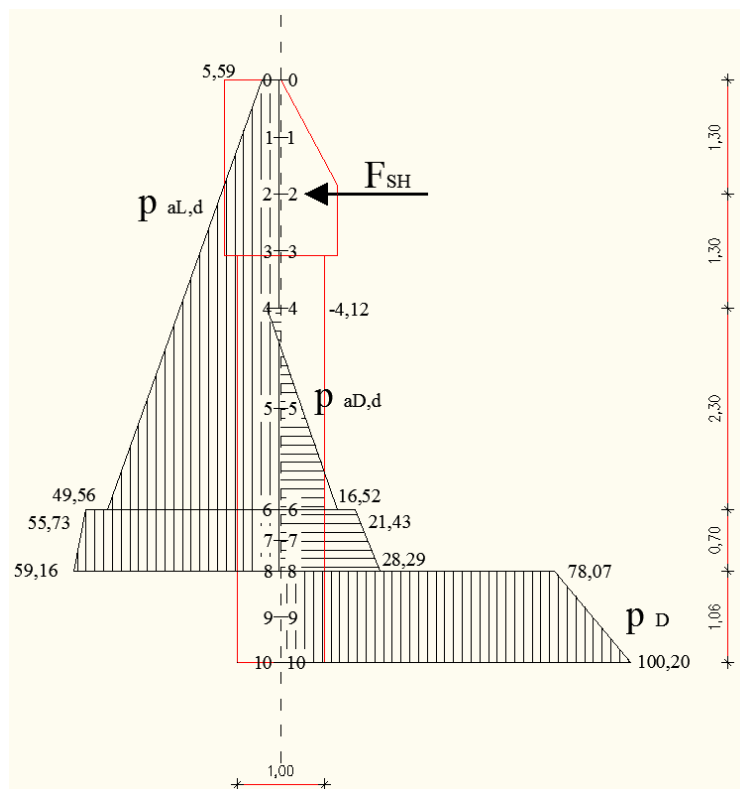
E_{as}								
Z [m]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c^*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]	
0,00	0,00	0,47	4,12	-4,12	14,25	10,18	1,79	
2,30	43,70	0,47	4,12	16,52				
2,30	43,70	0,49	0,00	21,43	17,40	12,43	2,67	
3,00	57,70	0,49	0,00	28,29				
						22,61	2,27	

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{as} = 240,01 - 22,61 = 217,40 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{az}(3,62\text{m} - 1,3\text{m}) - E_{as}(2,27\text{m} + 1,3\text{m})}{E} = \frac{240,01 \cdot 2,32 - 22,61 \cdot 3,57}{217,40} = 2,19\text{m}$$

Vplivi:



Grafikon 1: Obremenitve sidrane pilotne stene – Varianta 1

Z enačbami 1.01-1.04, 3.01,3.02 in 8.01-8.05, ki predstavljajo statične ravnovesne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in silo v sidru:

$$M_D = 28,16 \frac{D^3}{3} + 199,16 \frac{D^2}{2} + 335,70D$$

$$E_{zg} \cdot e_{zg} - M_D = 0$$

↓↓

$$D=1,06 \text{ m}$$

$$E_D = 28,16 \frac{D^2}{2} + 78,07D = 98,05 \text{ kN/m}$$

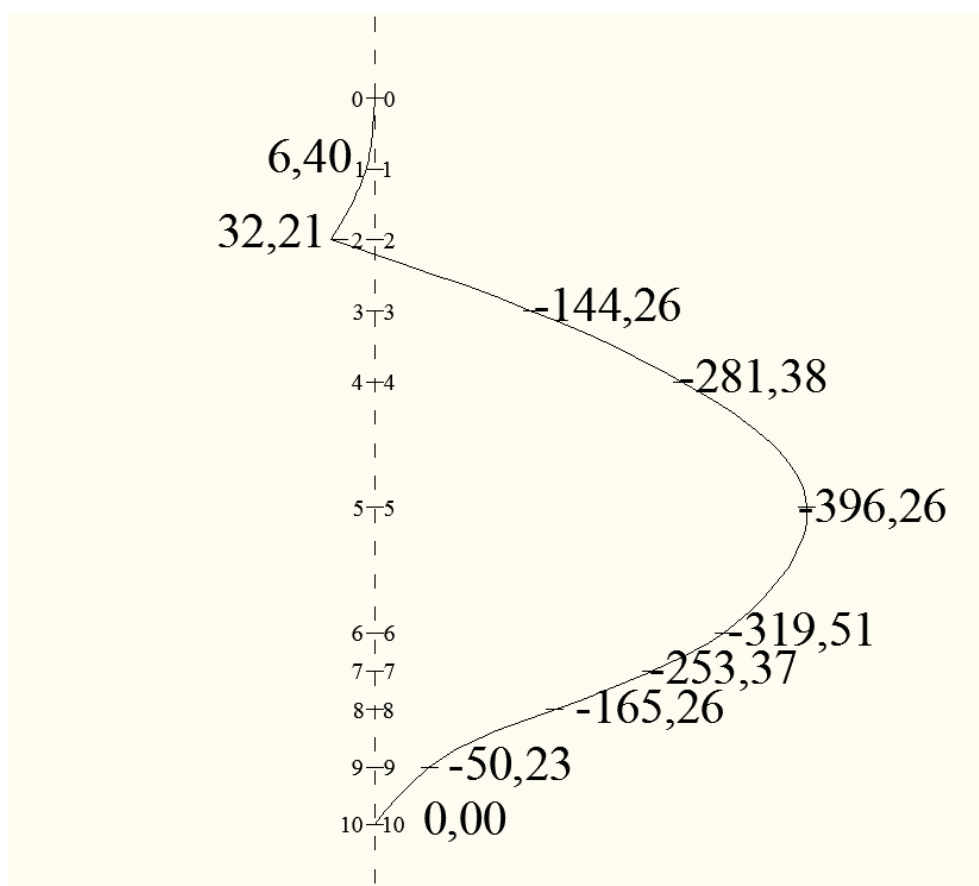
Z enačbama 8.04 in 8.05 smo izračunali potrebno silo v sidru:

$$F_{sh} = 119,43 \text{ kN/m}$$

$$F_s = 135,26 \text{ kN/m}$$

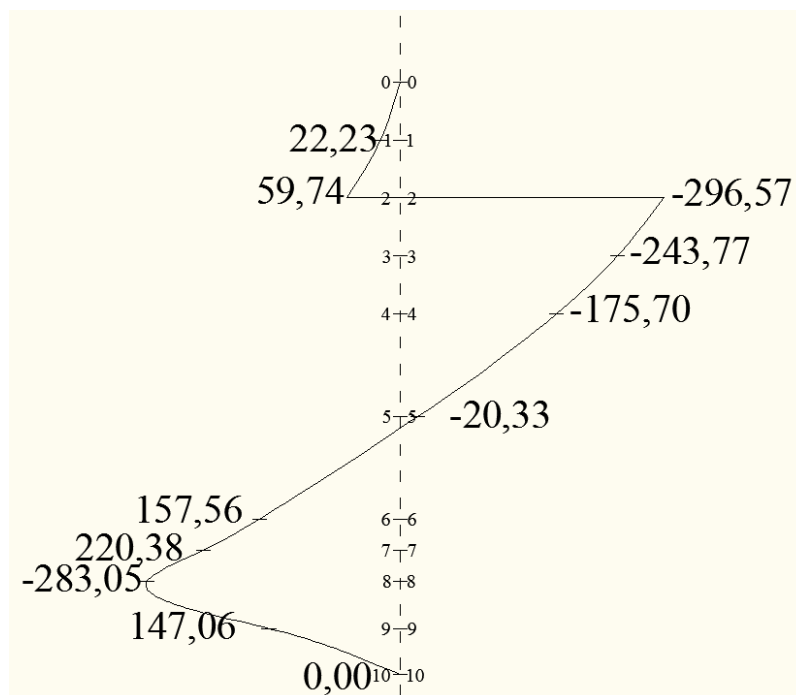
Na osnovi vplivov, ki so izračunani na tekoči meter stene, smo izračunali vplive, ki delujejo na posamezen pilot, nato pa smo v izbranih prerezih preračunali upogibne momente in prečne sile.

Upogibni momenti:



Grafikon 2: Momentne obremenitve sidrane stene

Prečne sile:



Grafikon 3: Prečne sile v sidrani pilotni steni

- Statični preračun:

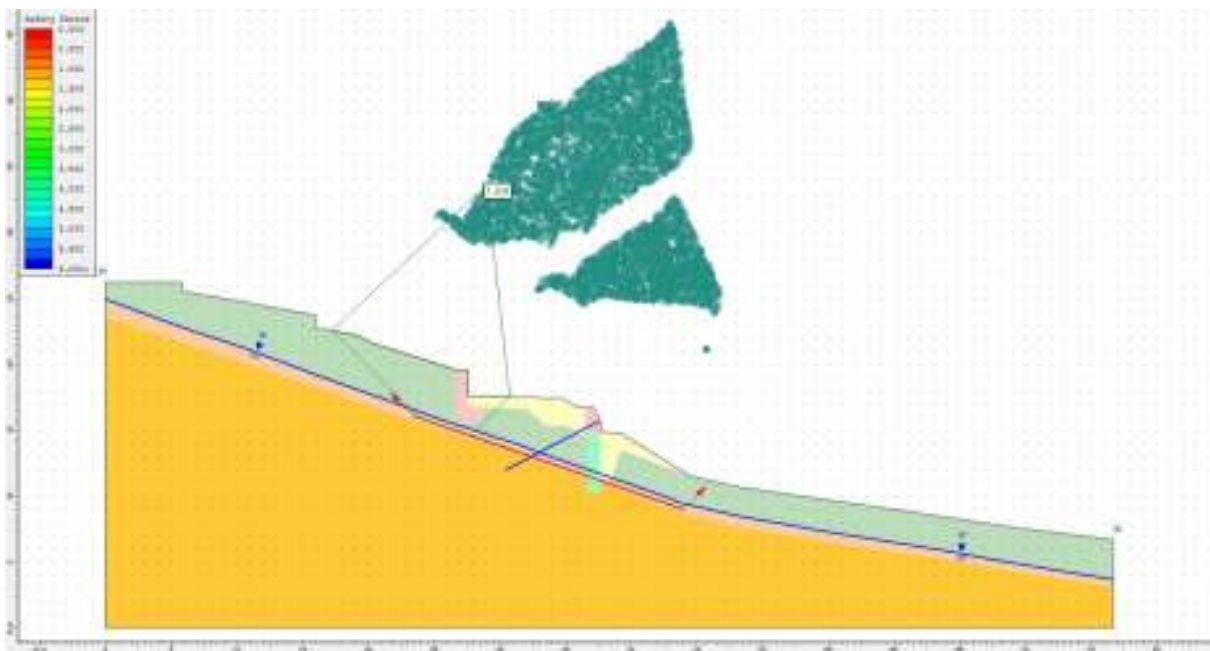
Glede na upogibne momente je najbolj neugoden prerez 5. Potrebne je vsaj $7,52 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ vzdolžne armature. Za primerjavo: pri dejansko izvedeni sanaciji, kjer so piloti konzolno vpeti, je delež armature $177 \text{ cm}^2/\text{m}^2$.

