

Analiza stabilnosti glinokopa "Grabovac"

Grizelj, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:141458>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

ANALIZA STABILNOSTI GLINOKOPA „GRABOVAC“

Diplomski rad

Marko Grizelj

R 118

Zagreb, 2016.

Ovim putem se zahvaljujem voditelju izv. prof. dr. sc. Petru Hrženjaku na korisnim savjetima pri izradi ovoga diplomskog rada, i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje upite.

Također, zahvaljujemse tvrtki Tondach d.o.o Đakovo što su omogućili istraživanje i analizu stabilnosti njihovog glinokopa.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili TU, uz mene, bez kojih sve ovo što sam do sada postigao ne bi bilo moguće.

ANALIZA STABILNOSTI GLINOKOPA „GRABOVAC“

MARKO GRIZELJ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološkom naftnom fakultetu
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovome radu prikazana je analiza stabilnosti glinokopa „Grabovac“. Za analizu su korišteni podaci koje posjeduje Tondach d.o.o, Đakovo. Za provođenje analize korištene su tri različite metode proračuna. Korištene metode proračuna su Hoekova grafička metoda za kružni slom, program GeoStudio/Slope te aplikacija Slope/Ex. Analiza je provedena na radnim i završnim kosinama kopa. Vrijednosti faktora sigurnosti su određene za različite slučajeve na kosini gdje nema opterećenja na njoj i bez utjecaja podzemne vode te u slučajevima opterećenja i utjecaja podzemne vode i njihove kombinacije.

Ključne riječi: glinokop, analiza stabilnosti, faktor sigurnosti,

Diplomski rad sadrži: 67 stranica, 21 slika, 9 tablica, 19 izraza, 21 priloga, 36 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierotijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 19. rujan 2016.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

THE STABILITY ANALYSIS OF A GRABOVAC CLAY PIT

MARKO GRIZELJ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of Mining and Geotechnical
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This analysis shows the stability of a Grabovac clay pit. All the information used for this analysis is owned by Tondach d. o. o. Đakovo. For the implementation of this analysis there have been used three different methods of calculation. These are the Hoek's graphic method for circular fracture, the GeoStudio/Slope programme and Slope/Ex application. The analysis was conducted on workind and final slope digs. Values of the safety factor were determined for different cases on the slope without burdening and influence of subterranean waters, but also in cases of burdening and subterranean waters, as well as in cases where there is a combination of these factors.

Keywords: clay pit, stability analysis, safety factor,

Thesis contains: 67 pages, 21 figures, 9 tables, 19 formula, 21 enclosures, 36 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Pierotijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor

Reviewers: PhD Petar Hrženjak, Associate Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Date of defense: September 19, 2016

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS IZRAZA	IV
POPIS PRILOGA.....	V
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICE	VI
2. Stabilnost kosina	2
2. 1 Oblici nestabilnosti.....	3
2. 2 Značajke i geometrija klizišta	8
2. 3 Uzroci klizanja	11
2. 4 Metode analize stabilnosti kosina	14
2. 4. 1 Dijagramska Hoekova analiza stabilnosti kosina	14
2. 4. 2 Metode opće granične ravnoteže	17
3. Glinokop „Grabovac“	24
3. 1 Opće značajke	24
3. 2 Geološke, hidrogeološke i geomehaničke značajke	25
3. 2. 1 Geološke značajke.....	25
3. 2. 2 Hidrogeološke značajke područja	27
3. 2. 3 Geomehaničke značajke	27
3. 3 Rudarsko-tehnološki dio	28
3. 3. 1 Rezerve i značajke mineralne sirovine	29
3. 3. 2 Eksploatacija mineralne sirovine.....	31
3. 4 Odvodnjavanje i zaštita od površinskih i podzemnih voda	33
4. Analiza stabilnosti glinokopa „Grabovac“	35
4. 1. Proračuni faktora sigurnosti Hoekovom metodom.....	36
4. 2. Proračuni faktora sigurnosti GeoStudio/Slope programom i Slope/Excel aplikacijom	40
5. Zaključak.....	44
6. Literatura	45
PRILOZI	46

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Shematski prikaz odrona (Highland, Borbrowsky 2008)	4
Slika 2-2. Shematski prikaz prevrtanja (Highland, Borbrowsky 2008)	5
Slika 2-3. Shematski prikaz rotacijskog klizanja (Highland, Borbrowsky 2008)	6
Slika 2-4. Shema translacijskog klizanja (Highland, Borbrowsky 2008)	7
Slika 2-5. Shematsk prikaz puzanja (Highland, Borbrowsky 2008)	8
Slika 2-6. Dijelovi klizišta (brojevi se odnose na terminologiju navedenu u tablici 2-1 (Počekal 2012)).....	9
Slika 2-7. Porast pornog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavits – Nossan 2006).....	12
Slika 2-8. Utjecaji koji povećavaju posmična naprezanja u zoni potencijalne klizne plohe na kosini (Szavits-Nossan 2006)	12
Slika 2-9. Uvjeti toka podzemne vode (Hoek, Bray 1974)	16
Slika 2-10. Grafički prikaz rješavanja dijagrama u koracima (Hoek, Bray 1974)	17
Slika 2-11. Sile na karakterističnoj lameli (Szavits-Nossan 2006)	19
Slika 2-12. Treća razina iteracije u proračunu faktora sigurnosti po općoj metodi granične ravnoteže (Szavits-Nossan 2006)	22
Slika 3-1. Zemljovidni položaj eksploatacijskog polja, M 1 : 100 000 (Strajher 2004)	24
Slika 3-2. Geološka karta šireg područja eksploatacijskog polja M 1:50 000	26
Slika 3-3. Prikaz glinovitog pijeska do prašinaste gline.....	26
Slika 3-4. Prikaz geološkog profila bušotine B-49 (Kastmüller 2013)	31
Slika 3-5. Shema iskopa i utovara (Strajher 2004).....	32
Slika 3-6. Prikaz eksploatacijskog polja Grabovac	33
Slika 4-1. Prikaz vrijednosti za izračun faktora sigurnosti za etaže +92/+96 i +100/+104.37	
Slika 4-2. Prikaz vrijednosti za izračun faktora sigurnosti za etaže +96/+100 i +104/+10838	
Slika 4-3. Prikaz rješenja za faktor sigurnosti završne kosine glinokopa	39

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Definicija elemenata klizišta (Mihalić – Arbanas 2006).....	10
Tablica 2-2. Karakteristike nekih povijesnih varijanti metoda granične ravnoteže	23
Tablica 3-1. Srednji podaci stanice za mjerenje kiše (prema Srebrenikoviću 1974)	25
Tablica 3-2. Rezultati ispitivanja fizikalno – mehaničkih svojstava i elemenata posmične čvrstoće (Nuić 1991)	28
Tablica 3-3. Potvrđene količine rezervi ciglarske gline na eksploatacijskom polju „Grabovac“ sa stanjem 31.12.2012. (Kastmüller 2013).....	30
Tablica 4- 1. Tehnički elementi (Strajher 2004).....	35
Tablica 4- 2. Fizikalno - mehaničke značajke sirovine (Strajher 2004).....	36
Tablica 4-3. Prikaz vrijednosti faktora sigurnosti bez utjecaja podzemne vode i opterećenja.....	42
Tablica 4-4. Prikaz vrijednosti faktora sigurnosti s utjecajem podzemne vode i opterećenja, Slope/Ex	42

POPIS IZRAZA

Izraz 2-1. Posmična čvrstoća „ τ_f “	13
Izraz 2-2. Efektivna normalna naprezanja „ σ' “	14
Izraz 2-3. Posmična sila „ τ “	15
Izraz 2-4. Bezdimenzionalni faktor	16
Izraz 2-5. Faktor sigurnosti „ F “	18
Izraz 2-6. Faktor sigurnosti u horizontalnom smjeru „ F_x “	20
Izraz 2-7. Faktor sigurnosti iz globalne ravnoteže momenata sila „ F_m “	20
Izraz 2-8. Nagib međulamelarne sile	20
Izraz 2-9. Vrijednost normalne sile na bazama lamela prema Felleniusu „ N “	20
Izraz 2-10. Faktor sigurnosti prema Felleniusu	21
Izraz 2-11. Vrijednost normalne sile na bazama lamela prema pojednostavljenoj metodi Bishopa i Janbua	21
Izraz 2-12. Faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata prema pojednostavljenoj metodi Bishopa	21
Izraz 2-13. Faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata prema pojednostavljenoj metodi Janbua „ FS_f “	21
Izraz 2-14. Vrijednost normalne sile na bazama lamela prema Morgenstern-Pricea	21
Izraz 4-1. Bezdimenzionalni faktor radne kosine, profili C-C' i D-D'	36
Izraz 4-2. Faktor sigurnosti radne kosine, profil C-C'	37
Izraz 4-3. Faktor sigurnosti radne kosine, profil D-D'	38
izraz 4-4. Bezdimenzionalni faktor završnih kosina, profil A-A' i B-B'	39
Izraz 4-5. Faktor sigurnosti završnih kosina, profil A-A' i B-B'	40

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Prikaz eksploatacijskog polja "Grabovac"	47
Prilog 2a. Završne kosine, profili A-A' i B-B', Mj: Hz 1:5000, V 1:2000	48
Prilog 2b. Radne kosine, profili C-C' i D-D', Mj: Hz 1:5000, V 1:1000.....	49
Prilog 3. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, završna kosina A – A', MJ Hz 1:1000; V 1:500	50
Prilog 4. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, završna kosina B – B'; MJ Hz 1:1000; V 1:500	51
Prilog 5. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, radna kosina C – C'; MJ Hz 1:1000; V 1:500	52
Prilog 6. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, radna kosina D – D'; MJ Hz 1:500; V 1:500	53
Prilog 7. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil A – A'	54
Prilog 8. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil A – A'; seizmika	55
Prilog 9. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil A – A'; podzemna voda	56
Prilog 10. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil B – B'.....	57
Prilog 11. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil B – B'; seizmika	58
Prilog 12. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil B – B'; podzemna	59
Prilog 13. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'	60
Prilog 14. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'; podzemna voda	61
Prilog 15. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'; opterećenje.....	62
Prilog 16. . Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'; podzemna voda i opterećenje	63
Prilog 17. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'	64
Prilog 18. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; podzemna voda	65
Prilog 19. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; opterećenje.....	66
Prilog 20. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; podzemna voda i opterećenje	67

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICE

Oznaka	Jedinica	Opis
τ_f	kPa	- posmična čvrstoća
c	kPa	- kohezija
σ	kPa	-ukupno naprezanje
u	kPa	- porni tlak
φ	°	- kut unutarnjeg trnja
σ'	kPa	- efektivno naprezanje
F	-	- faktor sigurnosti
γ	t/m ³	- volumna masa
N	N	- vrijednost normalnih sila
FS _m	-	- faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata sila
FS _f	-	- faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže sila
w _o	%	- prirodna vlažnost
w _p	%	- granica plastičnosti
w _l	%	- granica tečenja
I _c	-	- indeks konzistencije
ϕ_0	°	- kut otpora na smicanje
T	m ² /s	- koeficijent transmisibiliteta
v _{krit}	m/s	- kritična brzina
k	m/s	- koeficijent hidrauličke provodljivosti
H	m	- visina kosine

1. Uvod

Mehanika tla i stijena usavršile su tijekom proteklih desetljeća prošloga stoljeća takav pristup zadatcima u kojima su razradile racionalnije metode utvrđivanja kako značajki tako i ponašanja materijala. Tu su matematičke i numeričke metode analize stabilnosti, a provjerom rezultata proračuna i proučavanjem mnogih primjera nastalih klizišta, usavršene su pouzdanije metode prognoze stabilnosti terena na osnovi istraživanja terena i ispitivanja uzoraka materijala u laboratoriju.