- Predlagana sanacija:

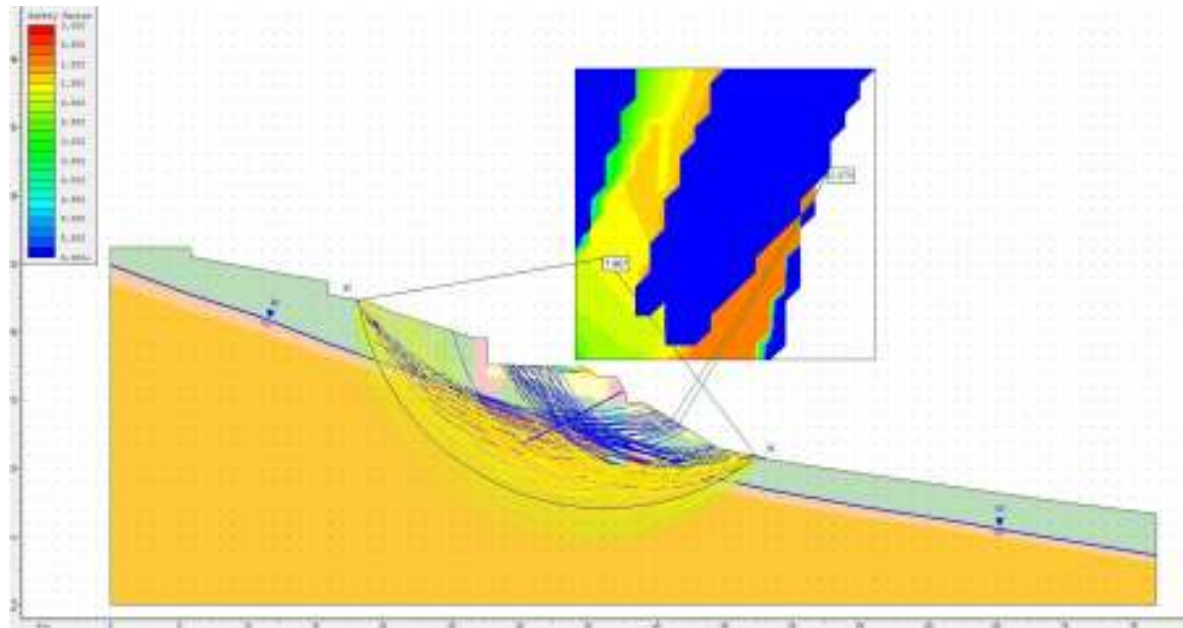
Predpostavljene lastnosti zemljin, ki so bile ugotovljene s povratno analizo (varianta 1), so se za končno analizo varnosti sanacijskih ukrepov reducirale s faktorjem 1,25. Izvedla se je analiza z uporabo metode poligonalnih drsin (Janbu) in metoda z uporabi krožnih drsin (Bishop). Najmanjšo varnost nam da metoda Janbu, in sicer $F = 1,22$, kar je več kot je zahtevana varnost $F = 1,00$.

Preglednica 8: Projektne karakteristike-nizek vodostaj

Sloj	Nasip	Peščena glina	Preperela laporasta glina	Laporasta glina
Strižni kot (φ')	28,4°	17,1°	16,2°	25,6°
Kohezija (c')	0 kPa	2,4 kPa	0 kPa	8 kPa
Prostorninska teža (γ)	21 kN/m ³	19 kN/m ³	20 kN/m ³	23 kN/m ³

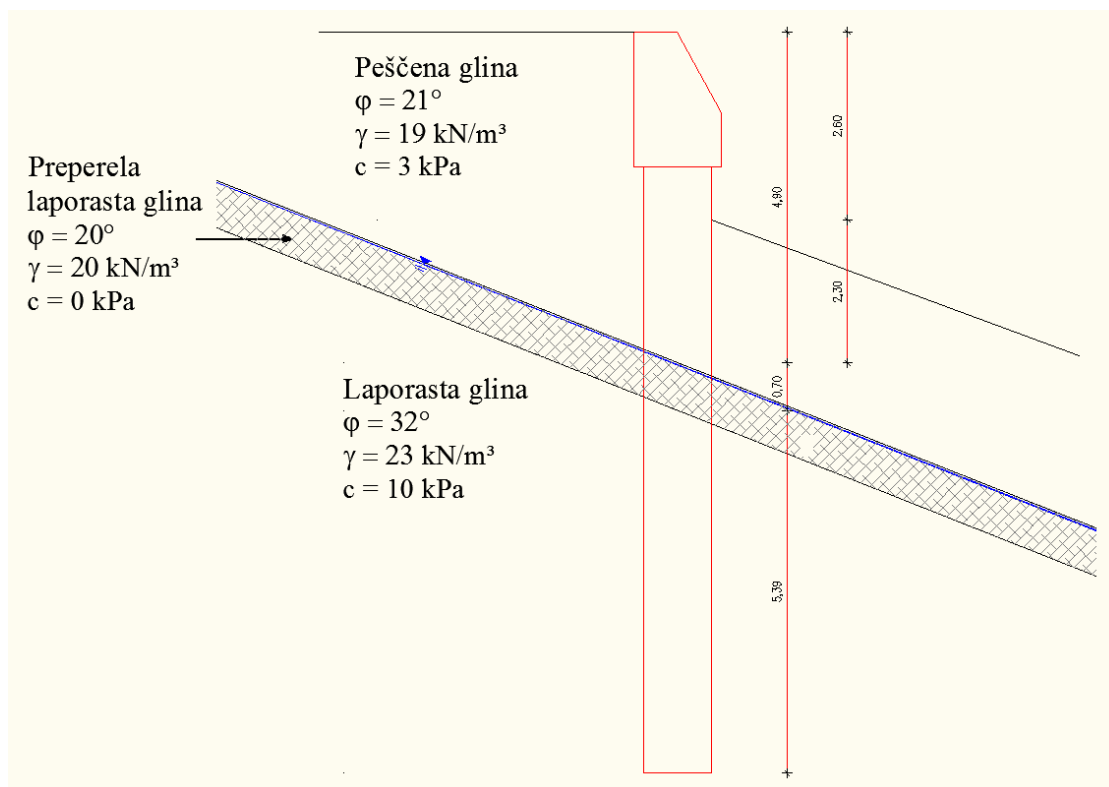


Slika 17: Sidrana pilotna stena - Varianta 1



Slika 18: Sidrana pilotna stena – Varianta 1: krožne drsine

5.3.3 Konzolna stena



Slika 19: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 1

Zemeljski pritiski nad vpetjem so enaki kot pri sidrani pilotni steni, zato ponoven izračun ni potreben.

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{ps} = 240,01 - 22,61 = 217,40 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{as} \cdot 3,62 \text{ m} - E_{az} (2,27 \text{ m} + 2,6 \text{ m})}{E} = \frac{240,01 \cdot 3,62 - 22,61 \cdot 3,87}{217,40} = 3,49 \text{ m}$$

S pomočjo enačb 9.01 - 9.09, ki predstavljajo statične ravnotežne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in globino vrtilišča:

$$M_D = 28,16 \frac{d^3}{3} + 235,77 \frac{d^2}{2} + 437,19d$$

$$E_D = 28,16 \frac{d^2}{2} + 78,07d$$

$$M_L = \frac{46,25}{3}(D^3 - d^3) + \frac{576,14}{2}(D^2 - d^2) + 1775,98(D - d)$$

$$E_L = \frac{46,25}{2}(D^2 - d^2) + 317,14(D - d)$$

$$\sum E = -E + E_d - E_L = 0$$

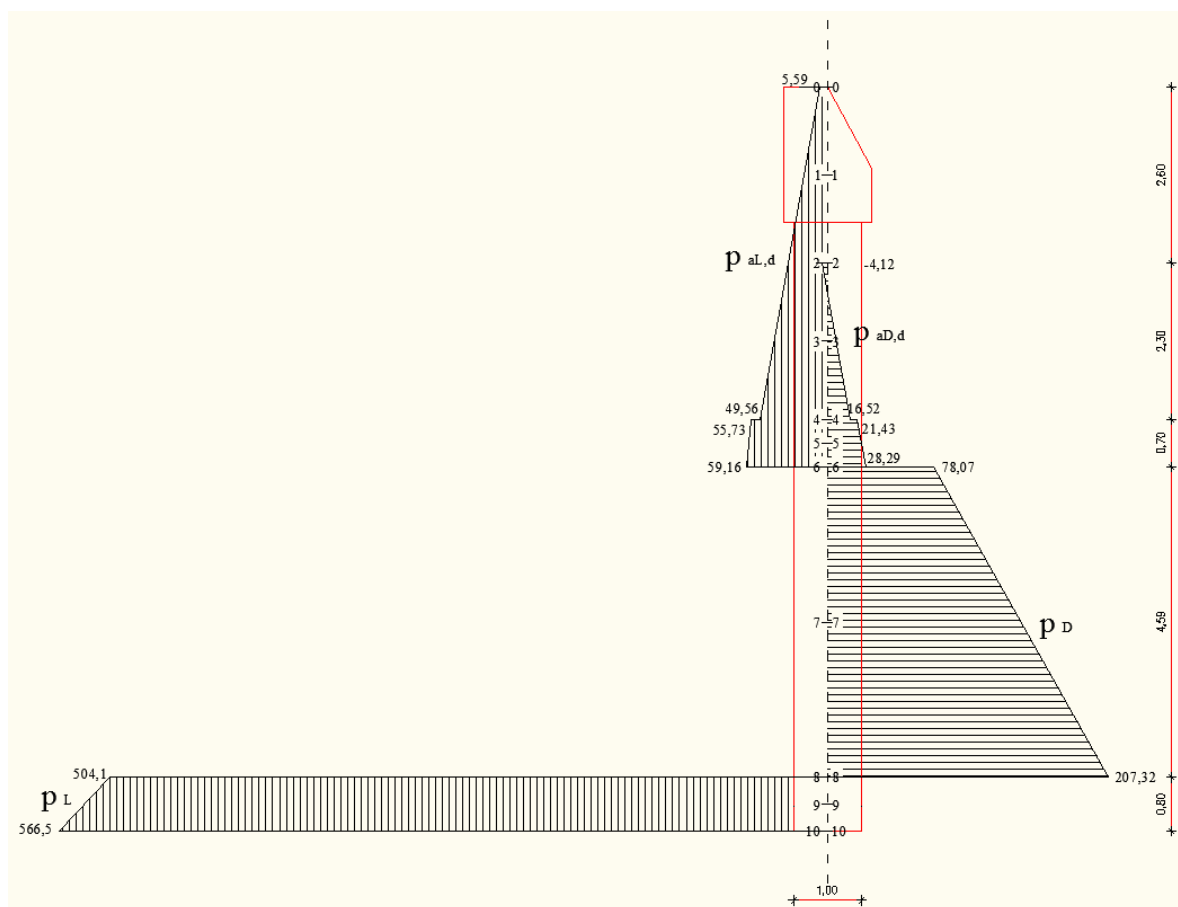
$$\sum M^0 = E_{zg} \cdot e_{zg} - M_D + M_L = 0$$