Upravo zahvaljujući tom napretku, u svijetu se problemi pojave nestabilnosti mogu uočiti i prije njihove same pojave. Za to postoje brojne grafičke, analitičke, grafoanalitičke i dr. metode. Napredovanjem tehnologije u svijetu su se razvili računalni programi za analizu stabilnosti kosina gdje je čovjeku olakšano otkrivanje nestabilnih masa, ali ne smije se zaboraviti pri tome da konačna prosudba mora biti na čovjeku. U razvijanju različitih aplikacija za rješavanje ovoga problema, osim rudara, sudjeluje mnoštvo drugih struka.

U ovome radu provedena je analiza stabilnosti kosina glinokopa „Grabovac“ u čijoj se prošlosti pojavljivala nestabilnost uzrokovana utjecajem podzemne vode i strojeva kojima se vršila eksploatacija. Korištenjem tri različite metode proračuna, za različite slučajeve na kosini, analizirala se stabilnost radnih i završnih kosina glinokopa. Za analizu stabilnosti kosina koristila se Hoekova dijagramska metoda, program GeoStudio/Slope te aplikacija Slope/Ex. Vrijednosti faktora sigurnosti dobiveni različitim metodama za isti slučaj na kosini će se usporediti što daje mogućnosti prikaza odstupanja metoda.

2. Stabilnost kosina

Zbog poremećaja ravnoteže sila u masivu na nagnutim terenima dolazi do prirodne pojave nestabilnosti koja ima veliku ulogu u oblikovanju današnjeg reljefa. Klizišta i uvjeti stabilnosti kosina zahtijevaju istraživanje u kojem bi se na vrijeme uočila mogućnost prirodnih pokreta padina te izbjegla potencijalna opasnost. Pod istraživanjem se obično smatra i utvrđivanje uvjeta građenja raznih objekata bez opasnosti od kasnijih, većih šteta uslijed pojave nestabilnosti.

Nestabilnost kosina obuhvaća događaje koji su vidljivi po premještanju tla i stijenske mase različitom brzinom i u velikom vremenskom rasponu. Pojave nestabilnosti kosina, bilo prirodnih ili umjetnih su:

- globalna: potpuni slom s pojavom klizišta u tlu i u stijenama,
- lokalna: odroni pojedinih dijelova, pretežito u stijenama,
- erozijska: u tlu i u stijenama.

Globalna nestabilnost se javlja kad napadne sile (sila teža, dodatne vanjske sile ili tlak vode) premaše sile otpora na smicanje materijala. Uzrok globalne nestabilnosti može biti potkopavanje nožice kosine, opterećenja vrha kosine i promjena strujnog tlaka podzemne vode te eventualno promjena čvrstoće materijala zbog procesa trošenja, odnosno kombinacijom dvaju ili više uzroka. Seizmička opterećenja također mogu inicirati pojave nestabilnosti.

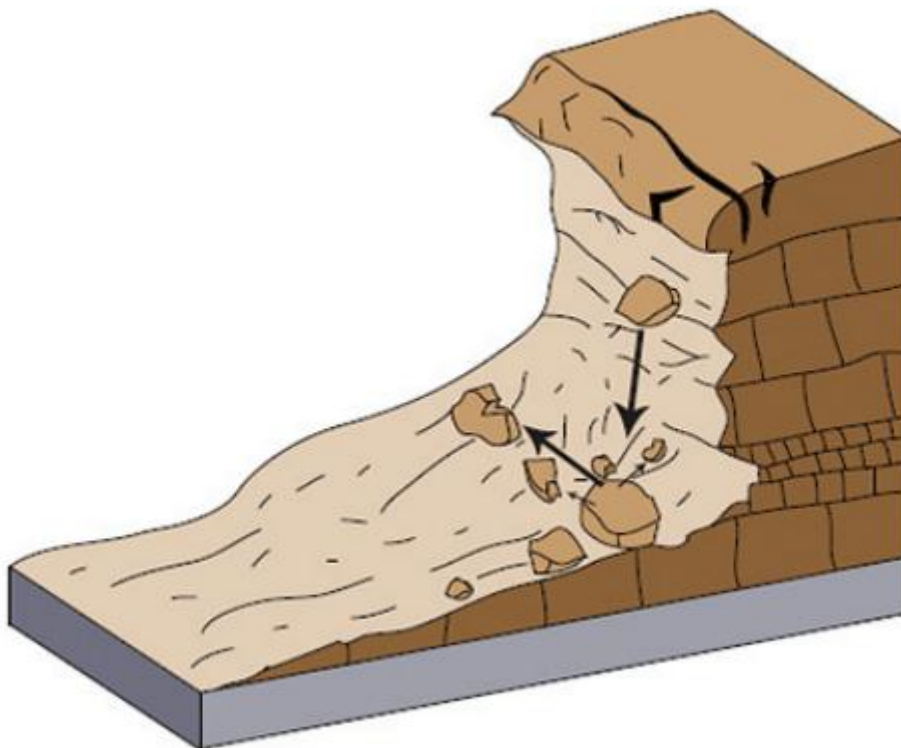
Lokalnu i erozijsku nestabilnost prirodnih padina uvjetuju klimatski i biološki čimbenici. Klimatski čimbenici su: povećanje poreznog tlaka tijekom infiltracije oborina, erozija materijala tijekom jakih kiša, smrzavanje-odmrzavanje, zona fizičkog i kemijskog trošenja. Biološki čimbenici su: mrvljene i kemijsko raspadanje stijena te širenje pukotina uslijed rasta korijenja kao i odvajanje dijelova stijena po sistemu poluge uslijed pomicanja grmlja i drveća zbog vjetrova. Nakon zemljanih radova, bilo zasijecanja ili nasipavanja bitno se mijenja stanje naprezanja u tlu i stijenskoj masi, pa ti faktori postaju prevladavajući u odnosu na prirodne (klimatske i biogenetske). Strojno kopanje manje, a miniranje više usitnjuje stijenu, proširuje pukotine i tako povećava rizik od lokalne i erozijske

nestabilnosti. Uklanjanje vegetacijskog pokrova također može inicirati povećanje lokalne i erozijske nestabilnosti.

2. 1 Oblici nestabilnosti

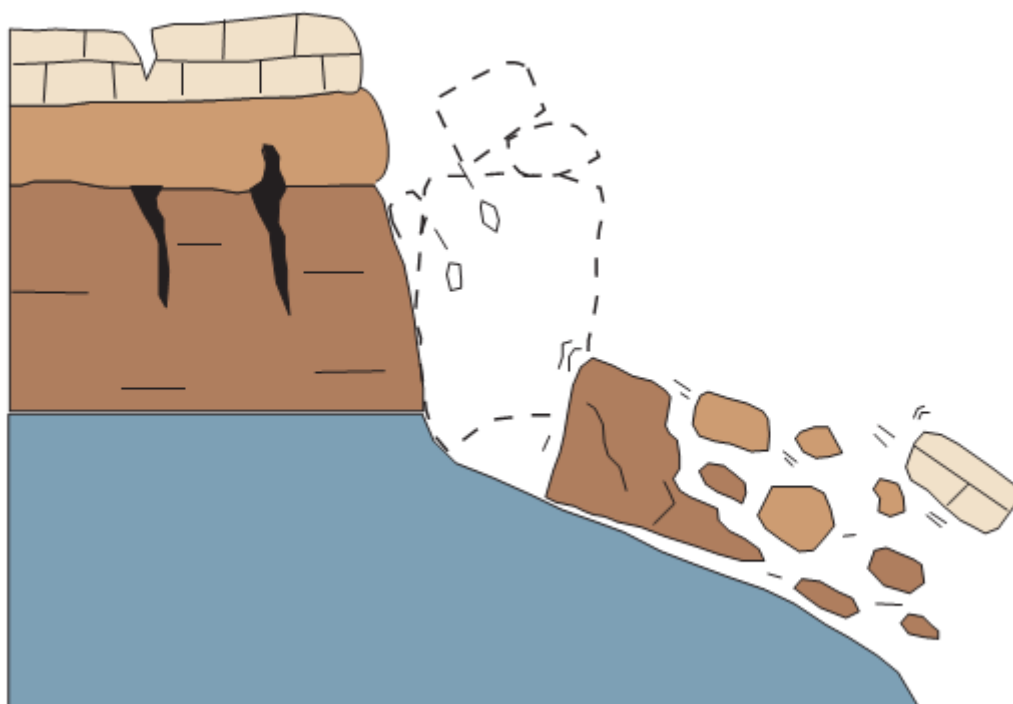
Klasifikacija nestabilnosti je prema tipu kretanja i vrsti materijala. Materijal može biti stijena (*eng. Rock*) ili tlo (*eng. Soil*). Ukoliko je nestabilna masa izgrađena od krupnijih odlomaka tla ili stijene različite veličine, tada se naziva debris (*eng. Debris*). Mogući tipovi nestabilnosti koji opisuju mehanizam pokreta su: odronjavanje (*eng. Fall*), prevrtanje (*eng. Topple*), klizanje (*eng. Slide*), puzanje i kompleksna pokretanja mase (Highland i Borbrowsky 2008). Osim navedenih osnovnih tipova mehanizma kretanja postoje i složene pojave koji uključuju više tipova pokreta (npr. klizanje stijene i tečenje debris).

Odvajanje tla ili stijene na površini strme padine duž plohe na kojoj ima vrlo malo smicanja (ili ga uopće nema) započinje odron. Nakon odvajanja materijal se kreće slobodnim padom ili se kotrlja niz padinu te postiže veliku brzinu kretanja. Inicijator odronjavanja može biti podsijecanje kosine prirodnim procesom kao što je erozija površinskih tokova i rijeka ili diferencijalno trošenje stijena. Pod diferencijalnim trošenjem stijena smatraju se ciklusi smrzavanja i otapanja. Nastajanje odrona uzrokuju i antropogeni procesi u koje se ubrajaju iskapanje prilikom ugradnje i održavanje objekata. Shematski prikaz odrona nalazi se na slici 2-1 (Highland i Borbrowsky 2008).



Slika 2-1. Shematski prikaz odrona (Highland i Borbrowsky 2008)

Kod prevrtanja dolazi do rotacije prema naprijed u odnosu na kosinu od mase stijene ili tla (slika 2-2). Masa stijene ili tla rotira oko točke ili osi koja se nalazi u bazi bloka ispod centra gravitacije pokrenute mase. Uzroci prevrtanja mogu biti uslijed gravitacije zbog težine materijala koji se nalazi iznad pokrenute mase ili zbog vode ili leda u pukotinama stijena. Ovaj mehanizam nestabilnosti se može odvijati istovremeno s drugim tipovima nestabilnosti, ali u odvojenim dijelovima pokrenute mase te se može pojaviti nakon nekog drugog tipa kao npr. odrona. Pojava ovoga tipa je najčešće na strmim obalama duž vodotoka ili ostalim padinama sa strmim plohama pukotina. Voda ili led u pukotinama, težina materijala iznad pokrenute mase, podsijecanje padine, iskopi ili erozija dna padine mogu biti inicijatori pokretanja mase (Highland i Borbrowsky 2008).

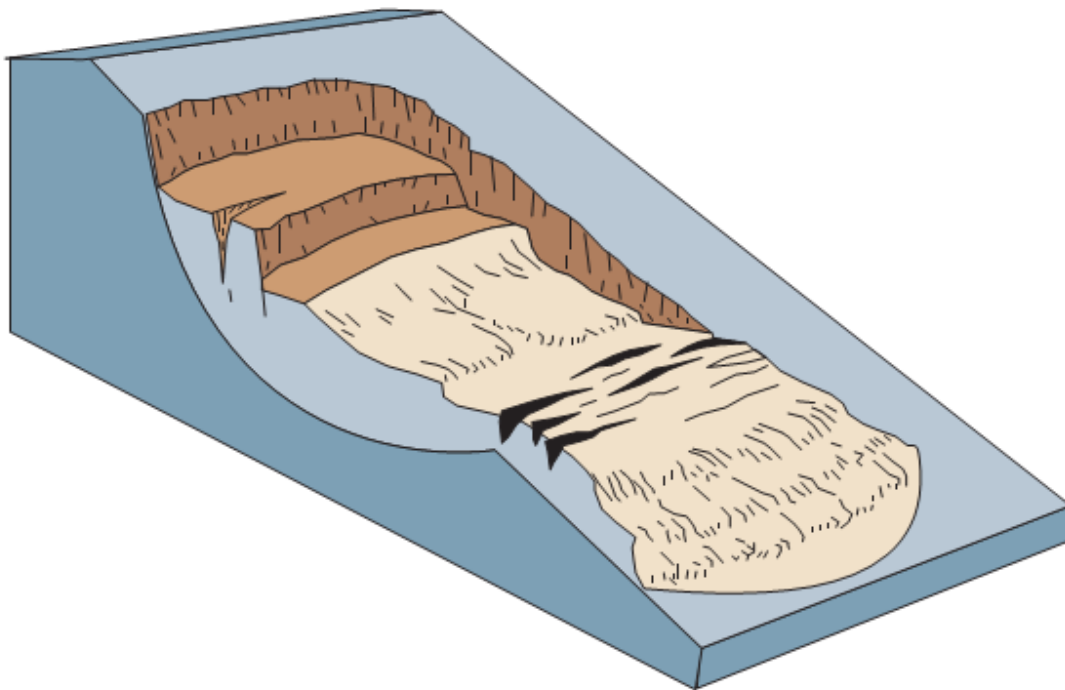


Slika 2-2. Shematski prikaz prevrtanja (Highland i Borbrowsky 2008)

Klizanje je kretanje tla ili stijene niz padinu po kliznoj plohi ili relativno tankoj zoni na kojoj se dogodila intenzivna posmična deformacija. Kada naprezanja premaše posmičnu čvrstoću dolazi do klizanja. Kretanje mase tla i/ili stijene nije inicijalno istovremeno duž cijele plohe koja kasnije postaje klizna ploha. Volumen pokrenutog materijala s udaljenosti od mjesta lokalnog sloma se povećava. U osnovi klizanje može biti rotacijsko i translacijsko.

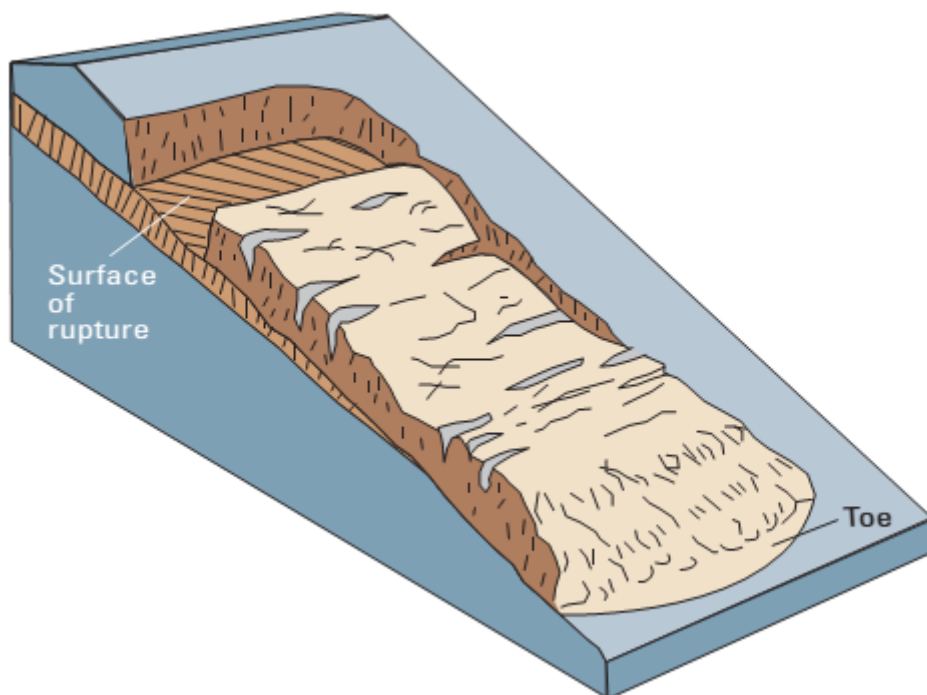
Rotacijsko klizanje nastaje pretežito u homogenim glinovitim kosinama nagiba od $20\text{--}40^\circ$ (slika 2-3). Kod njega se pojavljuje pomaci po zakrivljenoj kliznoj plohi, a smjer kretanja je rotacijski oko osi koja je paralelna s konturama podine. Pokrenuta masa se može kretati kao relativna homogena masa s vrlo malom deformacijom unutar pokrenute plohe sloma. Gornji dio pokrenute mase se može kretati gotovo vertikalno prema dolje, uz istovremeno nagnjanje prema glavnoj pukotini. Odnos između dubine i duljine klizne plohe u tlima iznosi $0,3\text{--}0,1$ (Highland i Borbrowsky 2008). Inicijator pokretanja ovoga tipa klizanja može biti dugotrajne oborine ili naglo otapanje snijega koji uzrokuje saturaciju padine i povećava razinu podzemne vode. Kako bi se ublažile ili uklonile posljedice klizanja uspostavlja se sustav opažanja kretanja klizišta. Odvodne kanale je potrebno čistiti zbog sprječavanja podizanja razine podzemne vode te smanjivanja nagiba padine i uređenje neki

su načini ublažavanja nastajanja klizišta ovoga tipa. Kao indikator ponovnog pokretanja klizišta su pukotine (glavna pukotina) na vrhu klizišta (Highland i Borbrowsky 2008).



Slika 2-3. Shematski prikaz rotacijskog klizanja (Highland i Borbrowsky 2008)

Pokrenuta masa kod translacijskog klizanja kreće prema naprijed po relativnoj kliznoj plohi s vrlo malo ili bez rotacije niz kosinu (slika 2-4). Ukoliko je padina pod većim nagibom pokrenuta masa može prijeći veliku udaljenost, dok kod rotacijskih pokrenuta masa se kreće dok ne postigne stanje stabilnosti. Vrsta materijala koja može biti obuhvaćena translacijskim klizanjem može biti vrlo različita i to od rahlog nekonsolidiranog tla do velikih blokova stijena. Translacijska klizišta se događaju po geološkim diskontinuitetima kao što su slojne plohe, rasjedi, pukotine ili geološke granice između stijene i tla. Translacijska klizišta su generalno plića nego rotacijska i omjer dubine i duljine klizne plohe je manji od 0,1. Inicijatori pokreta su najčešće intenzivne oborine ili povećanje razine podzemne vode, otapanje snijega te procijeđivanje vode iz sustava navodnjavanja ili kanala. Nakon što je slom nastao, potrebno je provesti drenažu kako bi se spriječilo ponovno aktiviranje klizišta (Highland i Borbrowsky 2008). Uobičajne mjere sanacije su zamjena materijala, uređenje geometrije padine te skuplje mjere ugradnja sidara i ostalih elemenata za ojačanje.

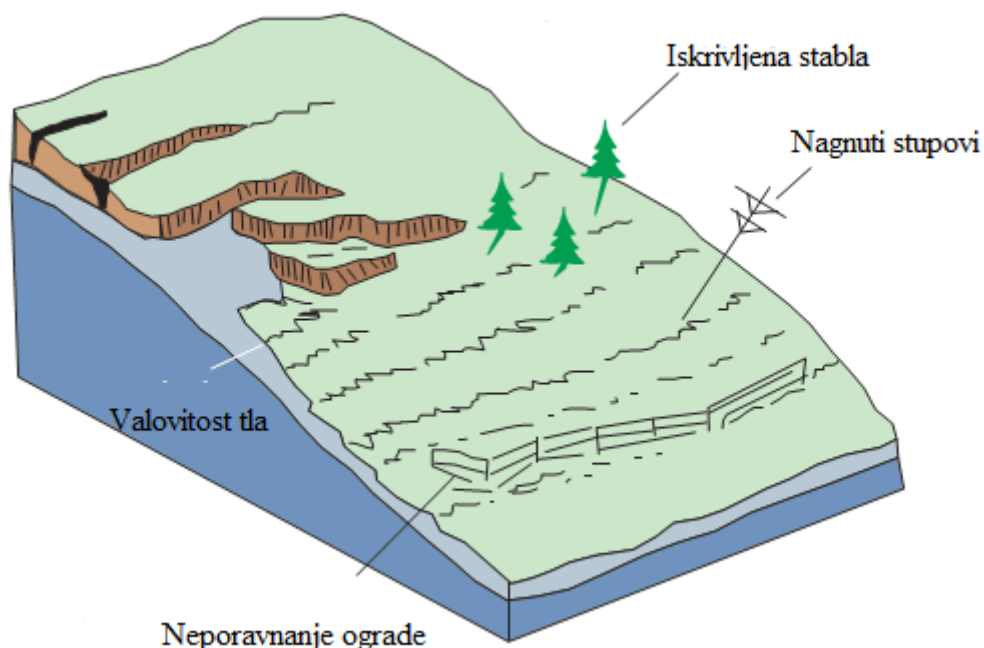


Slika 2-4. Shema translacijskog klizanja (Highland i Borbrowsky 2008)

Puzanje je opći naziv za vrlo spore zemljane tokove (slika 2-5). Ono je uzrokovano posmičnim naprežanjima koja su dovoljno velika da uzrokuju deformacije na padini, ali bez sloma. Postoje tri vrste puzanja:

1. Sezonsko – kretanje mase tla do dubine koja je pod utjecajem vlažnosti i temperature
2. Konstantna – posmična naprežanja konstantno su veća od posmične čvrstoće materijala
3. Progresivna – prethodi nekom drugom tipu klizanja

Puzanje može biti regionalna pojava ili zahvaćati manja područja. Teško je definirati njegove granice zbog vrlo spore brzine kretanja te deformacije objekata ne moraju biti vidljive. Kemijsko i fizičko trošenje, loša drenaža, građevine koje destabiliziraju padinu jedan su od inicijatora puzanja. Puzanje se može predvidjeti nagnutim drvećem, stupovima ili ogradom te mjeriti inklinometrima postavljenim u bušotinama ili pomoću GNSS uređaja za mjerenje pomaka.