↓↓

$$D = 5,39\text{m}$$

$$d = 4,59\text{m}$$

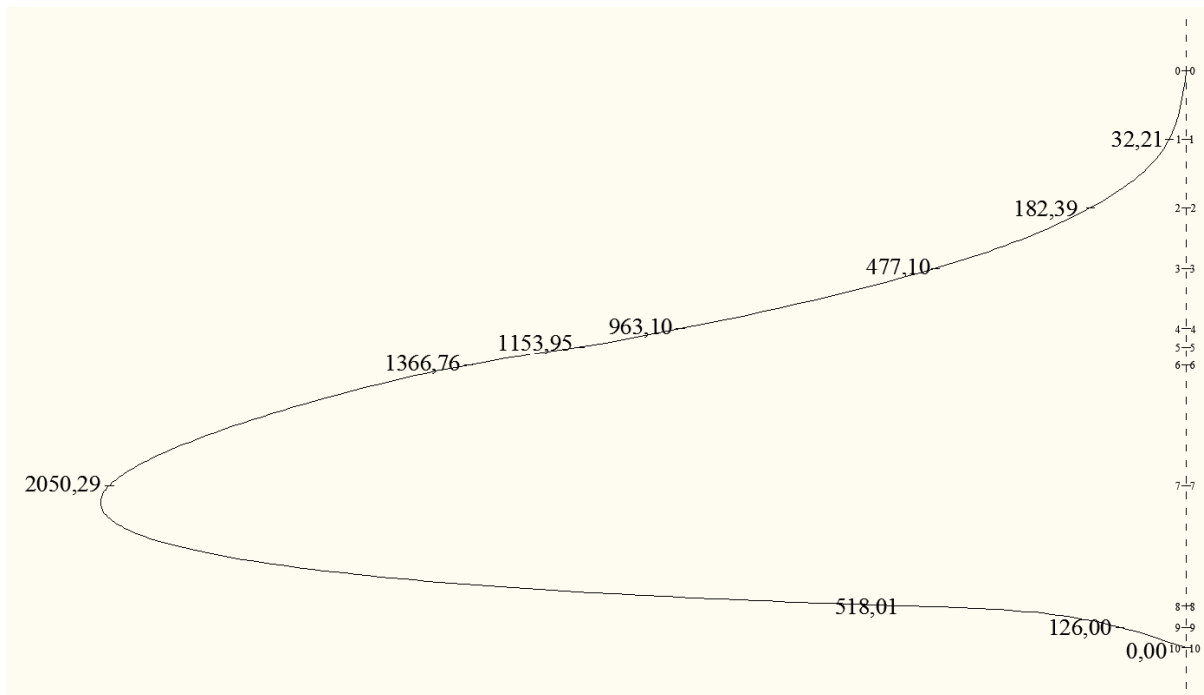
Vplivi na pilot:



Grafikon 4: Obremenitve konzolne pilotne stene – Varianta 1

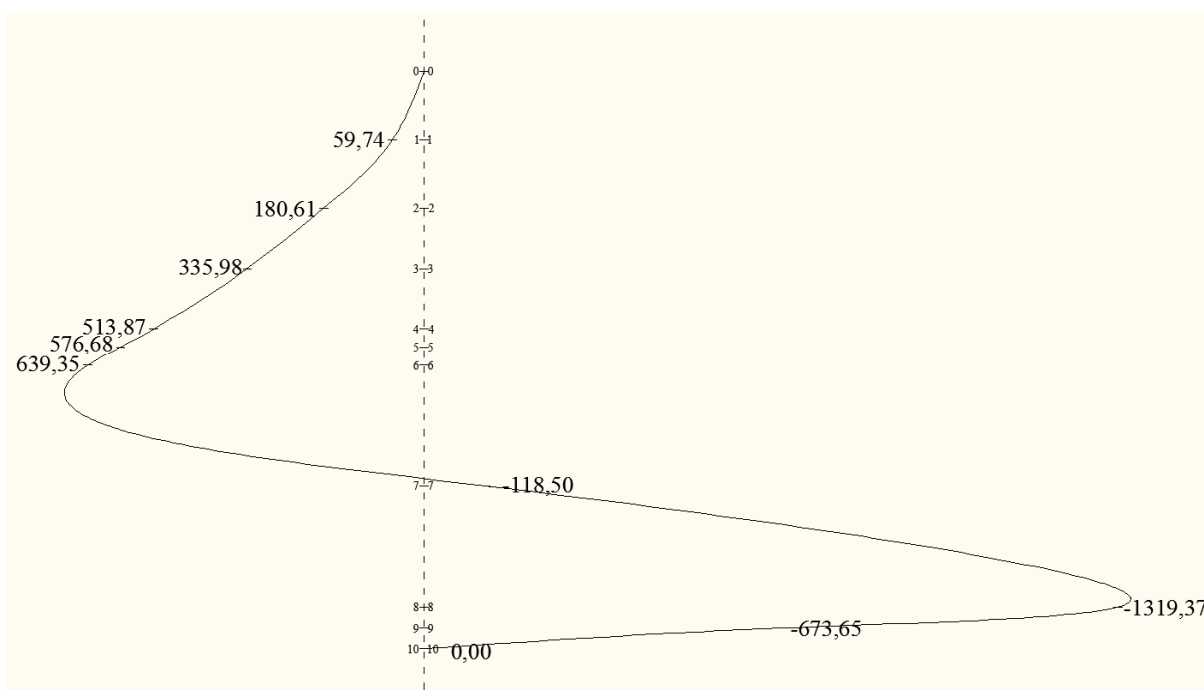
Na osnovi vplivov, ki so izračunani na tekoči meter stene, smo izračunali vplive, ki delujejo na posamezen pilot, nato pa smo v izbranih prerezih preračunali upogibne momente in prečne sile.

Upogibni momenti:



Grafikon 5: Momentne obremenitve konzolne pilotne stene

Prečne sile:



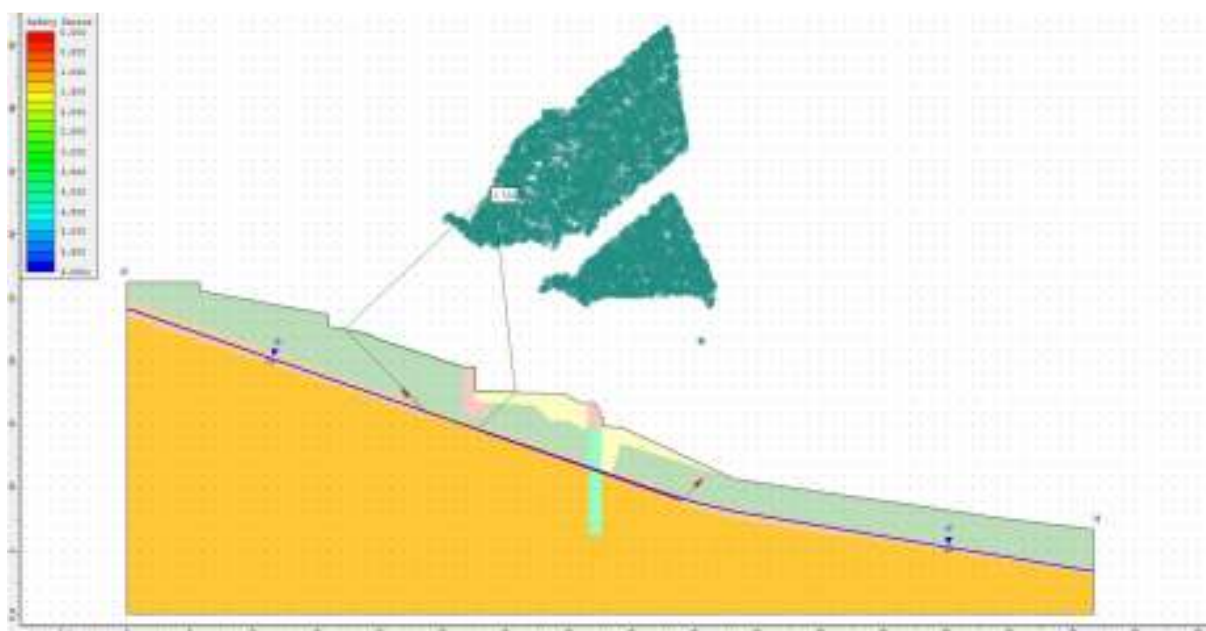
Grafikon 6: Prečne sile v konzolni pilotni steni

- Statični preračun:

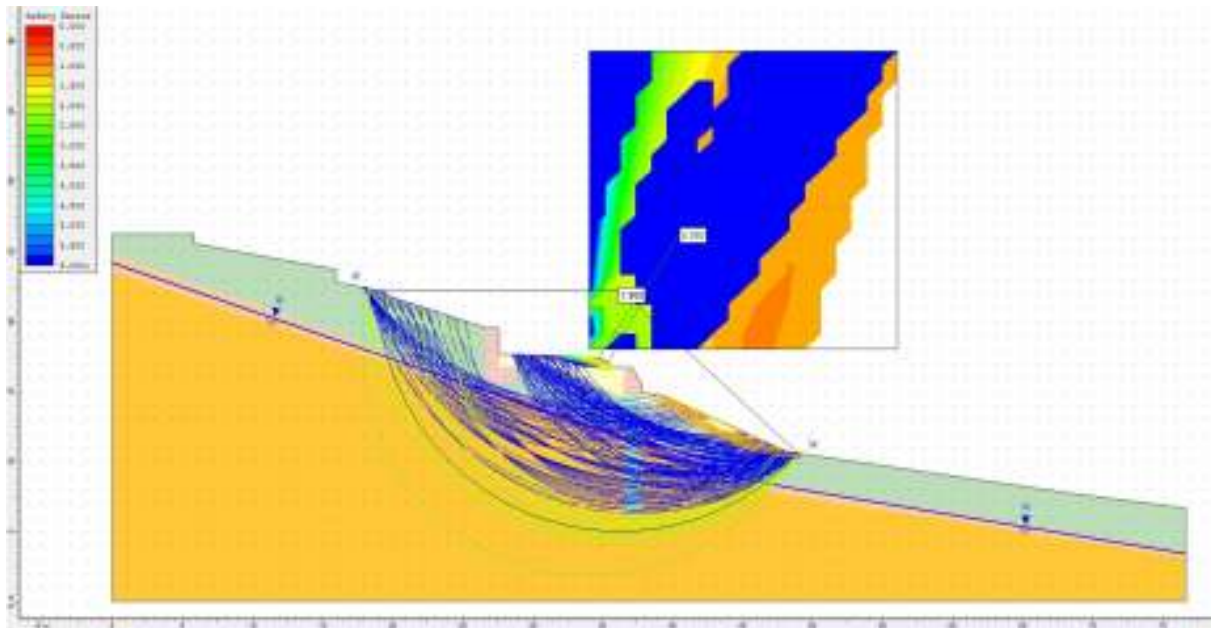
Glede na upogibne momente je najbolj neugoden prerez 5. Potrebne je vsaj $150 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ vzdolžne armature. Za primerjavo: pri dejansko izvedeni sanaciji, kjer so piloti konzolno vpeti, je delež armature $177 \text{ cm}^2/\text{m}^2$.