Slika 2-5. Shematsk prikaz puzanja (Highland i Borbrowsky 2008)

Prema brzini kretanja i deformacije nagnutih površina terena nestabilnosti se svrstavaju u dvije skupine (Nonveiller 1987):

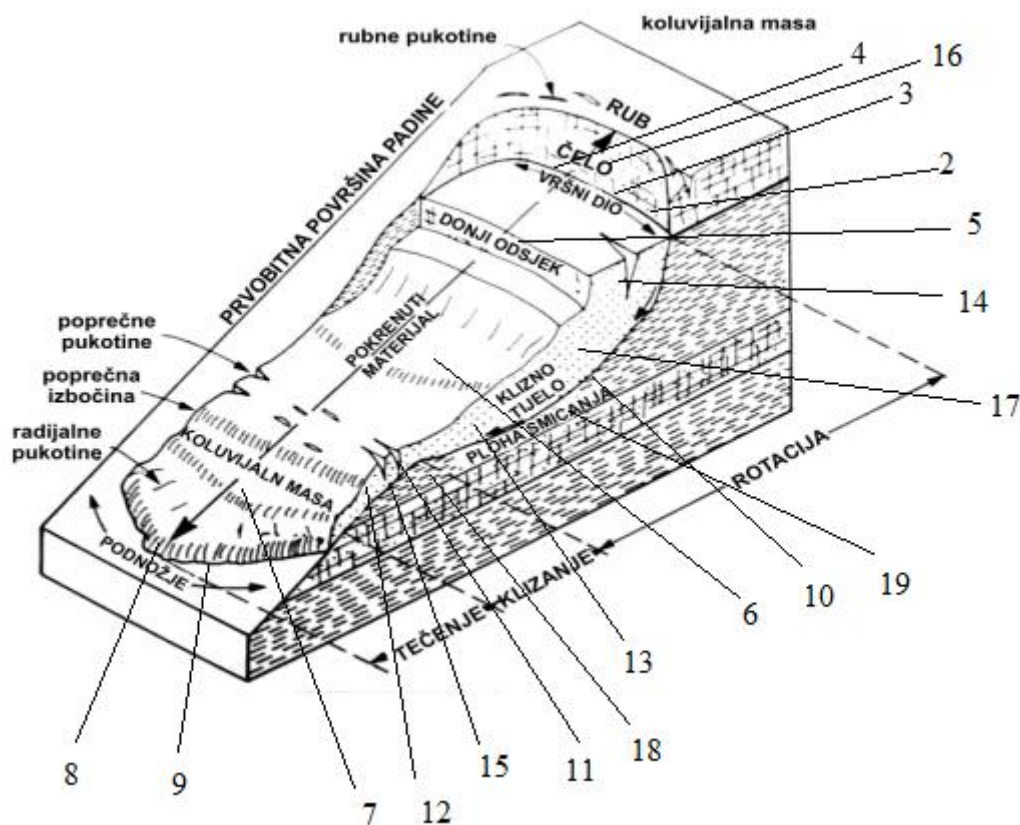
1. Puženje – polagano kretanje sloja paralelno s površinom padine veoma malom brzinom, na većim dubinama nastaju plastične deformacije pri naprezanjima koji su manji od posmične čvrstoće (do 300 mm/god.)
2. Kliženje – kretanje mase tla ili stijene niz padinu, a nastaje kao posljedica sloma materijala na smicanje uzduž granične plohe pokrenuta materijalom dok je brzina relativno velika (deformacije do 300 mm/dan)

Terzaghi (1950) smatra puženjem kretanje površine terena brzinom manjom od 30 cm na godinu dok mu je veća brzina karakteristična za kliženje .

2. 2 Značajke i geometrija klizišta

Materijal klizanja može se definirati kao stijena (tvrda ili čvrsta masa koja je bila intaktna prije inicijacije kretanja) ili tlo. Tlo se dijeli na zemlju i debris, a navedeni termini se odnose na pokrenuti materijal prije nego što je aktiviran klizanjem. Pod terminom zemljom smatraju se materijali u kojima je 80% ili više čestica manje od 2 mm dok pod pojmom debris, sadrži udio krupnozrnatih materijala od 20–80% većih od 2 mm. Ukoliko se dogodi kompleksno klizanje u kojem se materijal mijenja s napredovanjem procesa, potrebno je

opisati materijal na početku svakog pojedinog kretanja u nizu. Na gornjem rubu svakog oblika nestabilnosti pojavljuju se poprečne vlačne pukotine i čelo kliženja s denivelacijom. Uzduž rubova nestabilnog područja niz padinu nastaju bočne tangencijalne pukotine između stabilne i pokrenute zone. Na donjem rubu pokrenute mase nalazi se raspucan i radijalno deformiran materijal gdje on pokriva dio stabilne kosine. Širina, duljina i dubina pomaknute mase tla ili stijene te njihov međusobni odnos karakteristični su za tipove nestabilnosti te mogu služiti za razvrstavanje po tipovima (slika 2-6).



Slika 2-6. Dijelovi klizišta (brojevi se odnose na terminologiju navedenu u tablici 2-1 (Počekal 2012)

Nestabilnost kosina najčešće se očituje kao klizanje mase tla, kliznog tijela, po ravnoj ili zakrivljenoj kliznoj plohi. Pri tome se u donjem dijelu kliznog tijela (nožici) tlo naguravanjem zbija, a u gornjem dijelu razrahljuje. Zbog vlačnih naprezanja u vrhu i zanemarive vlačne čvrstoće tla otvara se vlačna pukotina, koja se zbog smjera gibanja može otvoriti kao škarpa. Pojava vlačne pukotine upućuje da se ona može nastaviti u novu kliznu plohu. Područje kliznog tijela i neposredna okolina oko njega naziva se klizištem.

Dijelovi klizišta prikazani na slici 2-6, opisani su u tablici 2-1. Zona usjedanja i zona akumulacije pokrenutog materijala su posljedica pokretanja materijala od viših prema nižim dijelovima padine. Nepokrenuta podloga odvojena je graničnom plohom od pokrenutog materijala te se ta ploha naziva ploha sloma. Ova ploha vidljiva je jedino na vrhu klizišta kao glavna pukotina. Kruna ili čelo klizišta čine gornji dio glavne pukotine. Pokrenuti materijal, uz glavnu pukotinu, se smatra prednjom stranom klizišta. Vrh se nalazi na najvišoj točki klizišta na prednjoj strani, dok najniža točka se naziva dno. Stopa ili podnožje klizišta je dio mase pokrenut i izvan završetka plohe sloma. Samo onaj dio pokrenute mase koji se nalazi iznad plohe sloma naziva se glavnim tijelom klizišta. Originalna površina se nalazi u produžetku plohe sloma, a to tlo je prekriveno akumulacijom. Iznad akumulacije je usjednuta masa i zajedno čine pokrenutu masu/materijal. Diferencijalnim kretanjem pokrenutog materijala u gornjim dijelovima klizišta nastaju sekundarne ili donje škarpe. Bokovi su bočni završetci klizišta.

Tablica 2-1. Definicija elemenata klizišta (Mihalić-Arbanas 2006)

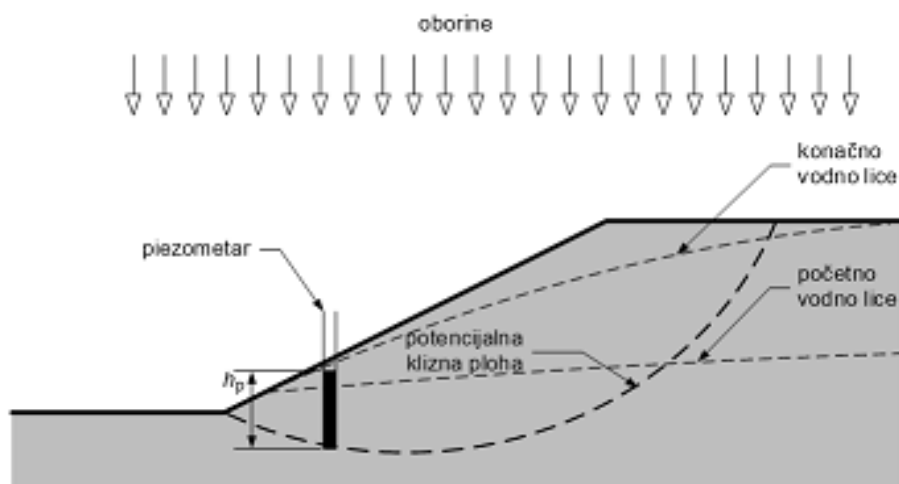
Broj	Naziv	Definicija
1	Kruna ili čelo (eng. <i>Crown</i>)	Nepokrenuti materijal uz najviši dio glavne pukotine
2	Glavna pukotina ili škarpa (eng. <i>Main scarp</i>)	Strma ploha u neporemećenom tlu u gornjem dijelu klizišta otvorena kretanjem materijala niz padinu (pokrenuti materijal – 13); to je vidljivi dio plohe sloma (10)
3	Vrh (eng. <i>Top</i>)	Najviša točka kontakta pokrenutog materijala i glavne pukotine (2)
4	Prednja strana (eng. <i>Head</i>)	Gornji dijelovi klizišta uz kontakt pokrenutog klizišta i glavne pukotine (2)
5	Donja škarpa (eng. <i>Minor scarp</i>)	Strma ploha u pokrenutom materijalu klizišta nastala diferencijalnim kretanjem unutar pokrenute mase
6	Glavno tijelo (eng. <i>Main body</i>)	Dio pokrenutog materijala klizišta koji prekriva plohu sloma (10) između glavne pukotine (2) i završetka plohe sloma (11)
7	Stopa ili podnožje (eng. <i>Foot</i>)	Dio klizišta koji je pokrenut dalje od završetka plohe sloma (11) i naliže direktno na originalnu površinu tla (20)
8	Dno (eng. <i>Tip</i>)	Najudaljenija točka na završetku klizišta, gledano od vrha klizišta (3)
9	Završetak klizišta (eng. <i>Toe</i>)	Donji rub pokrenutog materijala klizišta, obično zakrivljenog oblika, koji je najudaljeniji od glavne pukotine (2)
10	Ploha sloma (eng. <i>Surface of rupture</i>)	Ploha koja predstavlja donju granicu pokrenutog materijala (13) a koja se nalazi ispod originalne kosine (20); ploha sloma u mehaničkom smislu se idealizira kao klizna ploha
11	Završetak plohe sloma (eng. <i>Toe of surface of separation</i>)	Presječna između donjeg dijela plohe sloma (10) klizišta i originalne površine tla (20)

12	Ploha separacije (eng. <i>Surface of separation</i>)	Dio originalne površine tla (20) prekriven stopom klizišta (7)
13	Pokrenuti materijal (eng. <i>Displaced material</i>)	Materijal pomaknut klizanjem iz prvobitnog položaja: sastoji se od usjednute mase (17) i akumulacije (18)
14	Zona usjednutog materijala (eng. <i>Zone of depletion</i>)	Područje klizišta unutar pokrenutog materijala (13) koje je niže od originalne površine tla (20)
15	Zona akumulacije (eng. <i>zone of accumulation</i>)	Područje klizišta unutar pokrenutog materijala (13) koje je više od originalne površine tla (20)
16	Usijedanje (eng. <i>Depletion</i>)	Volumen ograničen glavnom pukotinom (2), usjednutom masom (17) i originalnom površinom tla (20)
17	Usjednuta masa (eng. <i>Depleted mass</i>)	Volumen pokrenutog materijala (13) koji leži na plohi sloma (10), ali ispod originalne površine tla (20)
18	Akumulacija (Eng. <i>Accumulation</i>)	Volumen pokrenutog materijala (13) koji leži iznad originalne površine tla (20)
19	Bok (eng. <i>Flank</i>)	Nepokrenuti materijal uz bočni dio plohe sloma; određivanje lijevog i desnog boka izvodi se gledajući od gornjeg dijela klizišta (krune ili čela)
20	Originalna površina tla (eng. <i>Original ground surface</i>)	Površina kosine koja je postojala prije nego je došlo do klizanja

2. 3 Uzroci klizanja

Za stabilnost kosina temeljni uvjet je veća čvrstoća tla od posmičnih naprezanja kako bi se održala ravnoteža potencijalnog kliznog tijela. Iz toga se zaključuje da je glavni uzrok nestabilnosti kosina nedovoljna posmična čvrstoća tla za održavanje ravnoteže kliznog tijela. Uzrok tome mogu biti dva razloga ili njihova kombinacija: ili je čvrstoća pala ili je poraslo posmično naprezanje.

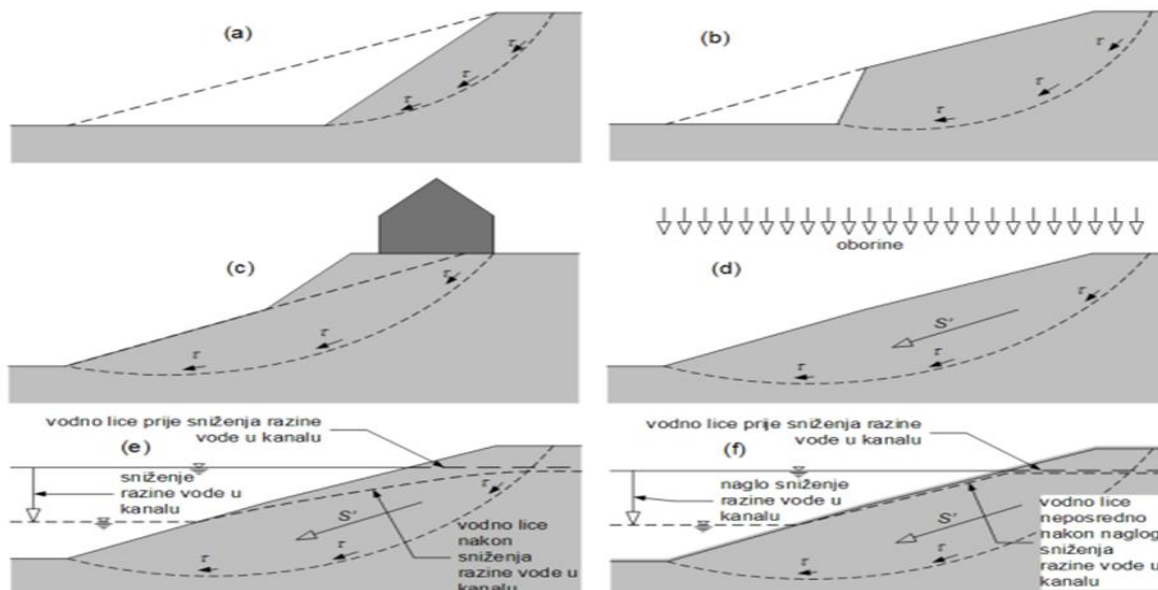
Najvažniji uzrok pada čvrstoće je porast pornoga tlaka u tlu kosine. Na slici 2-7. prikazana je kosina izložena oborinama koja diže početnu razinu vodnoga lica te s time i porne tlakove. Normalno naprezanje u točkama potencijalne klizne plohe ostaje nepromijenjeno, porast pornih tlakova uzrokuje pad normalnih efektivnih naprezanja, a time i čvrstoće.



Slika 2-7. Porast pornog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavits-Nossan 2006)

Drugi faktor koji dovodi do nestabilnosti kosina je povećanje posmičnih naprezanja na potencijalnoj kliznoj plohi. Na slici 2-8. prikazano je nekoliko slučajeva povećanja posmičnih naprezanja. Slučajevi kao što su povećanje nagiba kosina, zasijecanje u njenoj nožici, opterećenja gornjeg dijela te povećanje sile strujanja podzemne vode izazvane nepovoljnom promjenom strujanja uzrok su povećanja posmičnih naprezanja.

Primjeri (e) i (f) na slici 2-9. pokazuju povećanje posmičnih naprezanja zbog promjene režima tečenja podzemne vode.



Slika 2-8. Utjecaji koji povećavaju posmična naprezanja u zoni potencijalne klizne plohe na kosini (Szavits-Nossan 2006)

Primjer (e) je slučaj postupnog snižavanja razine podzemne vode u kanalu ili jezeru. Na površini tla, za vrijeme snižavanja razine podzemne vode, u kanalu postupno pada hidraulički potencijal vode, u široj okolini kanala zadržava se ranija razina podzemne vode i pripadnog potencijala. Taj pad potencijala prema kanalu izaziva tečenje vode i pripadnu strujnu silu S' u kliznom tijelu što izaziva klizanje. Primjer (f) je slučaj naglog i brzog snižavanja razine podzemne vode. U tom slučaju vodno lice ne može odmah pasti na stacionarni oblik iz primjera (e) jer za to treba određena količina vode isteći iz tla u kanal. S vremenom će se ostvariti stacionarni oblik iz primjera (e). Najnepovoljniji trenutak za stabilnost kosine je neposredno nakon naglog sniženja vode u kanalu zbog toga što su raspored potencijala daje nepovoljnu raspodjelu pornih tlakova i izaziva najveću strujnu silu S' . Slučaj (e) je povoljniji u odnosu na slučaj (f) jer je snižavanje vode u kanalu sporije. Ako je sniženje u kanalu sporo, strujanje podzemne vode odgovara stacionarnom stanju za trenutačne rubne uvjete potencijala.

Zbog tih razloga valja pažljivo proučiti pojavu podzemne vode, njezine promjene s vremenom, a režim toka podzemne vode istražuju se pomoću prikladno raspoređenih piezometara. Svi navedeni uzroci klizanja smanjuju sile otpora na kliznoj plohi i povećavaju sile koje pospješuju klizenje.

Važna ulogu u stabilnosti, kao što je opisano, ima porni tlak jer upravo ona zavisi o njemu kako proizlazi iz Mohr – Coulombovog zakona čvrstoće (izraz 2-1):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad (2-1)$$

Gdje je: τ_f – posmična čvrstoća (kPa)

c – kohezija (kPa)

σ – ukupno naprezanje (kPa)

u – porni tlak (kPa)

φ – kut trenja ($^{\circ}$).

Mohr-Coulumbovi parametri čvrstoće izraženi su u efektivnim naprezanjima, a σ i u su normalno naprezanje i porni tlak. Veličina u zagradi u gornjem izrazu je efektivno naprezanje σ' . Kohezija i kut unutarnjeg trenja najčešće se dobivaju ispitivanjem u laboratoriju, a jedno od takvih ispitivanja provodi se u uređaju za direktno smicanje.

Efektivno normalno naprezanje dobije se izrazom 2–2.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-2)$$

gdje je σ' efektivno normalno naprezanje.

2. 4 Metode analize stabilnosti kosina

Osnovna svrha primjene metoda analize je izračun mjere stabilnosti. Mjere stabilnosti mogu biti definirane faktorom sigurnosti ili preko općeg stanja naprezanja i deformacija.

Kao jedna od metoda koja je korištena u ovome radu je Hoekova dijagramska metoda radi usporedbe dobivenih vrijednosti faktora sigurnosti u samome projektu. Navedena metoda objašnjena je u poglavlju 2. 4. 1.

Metode analize stabilnosti kosina se prema matematičkoj formulaciji mogu podijeliti na statičke i dinamičke. Dinamičke razmatraju ukupno stanje naprezanja i deformacija te se pomoću njih utvrđuje kinematika, tj. brzine i pomaci promatranih točaka modela, dok se kod statičkih razmatra pojednostavljeni raspored djelovanja sila na temelju kojeg se definira određena mogućnost kinematike klizanja. Prema tome je i pojednostavljen postupak proračuna sila koje djeluju na model kod statičkih metoda proračuna (Hrženjak 2004).

Osnova faktora sigurnosti izvedena je na temelju metoda granične ravnoteže (statička metoda) kao mjere stupnja stabilnosti (Hrženjak 2004). Faktor sigurnosti definiran je kao omjer sila otpora i sila koje uzrokuju nestabilnosti (aktivne sile). U počecima, kod numeričkih metoda, faktor sigurnosti se nije eksplicitno računao već se na temelju određenih kriterija trebalo i moglo procijeniti stanje stabilnosti. U posljednje vrijeme, zbog prihvaćenosti opće osnove faktora sigurnosti, razvijaju se numeričke metode (dinamičke metode) koje uz stanje naprezanja i deformacija daju izračun faktora sigurnosti.

2. 4. 1 Dijagramska Hoekova analiza stabilnosti kosina

U koherentnim materijalima, kao što je slučaj u glinovitim materijalima, događa se slom duž površine koja je približno kružnog oblika. Za analizu stabilnosti pomoću ovoga dijagrama moraju se znati podaci o uvjetima podzemne vode i profilima kosina. Primjena ovih dijagrama je samo za analizu kružnog sloma u materijalima gdje se ne mijenjaju osobine tla te gdje vrijede uvjeti za deriviranje dijagrama.

Uvjeti u kojima nastaje kružni slom nastaju kad su individualne čestice u usporedbi s veličinom kosine jako male tako da one zbog svog oblika nemaju utjecaja na oblik plohe sloma. Pretpostavke za izradu ovoga dijagrama su (Hoek i Bray 1974):

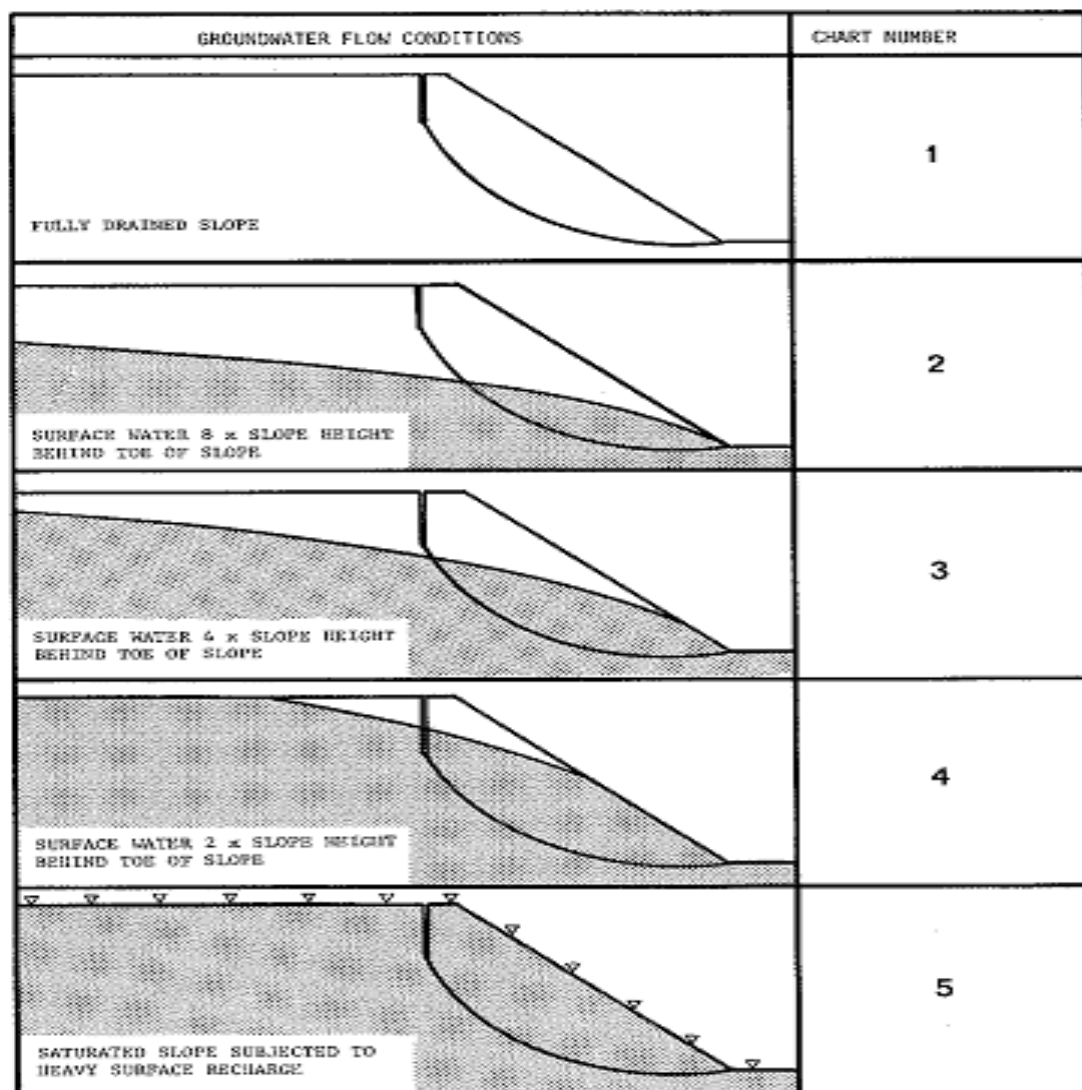
1. Materijal kosine je homogen, tj. značajke materijala se ne mijenjaju s pravcima djelovanja sila
2. Smičuća sila materijala je karakterizirana kohezijom i kutom unutarnjeg trenja, koji su određeni izrazom (2-3):

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi, \quad (2-3)$$

3. Slom se događa po kružnoj površini sloma i prolazi kroz podnožje kosine
4. Vlačne (tenzijske) pukotine se događaju na gornjoj površini kosine.
5. Lokacija vlačnih pukotina i površina sloma su takve da se uzima minimum čimbenika sigurnosti s obzirom na geometriju.