- Predlagana sanacija:

Tudi pri analizi sanacije s konzolno pilotno steno se je izvedla analiza varnosti konstrukcije z uporabo metode poligonalnih drsin in metode krožnih drsin. Enako kot pri sidrani steni so se karakteristike reducirale z varnostnim faktorjem 1,25 (Preglednica 8). Najmanjši varnostni faktor je ponovno dala analiza z uporabo poligonalnih drsin, in sicer $F = 1,13$.



Slika 20: Konzolna pilotna stena - Varianta 1



Slika 21: Konzolna pilotna stena – Varianta 1: krožne drsine

5.4 Varianta 2: Visok vodostaj in boljše karakteristike zemljine

Za računanje zemeljskih pritiskov smo uporabili karakteristike zemljin, ki smo jih določili v Varianti 2.

5.4.1 Kamnita zložba

S pomočjo enačb 2.01-2.06 za nagnjeno zaledje smo izračunali zemeljske pritiske, ki delujejo na kamnito zložbo. Kamnita zložba ima zaledje le v sloju peščene gline, zato smo za izračun aktivnih pritiskov potrebovali le te karakteristike, medtem ko je pred konstrukcijo še nasip, ki prispeva k pasivnim pritiskom:

Peščena glina	Nasip
$\varphi' = 23^\circ$	$\varphi' = 34^\circ$
$c' = 5 \text{ kPa}$	$c' = 0 \text{ kPa}$
$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$

$$K_a = 0,67$$

$$\delta = \beta = 20^\circ$$

$$E_a = 50,5 \text{ kN/m}$$

$$E_{ah} = 60,3 \text{ kN/m} *$$

$$E_{av} = 17,3 \text{ kN/m}$$

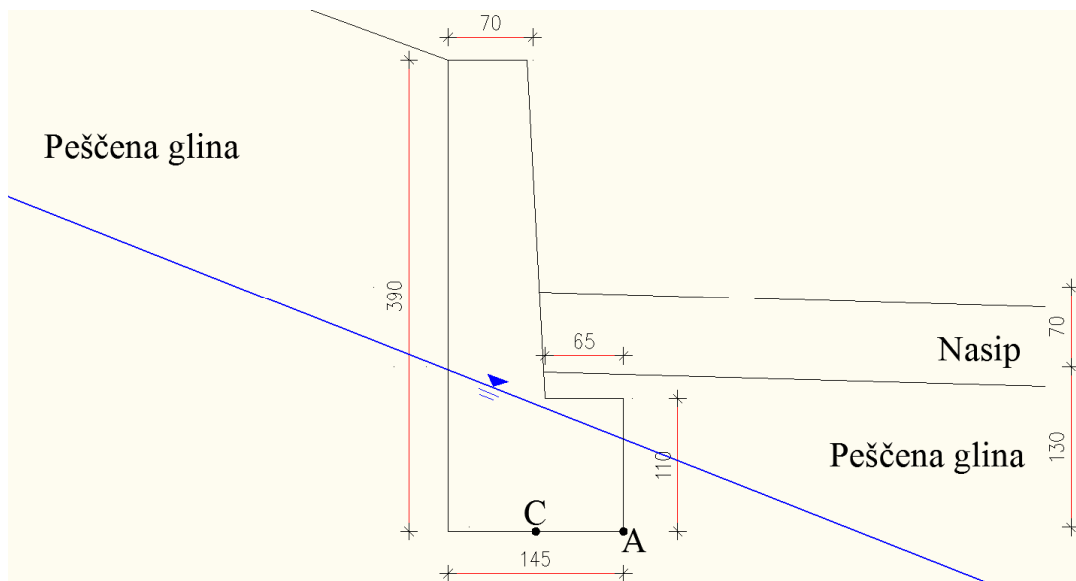
$$K_{p1} = 3,54$$

$$K_{p2} = 2,28$$

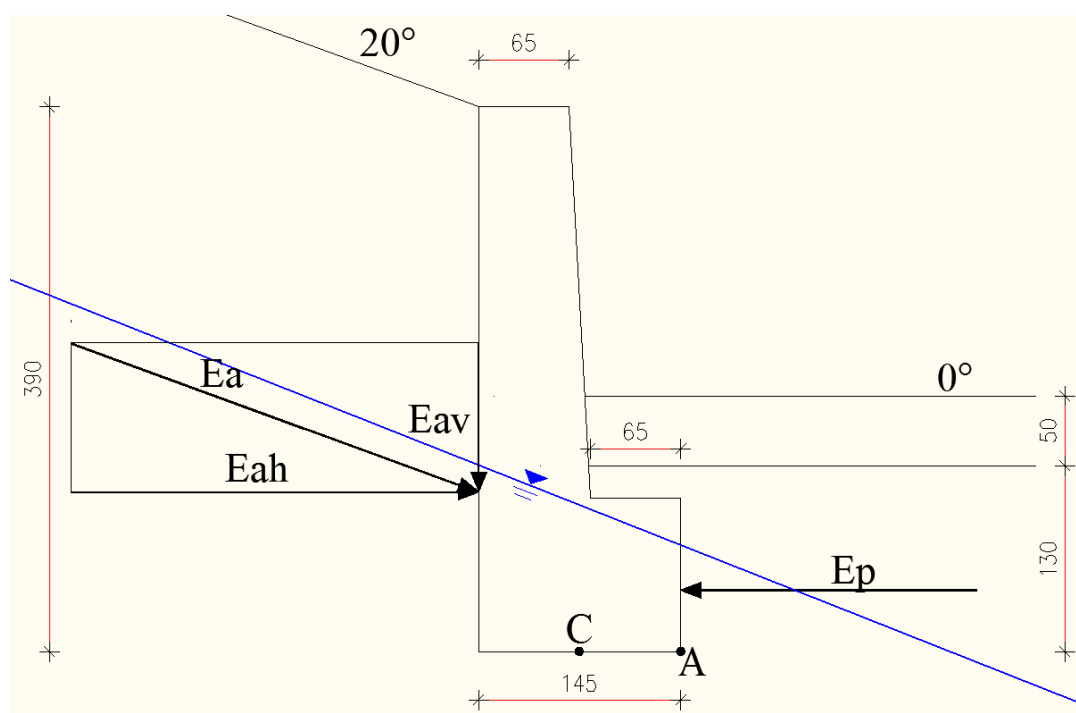
$$E_p = 88,8 \text{ kN/m}$$

*Komentar k horizontalni komponenti sile zaledja. E_{ah} ni zgolj horizontalna komponenta sile aktivnih pritiskov, temveč ji prištejemo tudi rezultanto pornih tlakov (E_u).

Na osnovi izračunanega zemeljskega pritiska smo dimenzionirali kamnito zložbo.



Slika 22: Kamnita zložba-sloji-visok vodostaj



Slika 23: Računski model za presojo kamnite zložbe-visok vodostaj

Z optimizacijo dimenzij in oblike zložbe se je izkazalo, da izbranim kriterijem glede prevrnitve, zdrs in nosilnosti temeljnih tal, najbolj ustreza zložba z vertikalno izvedbo zaledne stene in izvedbo vidne stene v strmem naklonu, kar je lažje izvedljivo kot povsem vertikalna izvedba.

Zemeljski pritiski so izračunani po metodi Rankine-a z upoštevanjem kohezije.

Izračunani vplivi na konstrukcijo znašajo:

Preglednica 9: Vplivi na kamnito zložbo - visok vodostaj

	G	E _{ah}	E _{av}	E _p
SILA	82,5 kN/m	60,3 kN/m	17,3 kN/m	88,8 kN/m
ROČICA A	0,89 m	0,91 m	1,45 m	0,44 m
M ^A	-73,0 kNm/m	54,9 kNm/m	-25,1 kNm/m	-39,1 kNm/m
ROČICA C	0,16 m	0,91 m	0,73 m	0,44 m
M ^C	-13,2 kNm/m	54,9 kNm/m	-12,5 kNm/m	-39,1 kNm/m

Na osnovi delujočih sil, smo z enačbama 4.01 in 4.02 preverili odpornost zložbe proti prevrnitvi;

$$M_{prev,d}^A < M_{odp,d}^A$$

$$32,8 \text{ kNm/m} < 65,7 \text{ kNm/m} ,$$

s pomočjo enačb 5.01 in 5.02 pa odpornost proti zdrsu;

$$E_{ad} < T_d$$

$$81,4 \text{ kN/m} < 104,3 \text{ kN/m} ,$$

Z enačbami 6.01 - 6.10 smo določili lego rezultante in ugotovili, da leži 36 cm od središča temelja, torej gre za veliko ekscentričnost. To pomeni, da celoten temelj ni tlačno obremenjen in smo lahko izračunali le velikosti tlačnih obremenitev na desnem robu temelja.

$$e_d = 0,42\text{m} < 0,24\text{m} = \frac{B}{6} \Rightarrow \text{velika ekscentričnost}$$

$$p_D = 227,8 \text{ kPa}, B^* = 3\left(\frac{B}{2} - e_d\right) = 0,93 \text{ m}$$

Pri izračunu ekscentričnosti smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov E_{av} in oba momenta, ki ju okrog točke C (Slika 23) povzročata obe komponenti rezultante, množili z 1,35. Težo smo upoštevali v nefaktorirani vrednosti.