Za izračun podizanja sile uslijed djelovanja tlaka vode na površinu sloma i sile uslijed vode u vlačnoj pukotini, neophodno je pretpostaviti različite uzorke tokova podzemne vode koji odgovaraju što je više moguće onim uvjetima koji vjerojatno postoje u prirodi.

Za korištenje dijagrama tj. za determinaciju faktora sigurnosti koristi se 5 modela dijagrama (slika 2-9). Svaki dijagram određen je zasebnim uvjetima podzemne vode.



Slika 2-9. Uvjeti toka podzemne vode (Hoek i Bray 1974)

Koraci za izradu dijagrama vrijednosti faktora sigurnosti za pojedine kosine su sljedeći (Hoek i Bray 1974):

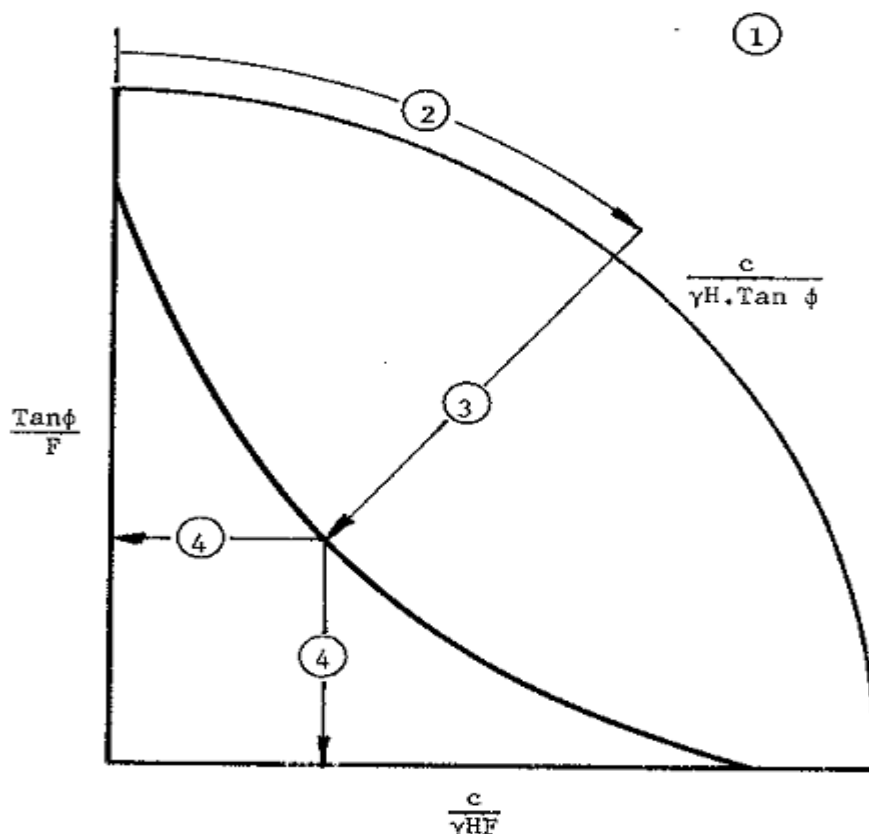
1. Odrediti uvjete podzemne vode koje postoje na kosini te odabrati dijagram koji je najbliži uvjetima u prirodi.
2. Izračun bezdimenzionalnog faktora, izraz (2-4):

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \tan \varphi}, \quad (2-4)$$

Pronaći dobivenu vrijednost na vanjskom mjerilu kruga dijagrama.

3. Slijede se radijalne linije od pronađene vrijednosti $\tan\phi/F$ ili $c/\gamma HF$ te se zatim očitava vrijednost na osi.
4. Vrijednost faktora sigurnosti odredi se iz izraza koraka 3. pomoću očitane vrijednosti na osi.

Grafički prikaz rješavanja dijagrama prikazan je na slici 2-10:



Slika 2-10. Grafički prikaz rješavanja dijagrama u koracima (Hoek i Bray 1974)

2. 4. 2 Metode opće granične ravnoteže

Metodama opće granične ravnoteže analizira se stabilnost zamišljenog ili stvarnog kliznog tijela koje je u kontaktu s okolnim tlom preko klizne plohe. Ove metode polaze od pretpostavke da je materijal idealno kruto – plastičan, što znači da se deformacije događaju nakon što se postigne vršna čvrstoća materijala. Nakon što se postigne vršna čvrstoća materijala nastupa i trenutni slom tla. Klizno tijelo se razdijeli na niz od n vertikalnih lamela. Sustav takvih lamela, bez uvođenja pretpostavki o njihovoj krutosti, statički je neodređen. Stupanj stabilnosti se u metodama granične ravnoteže utvrđuje usporedbom

posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja duž klizne plohe. Faktor sigurnosti se u ovom slučaju definira kao odnos posmične čvrstoće, τ_f i posmičnog naprezanja, τ , izrazom 2-5 (Szavits-Nossan 2006):

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (2-5)$$

Na kliznoj plohi nije došlo do sloma tla ako je $F > 1$, a slom nastupa za slučaj $F = 1$. Iz analiza može slijediti i vrijednost $0 \leq F < 1$, ali taj rezultat zbog činjenice da je najveća moguća vrijednost posmičnog naprezanja upravo posmična čvrstoća, ukazuje da nisu uspostavljeni uvjeti ravnoteže na promatranjoj plohi.

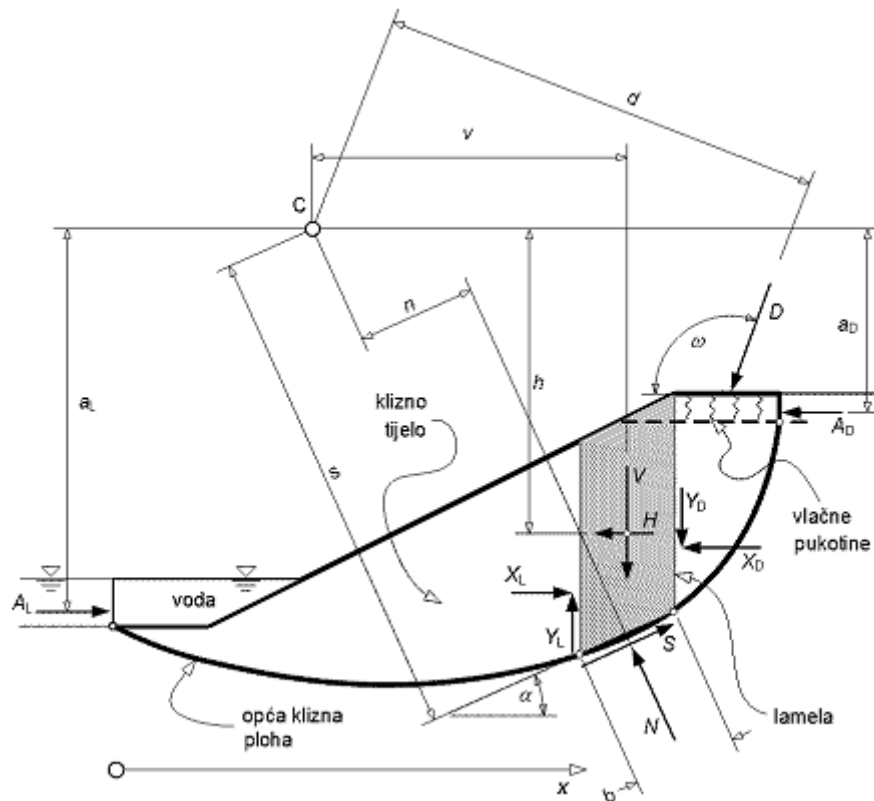
Pretpostavka, zajednička svim metodama granične ravnoteže, za uklanjanje statičke neodređenosti je konstantnost faktora sigurnosti duž klizne plohe kliznog tijela (za svaku lamelu). Određivanje faktora sigurnosti služi za utvrđivanje zamišljenog ili stvarnog kliznog tijela. U projektiranju kosina, moguće klizno tijelo nije unaprijed određeno, već treba tražiti ono s najmanjim faktorom sigurnosti. Klizno tijelo „najbliže“ nestabilnom stanju ili slomu je mjerodavno za ocjenu stabilnosti čitave kosine. Klizna ploha koja pripada kliznom tijelu s najmanjim faktorom sigurnosti naziva se kritična klizna ploha.

Postupak proračuna metodama granične ravnoteže sastoji se od definiranja modela klizne mase, diskretizacije modela klizne mase na lamele, proračuna djelujućih sila i opterećenja te proračuna faktora sigurnosti i postupak nalaženja kritične klizne plohe. Metode za proračun faktora sigurnosti su metoda Felleniusa, pojednostavljena metoda Bishopa i Janbua, metoda Morgenstern-Pricea, metoda Spencer i dr. Njihove značajke prikazane su u tablici 2-2.

Metoda Felleniusa je prva objavljena metoda koja uvodi koncepciju diskretizacije modela klizne mase na vertikalne lamele za koju se računaju djelujuće sile. Pojednostavljena metoda Bishopa temelji se na uvođenju vrijednosti mobilizirane posmične sile. Postavlja se iterativni postupak proračuna i računa se s međulamelarnim normalnim silama. Slična metoda je i pojednostavljena metoda Janbua. Metoda Morgenstern-Pricea i metoda Spencera koriste i međulamelarne posmične sile koje se računaju preko međulamelarnih normalnih sila i funkcije ovisnosti. Konačna vrijednost faktora sigurnosti dobiva se na

temelju koeficijenta λ za koji se postižu jednake vrijednosti faktora sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata i uvjeta ravnoteža sila.

Kružno cilindrične površine kliznih ploha u kosinama s nehomogenim ili homogenim tlom analiziraju se metodama lamela. Pretpostavlja se da su lamele dovoljno uske, b , tako da se luk osnove lamele, l , zamjenjuje tetivom. Za svaku lamelu se pojedinačni utjecaji zamjenjuju odgovarajućim silama, slika 2–11.



Slika 2-11. Sile na karakterističnoj lameli (Szavits-Nossan 2006)

Slika 2-11 prikazuje jednu opću kliznu plohu i klizno tijelo s istaknutim silama koje djeluju na jednu od n lamela. Sile koje djeluju na lamelu su težina, V , i horizontalna sila na lamelu, H , vanjsko opterećenje na lamelu, D , resultantne normalnih sila na lijevi i desni bok lamele, X_L odnosno X_D , resultantne posmičnih naprezanja na lijevi i desni bok lamele, Y_L odnosno Y_D , rezultanta posmičnog i normalnog naprezanja (τ , σ), na kliznoj plohi unutar na dnu lamele, S odnosno N .

Za svaku lamelu sa slike 2-11 se mogu postaviti tri jednadžbe ravnoteže: vektorski zbrojevi svih sila u horizontalnom smjeru, vektorski zbrojevi svih sila u vertikalnom smjeru i zbroj svih momenata sila obzirom na točku C , koji moraju biti jednaki nuli.

Iz globalne ravnoteže u horizontalnom smjeru (x) dobije se rješenje za faktor sigurnosti, izraz 2-6 (Szavits-Nossan 2006):

$$F_x = \frac{\Sigma(C \cos \alpha + (N - U) \tan \varphi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma H - \Sigma D d + A_L - A_D a_D}, \quad (2-6)$$

a iz globalne jednadžbe momenata sila, rješenje za faktor sigurnosti dan je izrazom 2-7 (Szavits-Nossan 2006):

$$F_m = \frac{\Sigma(C s + (N - U) \tan \varphi')}{\Sigma V_v - \Sigma N_n + \Sigma H - \Sigma D_d + A_L a_L - A_D a_D}. \quad (2-7)$$

Metode opće granične ravnoteže uvode pretpostavku o nagibu međulamelarnih sila u obliku prikazanim u izrazu 2-8 (Szavits-Nossan 2006):

$$\frac{x}{y} = \lambda f(x), \quad (2-8)$$

U općem slučaju, uz neku zadanu funkciju nagiba međulamelarnih sila $f(x)$, postupak rješavanja nepoznanica navedenih jednadžbi provodi se iterativno.

Prva objavljena metoda koja uvodi koncepciju diskretizacije modela klizne mase na vertikalne lamele za koje se računaju djelujuće sile je metoda Felleniusa. Prema njoj rješenje za vrijednosti normalnih sila na bazama lamela prikazano je izrazom 2-9:

$$N = W \cos \alpha - k W \sin \alpha + [D \cos(\omega + \alpha - 90)], \quad (2-9)$$

Rješenje za faktor sigurnosti prema Felleniusu, izraz 2-10 (Hrženjak 2004):

$$FS = \frac{\Sigma[c' + N \tan \varphi']}{\Sigma W \sin \alpha + \Sigma k W \cos \alpha - [D \cos(\omega + \alpha)]}, \quad (2-10)$$

Pojednostavljena metoda Bishopa i Janbua uvodi vrijednost mobilizirane posmične sile. Postavlja se iterativni postupak proračuna i računanje s međulamelarnim normalnim silama.

Vrijednost normalnih sila na bazama lamela prema pojednostavljenoj metodi Bishopa i Janbua prikazano je izrazom 2-11 (Hrženjak 2004):

$$N = \frac{W - \frac{(c' \beta - u \beta \tan \varphi')}{FS} \sin \alpha + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \varphi'}{FS}}, \quad (2-11)$$

Rješenje za faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata prema pojednostavljenoj metodi Bishopa izraz 2-12 (Hrženjak 2004):

$$FS_m = \frac{\Sigma[c' \beta + (N - u \beta) \tan \varphi'] R}{\Sigma W_x - \Sigma N f + \Sigma k W \pm [D d] \pm A a}, \quad (2-12)$$

Rješenje za faktor sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata prema pojednostavljenoj metodi Janbua 2-13 (Hrženjak 2004):

$$FS_f = \frac{\Sigma[c' \beta + (N - u \beta) \tan \varphi'] \cos \alpha}{\Sigma N \sin \alpha + \Sigma k W - [D \cos \omega] \pm A} \quad (2-13)$$

Janbuova pojednostavljena metoda za razliku od Bishopove, kreće od zadovoljavanja jednadžbe ravnoteže u horizontalnom smjeru, dok zanemaruje globalnu ravnotežu momenata sila. Kao i kod pojednostavljene Bishopove metode, zanemaruje se vertikalna komponenta rezultante međulamelarnih sila koje djeluju na lamelu.

Metode Morgenstern–Pricea i Spencera vrijednosti normalnih sila na bazama lamela računaju prema izrazu 2-14 (Hrženjak 2004):

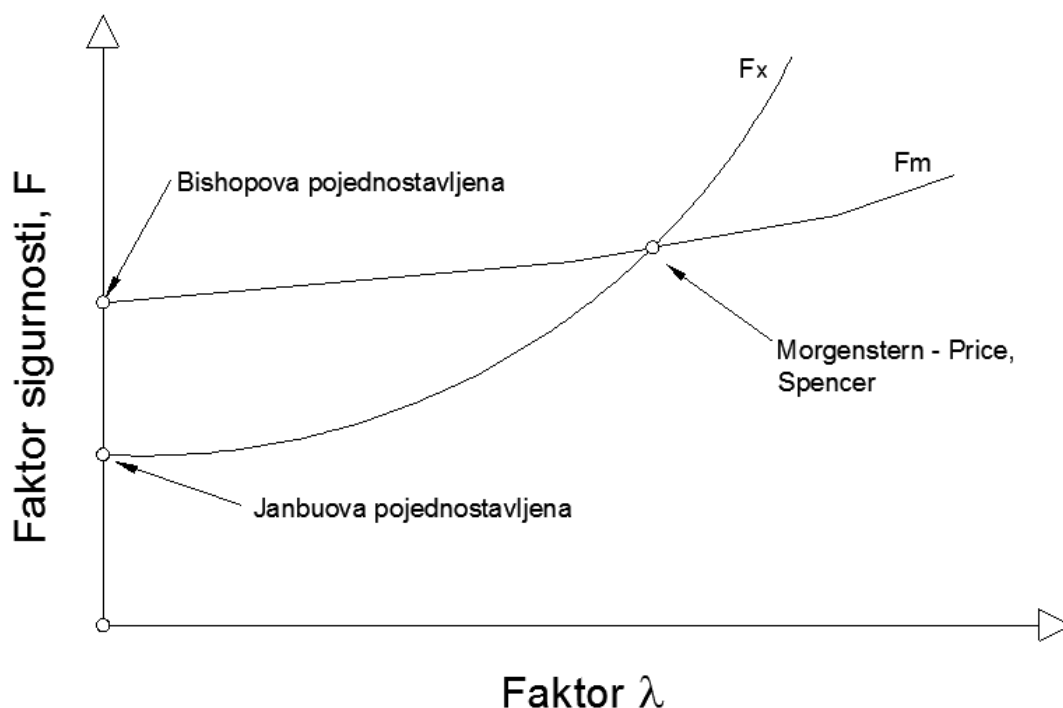
$$N = \frac{W + (X_L - X_D) - \left(\frac{c' \beta - u \beta \tan \varphi'}{F} \right) \sin \alpha + D \sin \omega}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \varphi'}{F}} \quad (2-14)$$

Konačna vrijednost faktora sigurnosti, za metodu Morgenstern-Price i metodu Spencera, dobiva se na temelju koeficijenata λ za koji se postižu jednake vrijednosti faktora sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata, FS_m i uvjeta ravnoteže sila, FS_f .

Proračun faktora sigurnosti odvija se u nekoliko koraka:

1. Izračun faktora sigurnosti provodi se na temelju uvjeta ravnoteže momenata, pri čemu se vrijednost normalne sile na bazama lamela računaju prema rješenju Felleniusa što predstavlja početnu ili aproksimativnu vrijednost za slijedeće korake proračuna
2. Izračun faktora sigurnosti provodi se na temelju uvjeta ravnoteže momenata i ravnoteže sila pri čemu se vrijednosti za normalne sile na bazama lamela računaju prema rješenjima pojednostavljene metode Bishopa i Janbua.
3. Prvo se računaju vrijednosti međulamelarnih normalnih sila, zatim međulamelarne posmične sile, a onda vrijednosti faktori sigurnosti. Izračun faktora sigurnosti se ponavlja za različite vrijednosti λ .
4. Nalazi se vrijednost λ za koju se dobivaju iste vrijednosti faktora sigurnosti iz uvjeta ravnoteže momenata i ravnoteže sila.

Nalaženje konačnog faktora sigurnosti za različite metode proračuna prikazano je na slici 2-13.



Slika 2-12. Treća razina iteracije u proračunu faktora sigurnosti po općoj metodi granične ravnoteže (Szavits-Nossan 2006)

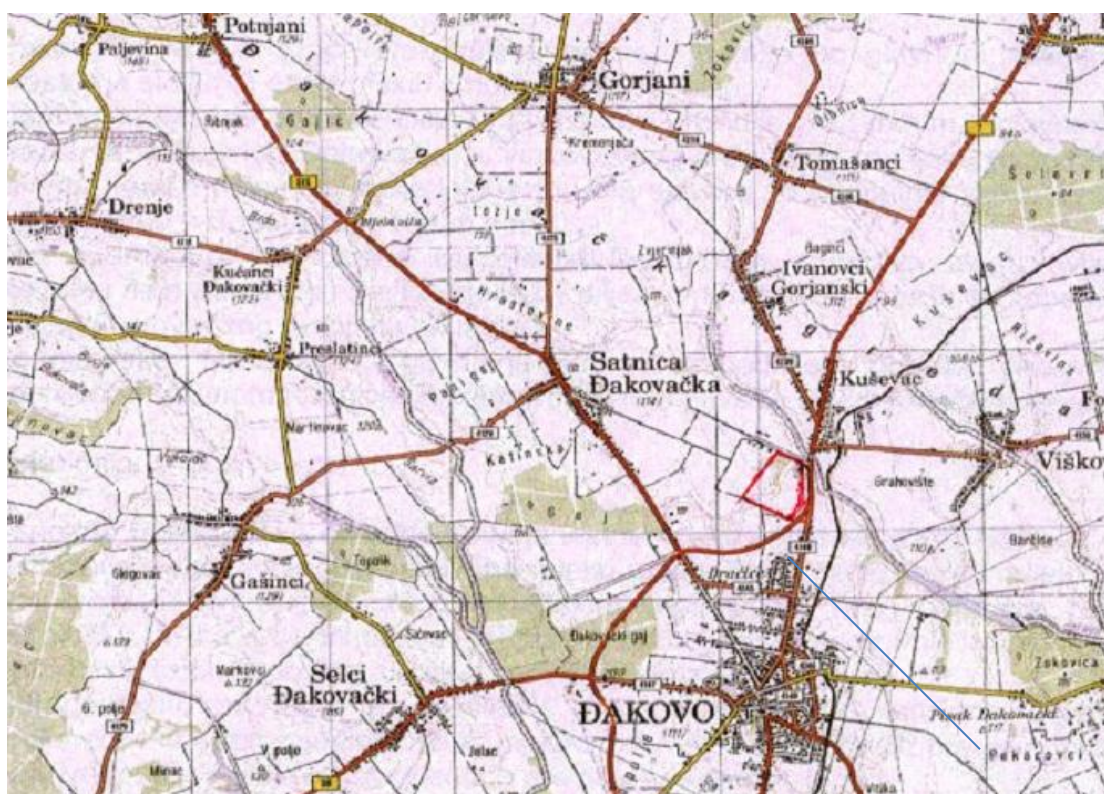
Tablica 2-2. Karakteristike nekih povijesnih varijanti metoda granične ravnoteže

Naziv varijante	Klizna ploha	Jednadžbe ravnoteže		Sile među lamelama		Funkcija nagiba sila među lamelama $f(x)$
		$\Sigma_x = 0$	$\Sigma_m = 0$	ΔX	ΔY	
Obična ili Felleniusova (Fellenius 1936)	kružna	ne	da	$= 0$	$= 0$	$X = 0$ $Y = 0$
Janbuova pojednostavljena (Janbu 1954)	opća	da	ne	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Bishopova pojednostavljena (Bishop 1950)	kružna	ne	da	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Morgenstern - Priceova (Morgenstern i Price 1965)	opća	da	da	$\neq 0$	$\neq 0$	Zadaje korisnik
Spencerova (Spencer 1967)	opća	da	da	$\neq 0$	$\neq 0$	$= 1$

3. Glinokop „Grabovac“

3.1 Opće značajke

Eksploatacijsko polje „Grabovac“ sa širim svojim područjem pripada prostoru Istočne Hrvatske, čiji je položaj prikazan na slici 3–1. Položaj eksploatacijskog polja označen je crvenom bojom. Geografska osnova Istočne Hrvatske različita je između istočnog ravničarskog i zapadnog gorskog prostora. Istočni ravničarski prostor, poznatiji kao Ravnice Istočne Hrvatske, određuju s jedne strane jedina praporna uzvišenja, dok s druge strane aluvijalne naplavne nizine.