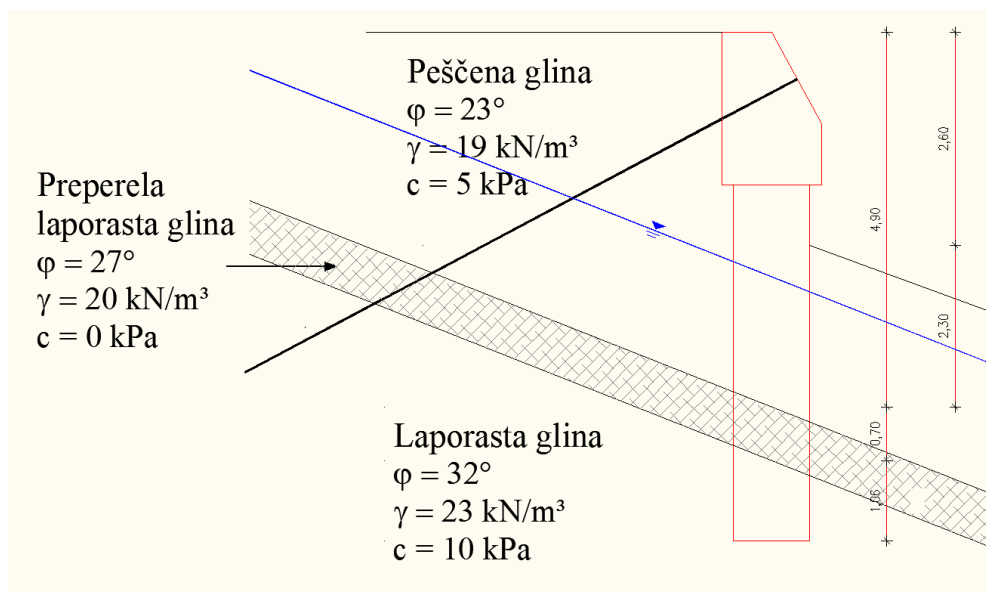
S pomočjo enačb 7.01 – 7.10 pa smo preverili tudi, ali je nosilnost tal pod kamnito zložbo dovolj velika, da bo prenesla obremenitev zaradi lastne teže kamnite zložbe:

$$R_d/A' > V_d/A'$$

$$172,0 \text{ kPa} > 170,9 \text{ kPa}$$

Pri kontroli nosilnosti tal smo za horizontalni vpliv sil upoštevali razliko faktoriranih vrednosti horizontalne komponente rezultante aktivnih pritiskov E_{ah} in rezultante pasivnih pritiskov E_p . E_{ah} smo množili z varnostnim faktorjem 1,35, E_p pa smo delili s faktorjem 1,4. Za vertikalni vpliv sil pa smo upoštevali nefaktorirano lastno težo konstrukcije, medtem ko smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov množili z 1,35.

5.4.2 Sidrana stena



Slika 24: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 2

S pomočjo enačb 1.01-1.04 in 2.01-2.06 smo izračunali zemeljske pritiske za in pred konstrukcijo, nad vpetjem:

Preglednica 10: Zemeljski pritiske za konstrukcijo - visok vodostaj

E_{az}									
z [m]	σ_v [kPa]	u [kPa]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]
0,00	20,56	0,00	20,56	0,44	6,62	2,39	50,26	67,85	2,05
3,20	81,36	0,00	81,36	0,44	6,62	29,02	55,04	74,30	4,08
4,90	113,66	17,00	96,66	0,44	6,62	35,73			
4,90	113,66	17,00	96,66	0,38	0,00	36,30	26,33	35,54	5,25
5,60	127,66	24,00	103,66	0,38	0,00	38,93			
						Eu	28,80	38,88	4,80
								216,58	3,77

Preglednica 11: Zemeljski pritiske pred konstrukcijo - visok vodostaj

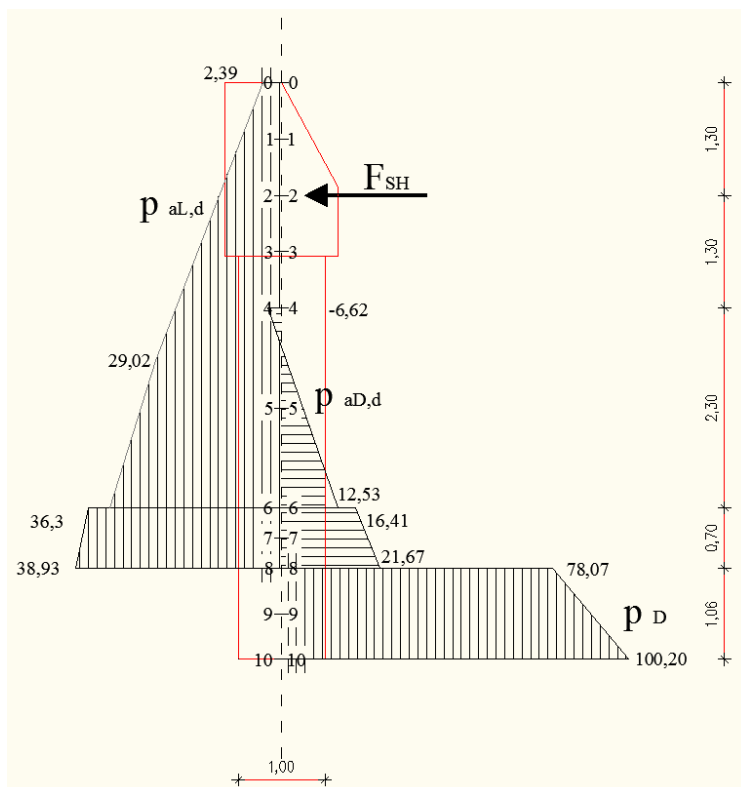
E_{as}								
Z [m]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]	
0,00	0,00	0,44	6,62	-6,62	6,79	4,85	2,39	
2,30	43,70	0,44	6,62	12,53				
2,30	43,70	0,38	0,00	16,41	13,33	9,52	2,67	
3,00	57,70	0,38	0,00	21,67				
						14,37	2,57	

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{as} = 216,58 - 14,37 = 202,21 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{az}(3,77\text{m} - 1,3\text{m}) - E_{as}(2,57\text{m} + 1,3\text{m})}{E} = \frac{216,58 \cdot 2,37 - 14,37 \cdot 3,87}{202,21} = 2,37\text{m}$$

Vplivi:



Grafikon 7: Obremenitve sidrane pilotne stene - Varianta 2

Z enačbami 1.01-1.04, 3.01,3.02 in 8.01-8.03, ki predstavljajo statične ravnovesne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in silo v sidru:

$$M_D = 28,16 \frac{D^3}{3} + 199,16 \frac{D^2}{2} + 335,70D$$

$$E_{zg} \cdot e_{zg} - M_D = 0$$

↓↓

$$D = 1,06\text{m}$$

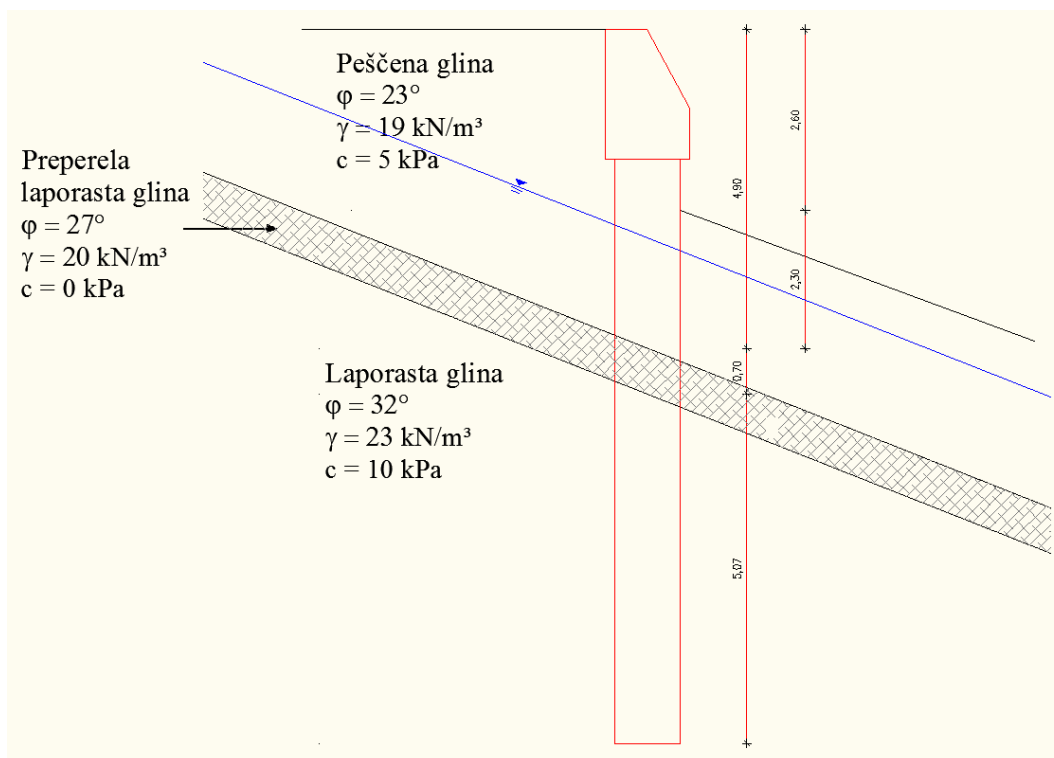
$$E_D = 28,16 \frac{D^2}{2} + 78,07D = 98,64 \text{ kN/m}$$

Z enačbama 8.04 in 8.05 smo izračunali potrebno silo v sidru:

$$F_{sh} = 103,63 \text{ kN/m}$$

$$F_s = 117,37 \text{ kN/m}$$

5.4.3 Konzolna stena



Slika 25: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 2

Zemeljski pritiski nad vpetjem so enaki kot pri sidrani pilotni steni, zato ponoven izračun ni potreben.

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{as} = 216,58 - 14,37 = 202,21 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{az}(3,77\text{m}) - E_{as}(2,57\text{m} + 2,6\text{m})}{E} = \frac{216,58 \cdot 3,77 - 14,37 \cdot 5,17}{202,21} = 3,67\text{m}$$

S pomočjo enačb 9.01 - 9.09, ki predstavljajo statične ravnovesne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in globino vrtilišča:

$$M_D = 28,16 \frac{d^3}{3} + 235,77 \frac{d^2}{2} + 437,19d$$

$$E_D = 28,16 \frac{d^2}{2} + 78,07d$$

$$M_L = \frac{46,25}{3}(D^3 - d^3) + \frac{576,14}{2}(D^2 - d^2) + 1775,98(D - d)$$

$$E_L = \frac{46,25}{2}(D^2 - d^2) + 317,14(D - d)$$

$$\sum E = -E + E_d - E_L = 0$$

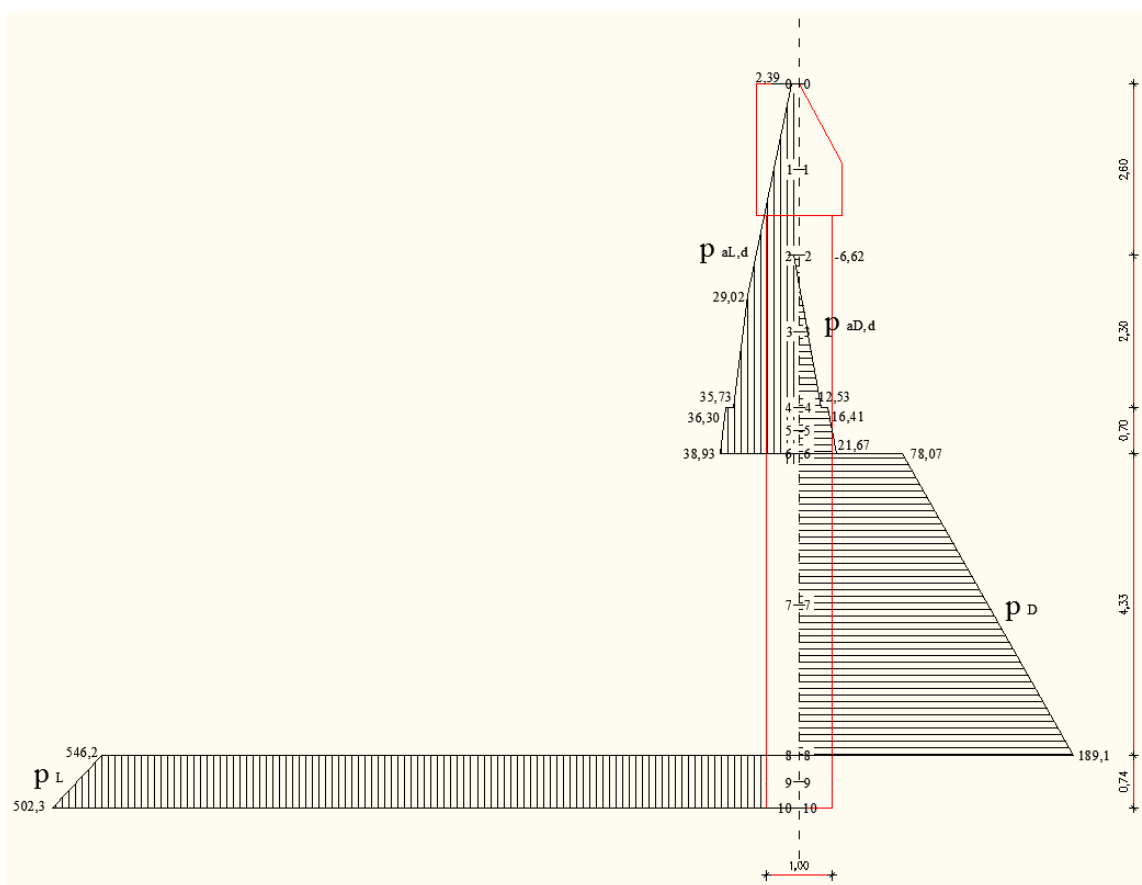
$$\sum M^0 = Ee - M_D + M_L = 0$$

↓↓

$$D = 5,07\text{m}$$

$$d = 4,33\text{m}$$

Vplivi:



Grafikon 8: Obremenitve konzolne pilotne stene - Varianta 2

5.5 Varianta 3: Arteška voda

Za računanje zemeljskih pritiskov smo uporabili karakteristike zemljin, ki smo jih določili v Varianti 3. Vodostaj je ostal nespremenjen glede na Varianto 2, vendar se v sloju peščene glin upošteva arteško vodo.

5.5.1 Kamnita zložba

S pomočjo enačb 2.01-2.06 za nagnjeno zaledje smo izračunali zemeljske pritiske, ki delujejo na kamnito zložbo. Kamnita zložba ima zaledje le v sloju peščene glin, zato smo za izračun aktivnih pritiskov potrebovali le te karakteristike, medtem ko je pred konstrukcijo še nasip, ki prispeva k pasivnim pritiskom:

Peščena glina	Nasip
$\varphi' = 22^\circ$	$\varphi' = 34^\circ$
$c' = 5 \text{ kPa}$	$c' = 0 \text{ kPa}$
$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$

$$K_a = 0,72$$

$$\delta = \beta = 20^\circ$$

$$E_a = 64,7 \text{ kN/m}$$

$$E_{ah} = 60,8 \text{ kN/m}$$

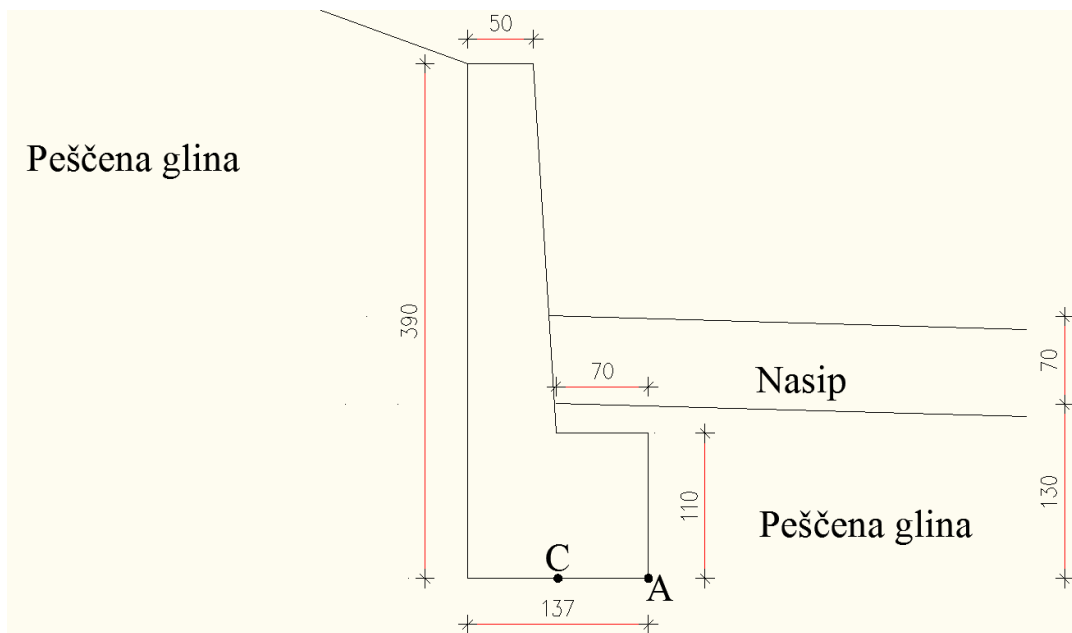
$$E_{av} = 22,1 \text{ kN/m}$$

$$K_{p1} = 3,54$$

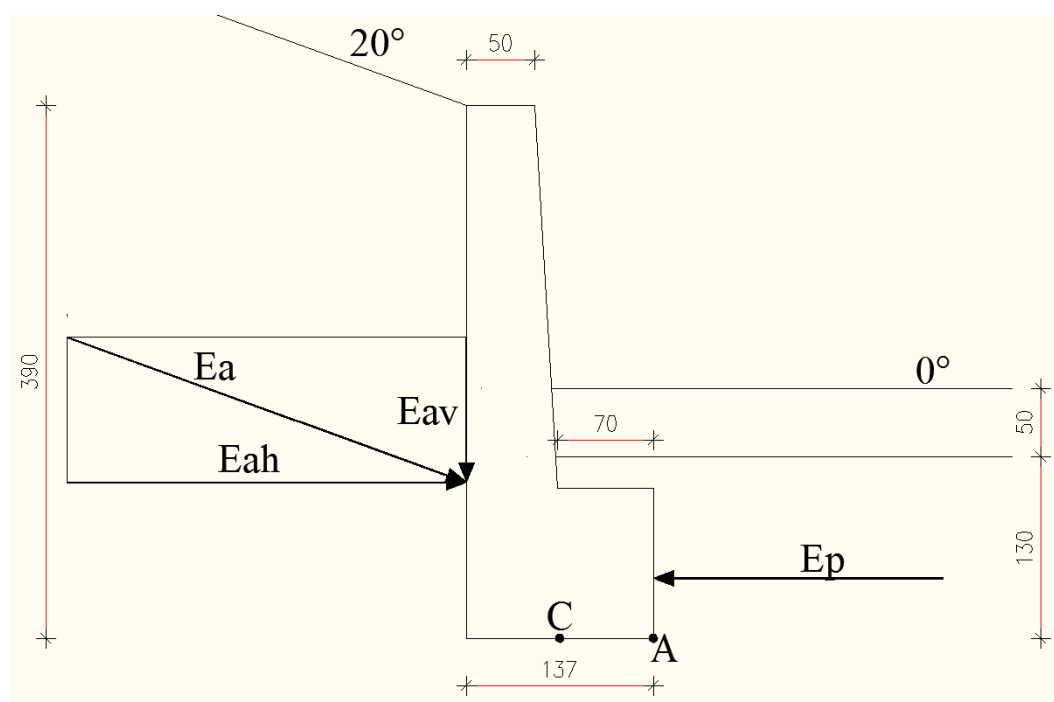
$$K_{p2} = 2,20$$

$$E_p = 90,1 \text{ kN/m}$$

Na osnovi izračunanega zemeljskega pritiska smo dimenzionirali kamnito zložbo.



Slika 26: Kamnita zložba-sloji-arteška voda



Slika 27: Računski model za presojo kamnite zložbe-arteška voda

Z optimizacijo dimenzij in oblike zložbe se je izkazalo, da izbranim kriterijem glede prevrnitve, zdrsa in nosilnosti temeljnih tal, najbolj ustreza zložba z vertikalno izvedbo zaledne stene in izvedbo vidne stene v strmem naklonu, kar je lažje izvedljivo kot povsem vertikalna izvedba.

Zemeljski pritiski so izračunani po metodi Rankine-a z upoštevanjem kohezije.

Izračunani vplivi na konstrukcijo znašajo:

Preglednica 12: Vplivi na kamnito zložbo-visok vodostaj

	G	E _{ah}	E _{av}	E _p
SILA	88,6 kN/m	60,8 kN/m	22,1 kN/m	90,1 kN/m
ROČICA A	0,83 m	0,97 m	1,37 m	0,64 m
M ^A	-73,4 kNm/m	58,8 kNm/m	-30,3 kNm/m	-57,8 kNm/m
ROČICA C	0,14 m	0,97 m	0,69 m	0,64 m
M ^C	-12,6 kNm/m	58,8 kNm/m	-15,2 kNm/m	-57,8 kNm/m

Na osnovi delujočih sil smo z enačbama 4.01 in 4.02 preverili odpornost zložbe proti prevrnitvi;

$$M_{prev,d}^A < M_{odp,d}^A$$

$$30,4 \text{ kNm/m} < 66,0 \text{ kNm/m} ,$$

s pomočjo enačb 5.01 in 5.02 pa odpornost proti zdrsu;

$$E_{ad} < T_d$$

$$82,1 \text{ kN/m} < 107,9 \text{ kN/m} .$$

Z enačbami 6.01 - 6.10 smo določili lego rezultante in ugotovili, da leži 8 cm od središča temelja, torej gre za malo ekscentričnost. To pomeni, da celoten temelj ni tlačno obremenjen in smo lahko izračunali le velikosti tlačnih obremenitev na desnem robu temelja.

$$e_d = 0,39\text{m} > 0,23\text{m} = \frac{B}{6} \Rightarrow \text{velika ekscentričnost}$$

$$p_D = 268,5 \text{ kPa}, B^* = 3\left(\frac{B}{2} - e_d\right) = 0,88 \text{ m}$$

Pri izračunu ekscentričnosti smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov E_{av} in oba momenta, ki ju okrog točke C (Slika 23) povzročata obe komponenti rezultante, množili z 1,35. Težo smo upoštevali v nefaktorirani vrednosti.

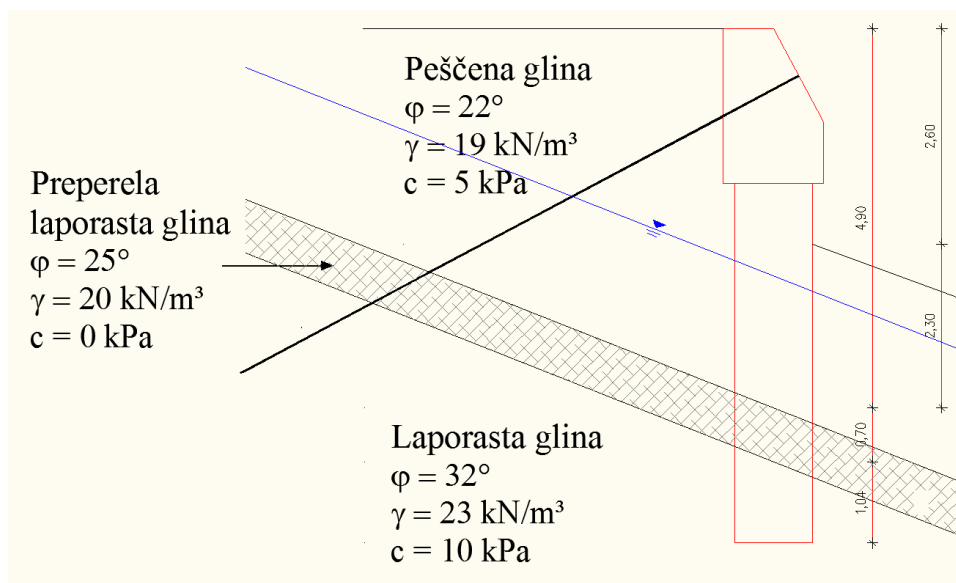
S pomočjo enačb 7.01 – 7.10 pa smo preverili tudi, ali je nosilnost tal pod kamnito zložbo dovolj velika, da bo prenesla obremenitev zaradi lastne teže kamnite zložbe:

$$R_d/A' > V_d/A'$$

$$203,3 \text{ kPa} > 201,4 \text{ kPa}$$

Pri kontroli nosilnosti tal smo za horizontalni vpliv sil upoštevali razliko faktoriranih vrednosti horizontalne komponente rezultante aktivnih pritiskov E_{ah} in rezultante pasivnih pritiskov E_p . E_{ah} smo množili z varnostnim faktorjem 1,35, E_p pa smo delili s faktorjem 1,4. Za vertikalni vpliv sil pa smo upoštevali nefaktorirano lastno težo konstrukcije, medtem ko smo vertikalno komponento rezultante aktivnih pritiskov množili z 1,35.

5.5.2 Sidrana stena



Slika 28: Sloji in vodostaj pri sidrani pilotni steni s karakteristikami Variante 3

S pomočjo enačb 1.01-1.04 in 2.01-2.06 smo izračunali zemeljske pritiske za in pred konstrukcijo, nad vpetjem:

Preglednica 13: Zemeljski pritiski za konstrukcijo-arteška voda

E_{az}									
z [m]	σ_v [kPa]	u [kPa]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c^*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]
0,00	20,56	0,00	20,56	0,45	6,75	2,61	116,56	157,35	3,18
4,90	113,66	0,00	113,66	0,45	6,75	44,97			
4,90	113,66	17,00	96,66	0,41	0,00	39,23	28,46	38,41	5,25
5,60	127,66	24,00	103,66	0,41	0,00	42,07			
						Eu	14,35	19,37	5,27
								215,14	3,74

Preglednica 14: Zemeljski pritiski pred konstrukcijo-arteška voda

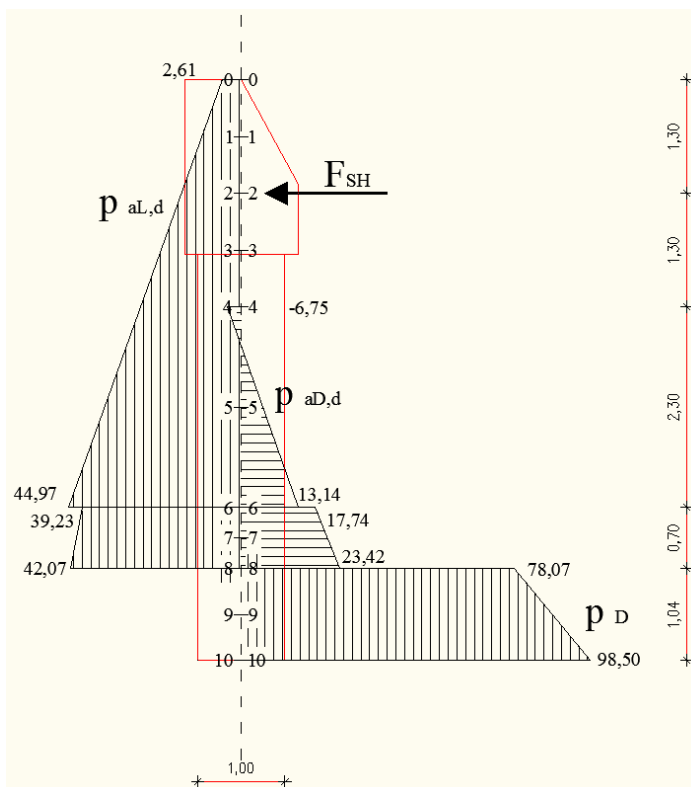
E_{as}								
Z [m]	σ_v' [kPa]	k_a	$2c^*(k_a)^{1/2}$ [kPa]	p_a [kPa]	E_a [kN/m]	E_{ad} [kN/m]	e_a [m]	
0,00	0,00	0,45	6,75	-6,75	7,35	5,25	2,34	
2,30	43,70	0,45	6,75	13,14				
2,30	43,70	0,41	0,00	17,74	14,40	10,29	2,67	
3,00	57,70	0,41	0,00	23,42				
						15,54	2,56	

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{as} = 215,14 - 15,54 = 199,60 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{az}(3,74\text{m} - 1,3\text{m}) - E_{as}(2,56\text{m} + 1,3\text{m})}{E} = \frac{215,14 \cdot 2,44 - 15,54 \cdot 3,86}{199,60} = 2,33\text{m}$$

Vplivi:



Grafikon 9: Obremenitve sidrane pilotne stene - Varianta 3

Z enačbami 1.01-1.04, 3.01,3.02 in 8.01-8.03, ki predstavljajo statične ravnovesne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in silo v sidru:

$$M_D = 28,16 \frac{D^3}{3} + 199,16 \frac{D^2}{2} + 335,70D$$

$$E_{zg} \cdot e_{zg} - M_D = 0$$

↓↓

$$D = 1,04 \text{ m}$$

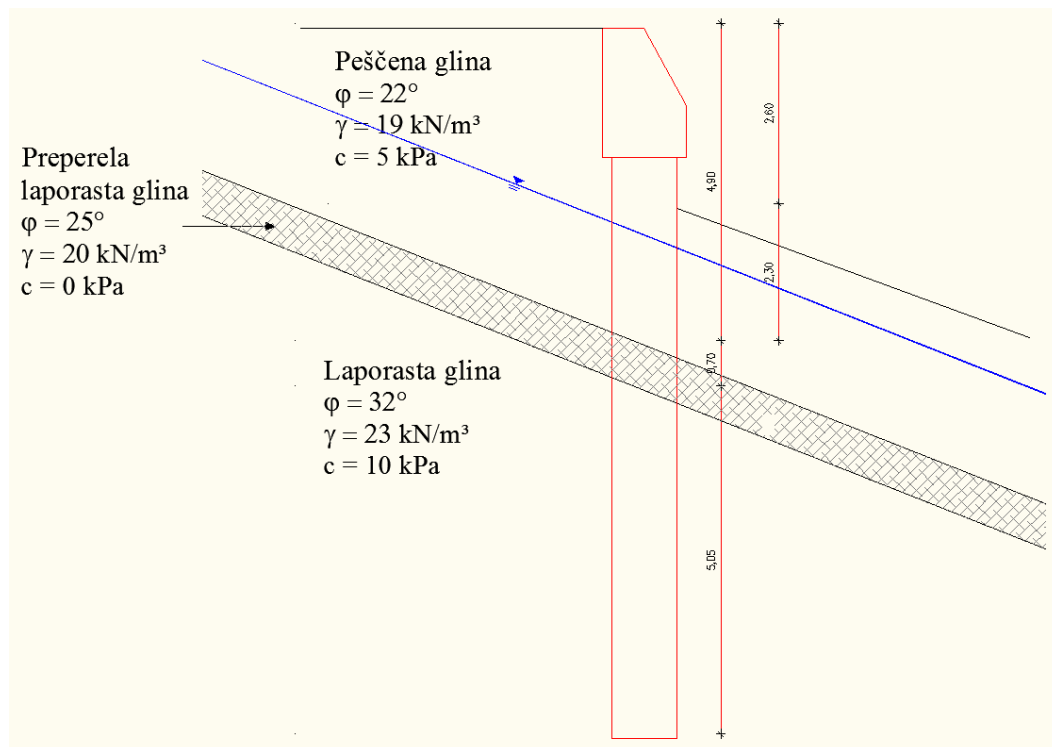
$$E_D = 28,16 \frac{D^2}{2} + 78,07D = 95,99 \text{ kN/m}$$

Z enačbama 8.04 in 8.05 smo izračunali potrebno silo v sidru:

$$F_{sh} = 106,28 \text{ kN/m}$$

$$F_s = 120,37 \text{ kN/m}$$

5.5.3 Konzolna stena



Slika 29: Sloji in vodostaj pri konzolni pilotni steni s karakteristikami Variante 3

Zemljski pritiski nad vpetjem so enaki kot pri sidrani pilotni steni, zato ponoven izračun ni potreben.

Celotni pritisk nad vpetjem in ročica:

$$E = E_{az} - E_{as} = 215,14 - 15,54 = 199,60 \text{ kN/m}$$

$$e = \frac{E_{az}(3,74\text{m}) - E_{as}(2,56\text{m} + 2,6\text{m})}{E} = \frac{215,14 \cdot 3,74 - 15,54 \cdot 5,16}{199,60} = 3,63\text{m}$$

S pomočjo enačb 9.01 - 9.09, ki predstavljajo statične ravnovesne pogoje, smo izračunali potrebno globino vpetja in globino vrtilišča:

$$M_D = 28,16 \frac{d^3}{3} + 235,77 \frac{d^2}{2} + 437,19d$$

$$E_D = 28,16 \frac{d^2}{2} + 78,07d$$

$$M_L = \frac{46,25}{3}(D^3 - d^3) + \frac{576,14}{2}(D^2 - d^2) + 1775,98(D - d)$$

$$E_L = \frac{46,25}{2}(D^2 - d^2) + 317,14(D - d)$$

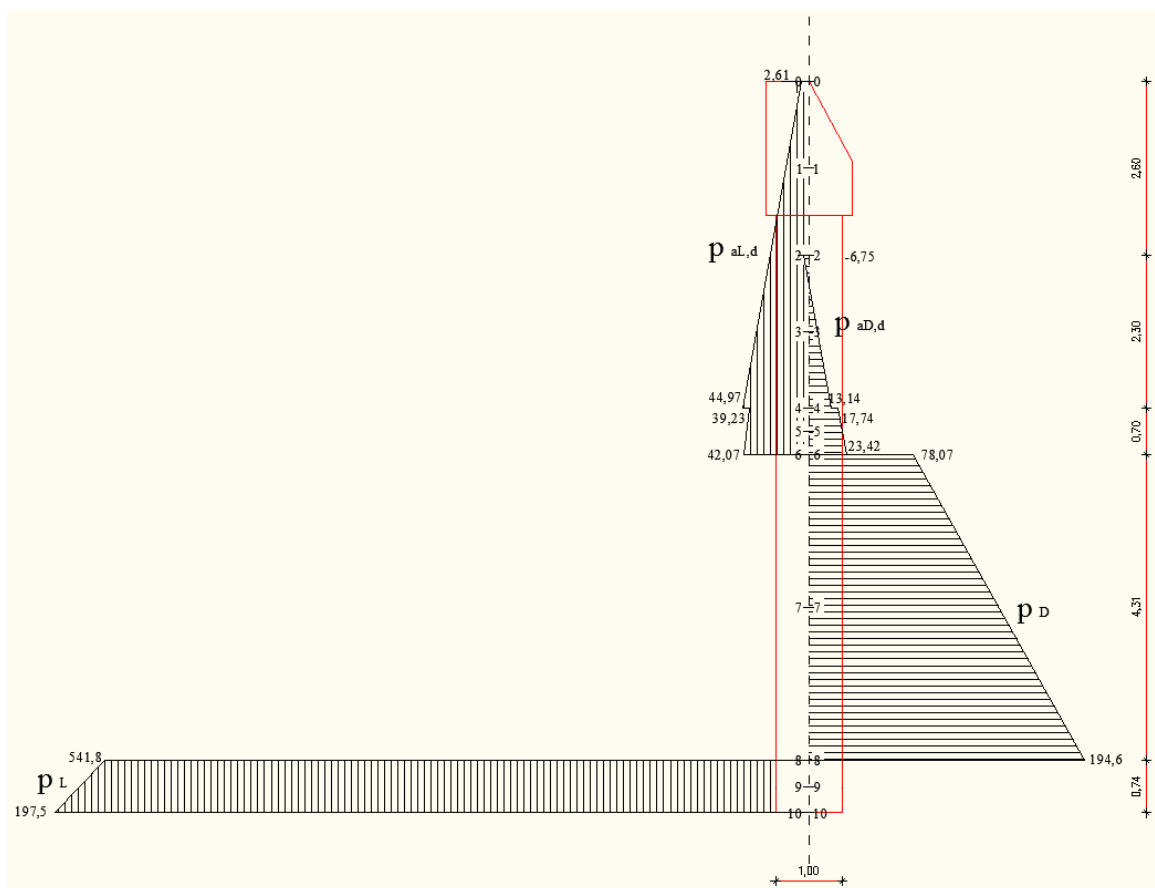
$$\sum E = -E + E_d - E_L = 0$$

$$\sum M^0 = Ee - M_D + M_L = 0$$

↓↓

$$D = 5,05 \text{ m}$$

$$d = 4,31 \text{ m}$$



Grafikon 10: Obremenitve konzolne pilotne sten - Varianta 3

6 PRIMERJAVA IN KOMENTAR REZULTATOV

Potem ko sta bili v predhodnem poglavju izvedena presoja in optimizacija sanacijskih ukrepov, je v tem poglavju predstavljen povzetek rezultatov, primerjava med predlaganimi rešitvami in njihov komentar.

Preglednica 15: Primerjava dimenzij kamnite zložbe

Dimenzije	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Širina temelja	2,06 m	1,45 m	1,37 m
Širina zidu zgoraj	0,90 m	0,65 m	0,50 m
Širina zidu spodaj	0,90 m	0,80 m	0,67 m
Lastna teža	136,20 kN/m	100,0 kN/m	88,60 kN/m

Preglednica 15 kaže, da je za dimenzije kamnite zložbe najbolj merodajna t.i. Varianta 1. Zid je v tej varianti večji predvsem na račun nizkih karakteristik, ki bistveno bolj vplivajo na dimenzije kamnite zložbe kot pa spremembe vodostaja. Razlog za to je dejstvo, da na mehanizem celotnega področja vodostaj močno vpliva medtem, ko na lokalni problem kamnite zložbe nima tako bistvenega vpliva, saj je tudi pri najvišjem predpostavljenem vodostaju le manjši del kamnite zložbe v vodi. Iz zgornje tabele je jasno razvidno, da se dimenzije zidu bistveno bolj spremenijo med Varianto 1 in 2, kot pa med Varianto 2 in 3. Konstrukcija pri variantah 2 in 3 postane v vertikalnem delu razmeroma vitka, zaradi česar bi bilo verjetno potrebno izvesti armirano-betonsko konstrukcijo namesto kamnite zložbe. Pri teh dveh variantah je bila pri računu kontaktnih tlakov ugotovljena velika ekscentričnost (temelj v tlaku nad 60%). Ob tem velja dodati, da pri tem računu pasivni pritiski na spodnji strani konstrukcije niso bili upoštevani kar je tudi običajen pristop. Dejansko so pasivni pritiski zaradi velike višine zasipa precejšnji, zato bo temelj kamnite zložbe po dokončanem zasipu in kasneje v fazi eksploatacije v celoti tlačeni tudi po Varianti 2 in 3. Omenimo še, da so dimenzije zložbe, ki je bila dejansko izvedena, zelo podobne dimenzijam zložbe iz Variante 1.

Preglednica 16: Primerjava dimenzij sidrane pilotne stene

Dimenzije	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Globina vpetja	1,06 m	1,06 m	1,04 m
Rezultanta sil nad vpetjem	217,40 kN/m	202,20 kN/m	199,60 kN/m
Sila v sidru	135,30 kN/m	117,40 kN/m	120,40 kN/m

Iz tabele je razvidno, da različne predpostavke glede vzrokov plazenja niso bistveno vplivale na potrebno globino vpetja in posledično na obremenitev pilota. Bolj pa so različni predpostavljeni vzroki vplivali na obremenitev nad vpetjem in na silo v sidru. To je posledica dejstva, da se karakteristike sloja laporaste gline, v katero so piloti vpeti v analizah niso spreminjale, medtem ko so se, poleg spremenjenega vodostaja, karakteristike zgornjih dveh slojev bistveno spreminjale.

Preglednica 17: Primerjava dimenzij konzolne pilotne stene

Dimenzije	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Globina vrtilišča	4,59 m	4,33 m	4,31 m
Globina vpetja	5,39 m	5,07 m	5,05 m

Podobno kot v primeru kamnite zložbe se izkaže, da je za konzolno vpete pilote najbolj merodajna t.i. Varianta 1, ki zahteva največjo potrebno globino vpetja. Pri Variantah 2 in 3 je potrebna nekoliko manjša globina vpetja (za ca. 6%), ob tem pa je razlika med tema variantama minimalna.

Izkazalo se je torej, da je za naš primer nekoliko bolj merodajno, če se v računu predpostavijo nizke karakteristike zemljine in nižji vodostaj, čeprav razlike niso tako občutne kot pri kamnitem zidu.

Ob tem velja omeniti, da je dolžina vpetja dejanskih pilotov nekoliko nižja – približno 5 m, kar je verjetno posledica dejstva, da smo v naših računih privzeli nekoliko bolj konzervativen model: nagnjen teren pred konstrukcijo in aktivni porušni klin pred konstrukcijo nad območjem vpetja.

7 ZAKLJUČEK

V zaključku bi rad povzel ugotovitve in zanimivosti, do katerih sem prišel, tekom obdelave problema, ki je predstavljal temo diplomske naloge.

Cilj diplomske naloge je bil predvsem poiskati različne možne, hkrati pa čim bolj realne okoliščine, v katerih je prišlo do nastanka plazu, ter jih nato obravnavati v različnih variantah sanacijskih ukrepov. Tako so bili analizirani ukrepi pri dejanski sanaciji, predstavljena pa je bila tudi alternativna možnost..

Predpostavili so se trije različni faktorji kot možni vzroki za nastanek plazenja. Kljub temu, da so bila računski izhodišča in vmesni rezultati med seboj precej različni, so bile dimenzije sanacijskih ukrepov na koncu precej podobne, še posebej pri dimenzijah pilotnih sten, medtem ko so se dimenzije kamnitih zložb nekoliko bolj razlikovale.

Sodeč po dobljenih rezultatih lahko ugotovimo, da dejansko uporabljene projektne rešitve v kombinaciji z našimi predpostavkami izpolnjujejo zahteve standarda. Hkrati pa s precejšnjo gotovostjo lahko trdimo, da bi bilo področje mogoče uspešno sanirati tudi s predstavljenimi alternativnimi sanacijskimi ukrepi, s čimer bi se povrnila funkcionalnost lokalne ceste ter zavarovali stanovanjski objekti, ki jih je obravnavani problem plazenja na tem območju že začel ogrožati.

8 UPORABLJENI VIRI

1. Beg, D. (Ur.), Pogačnik, A. (ur.) 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.
2. Crnkovič-Klanjšek, J. 2009. Geološko geotehnično poročilo: Geološko geotehnično poročilo o pogojih sanacije plazu in ocena stroškov sanacije. Trbovlje, Ozzing: 10 str.
3. Saviozzi, M. 2009. Načrt gradbenih konstrukcij in drugi gradbeni načrti – Sanacija plazu: Sanacija plazu na lokalni cesti LC 122020 Hrastnik-Prapretno-Hrastnik v km 1,300. Trbovlje, Ozzing: 45 str.

8.1 ELEKTRONSKI VIRI

1. Obična Hrastnik.2011.
<http://zemljevid.najdi.si/> (pridobljeno 25. 6. 2011)