Slika 3-1. Zemljovidni položaj eksploatacijskog polja, M 1:100 000 (Strajher 2004)

Đakovački kraj ili Đakovština obuhvaća istočne ogranke Dilja (423 m.n.m.) i Krndije (263 m.n.m.), glavninu središnjeg položenog Đakovačko–vinkovačkog prapornog ravnjaka i uske pojaseve susjednih nizina, na sjeveru do Vuke, a na jugu do Biđa – Bosuta (cca 100 m.n.m). Ravničarski đakovački kraj odvojen je od zapadnijeg pobrđa širokom poprečnom dolinom Košnice.

Umjereno kontinentalne klimatske prilike osnovno je obilježje klimatskih prilika Istočne Hrvatske. Srednje godišnje padaline se kreću u relativno uskom rasponu, a najniže su u

krajnjem istočnom dijelu područja gdje iznose oko 650 mm. Prema zapadu vrijednost srednjih godišnjih padalina postupno raste do 800 mm uz rub padine Papuka i Krndije. U tablici 3-1 prikazani su podaci stanice za mjerenje kiše u Osijeku i blizini Đakova.

Tablica 3-1. Srednji podaci stanice za mjerenje kiše (Nuić 1991)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
T (°C)	-1,2	0,8	5,6	11,8	16,4	20	21,9	20,8	17,1	11,3	6,5	1,1	11
N	13	13	12	11	13	12	10	8	7	10	14	16	139
P (mm)	42	40	47	64	75	82	58	58	53	67	60	52	698

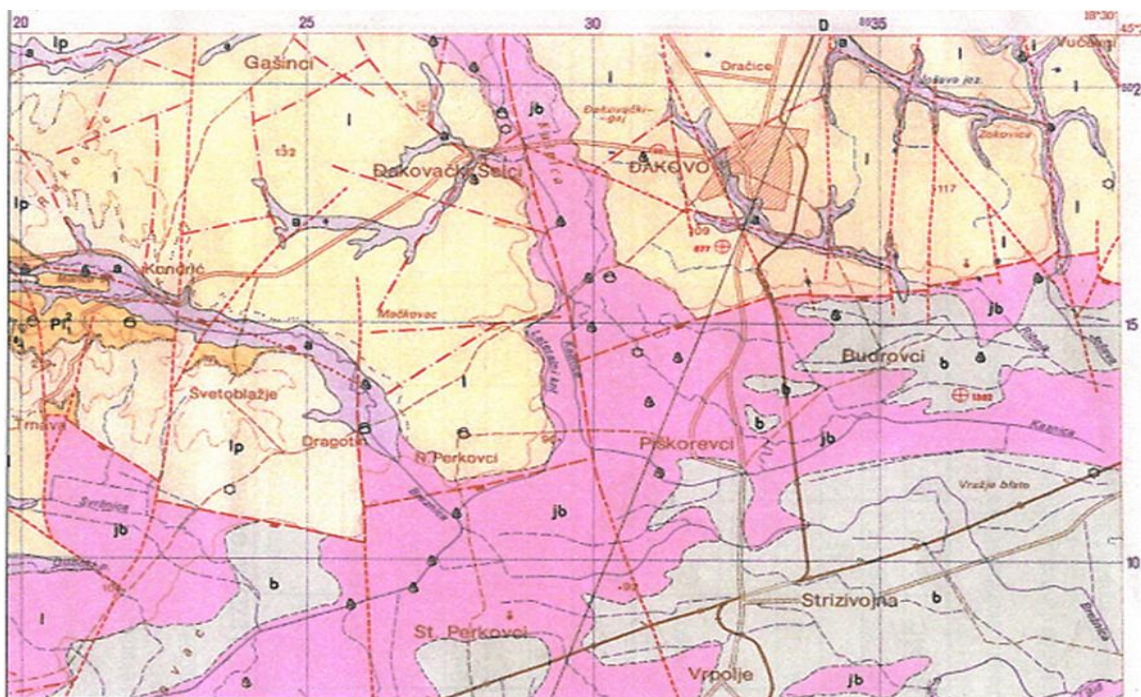
Relativna vlaga je, prema mjerenjima u Osijeku, najveća u prosincu. Prema pisanim podacima srednja godišnja vlaga iznosi 79%, a amplituda 18%.

3. 2 Geološke, hidrogeološke i geomehaničke značajke

3. 2. 1 Geološke značajke

Prema izvršenim istražnim radovima može se potvrditi da je obuhvaćeni prostor kvartarne starosti. Dolina kanala koji je desni pritok rijeke Jošave pripada Holocenu (Q2), a po tipu sedimenata predstavlja ga močvarni aluvijalni sediment zastupljen prahom, glinom, pijeskom i tresetnim materijalom (slika 3-2). Izdignuti dio istražnog prostora pripada pleistocenu i to najvjerojatnije gornjem, Q₁₃, koji se dijelom sastoji od kopnenog prapora, a dijelom od močvarnog prapora. Kopneni prapor zastupljen je tipičnim prapornim prahom s proslojcima izlužene gline i pijeska. Močvarni prapor se sastoji od beskarbonatnog praha, gline i proslojaka gline. Slojevi koji se susreću u profilu bušotina na istražnom prostoru sličnog su granulometrijskog sastava i plasticiteta s više ili manje uklopaka karbonata ili sadržaja oksida. Podinu ovih naslaga čine pjeskovite naslage koji su ujedno i vodonosni horizont (Strajher 2004).

Prisutnost oksida i karbonata izraženija je u zapadnijem dijelu idući prema kanalu gdje se primjećuje i isklinjavanje pojedinih slojeva. Podinu ovome sloju čine pjeskovito glinovite prašine srednje do povišene plastičnosti s čestom pojavom oksida i organske materije prema istočnom dijelu (slika 3-3). Ispod toga sloja dolazi do vrlo čestih promjena te se susreću od slojeva finog glinovitog pijeska do gline prašinaste i pjeskovito prašinaste. Podinu im čini prašinasti pijesak i pijesak čija moćnost zbog načina izvođenja istražnih radova nije utvrđena. Prema izvršenoj mineralološkoj analizi ispitani uzorci su ilitno montmorilonitne gline i mineralni kvarc, kaolinit, klorit, feldspate i hidrokside željeza.



Slika 3-2. Geološka karta šireg područja eksploatacijskog polja M 1:50 000 (Strajher 2004)



Slika 3-3. Prikaz glinovitog pijeska do prašinate gline

Od važnijih činioca na utjecaj tektonskih pokreta je primarni položaj sedimenata u litosferi. U primarne strukture spadaju pojave tečenja, klizanje, urušavanje, kosa i konvolutna laminacija u seriji sedimenata u kojoj se izmjenjuju slojevi sitnijeg sa slojevima krupnijeg zrna. Današnja tektonska aktivnost istražnog prostora potpuno je zanemariva, jer se u tom dijelu ista ne osjeća.

3. 2. 2 Hidrogeološke značajke područja

Osnovno hidrografsko obilježje površine je ekscentričnost tekućica. Najveće i najvažnije rijeke (Sava, Dunav, Drava) teku rubno. Hidrogeološki je potrebno razdvojiti naslage starije od tercijara, zatim tercijarno – kvartarni sedimentni kompleks rebrasto brežuljkastih predjela i na kraju vodonosne slojeve kvartarne starosti. Prvi vodonosni horizont prapornog ravnjaka javlja se u prvom pjeskovito – prašinasto – glinovitom sloju na dubini od 3–6 metara.

Istražno bušenje provedeno je u nepovoljnim klimatskim uvjetima u periodu jesen – zima 1987. godine koji je obilovao padalinama. Uočena je pojava podzemnih voda na dubini od četiri do šest metara u nekoliko bušotina. Drugi procjedni sloj nalazi se na dubini od 10 metara također registriran u nekoliko bušotina. Laboratorijske analize granulometrijskoga sastava pokazuju da svi ispitani litološki članovi imaju međuzrnsku poroznost, što je inače odlika ili mana prapornih naslaga. Prema tome se može odrediti da su registrirani litološki članovi vodopropusni do slabopropusni te kao takvi izgrađuju teren do dubine cca 20 metara. Glavni faktor pražnjenja infiltracijskih taloga je evapotranspiracija te je u toku eksploatacije moguće očekivati procjeđivanje procjednih voda po kosinama kopa te pojava klizanja tla (Kastmüller 2013).

3. 2. 3 Geomehaničke značajke

Laboratorijska ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava uzetih uzoraka provedena su u geomehaničkom laboratoriju Instituta „Geoexpert“ u Zagrebu.

Posmična čvrstoća „ τ “ je ispitana postupkom izravnog posmika. Uzorci su bili poremećeni te se priprema i ugradnja odvijala po postupku „Krey – Tiedemann „. Prema tom postupku uzorci se opterećuju normalnim naprezanjem prekonsolidacije te zatim rasterećuju i smiču. Obzirom na konzistenciju izabrano je naprezanje prekonsolidacije od 400 kPa, a naprezanja rasterećenja od 200 i 100 kPa. Odgovarajući parovi normalnih i najvećih posmičnih naprezanja daju rezultate kohezije i kuta otpora na smicanje (Nuić 1991). Svojstva koja su ispitana prikazana su u tablici 3-2. Prema podacima granice plastičnosti, uzorci 1, 2 i 4 spadaju u gline srednje plastičnosti dok uzorak broj tri spada u visokoplastične gline. Najviši stupanj upijanja vode ima uzorak broj dva što je posljedica upijanja vode iz lokve u neposrednoj blizini uzorkovanja. Uzorci su prema indeksu

konzistencije teškognječive do tvrde konzistencije. Volumna masa iznosi $1,82 \text{ t/m}^3$, a zapreminska težina $19,8 \text{ kN/m}^3$.

Tablica 3-2. Rezultati ispitivanja fizikalno – mehaničkih svojstava i elemenata posmične čvrstoće (Nuić 1991)

Uzorak	1	2	3	4
Prirodna vlažnost „w ₀ “ (%)	23,04	25,98	21,04	19,65
Granica plastičnosti „w _p “ (%)	20,10	18,80	21,80	18,55
Granica tečenja „w _l “ (%)	45,10	46,60	54,30	45,90
Indeks konzistencije „I _c “	0,88	0,74	1,02	0,96
Kohezija „c“ (kPa)	27,00	25,00	56,00	37,00
Kut otpora na smicanje „φ ₀ “ (°)	21,70	17,70	9,30	16,50

Kut unutarnjeg trenja materijala iznosi od $26^\circ - 30^\circ$.

3. 3 Rudarsko-tehnološki dio

Površinski kop „Grabovac“, dugi niz godina, radi na eksploataciji gline u svrhu proizvodnje opekarskih proizvoda u ciglani. Oplemenjivačko postrojenje i postrojenje za proizvodnju nalaze se na ležištu. Rezerve gline su istražene preliminarnim istražnim bušenjem te na osnovu tih rezultata napravljen je „Elaborat o rezervama i kvalitetu sirovine za opekarsku industiju“(Anišić 1989).

Glavni rudarski projekt izrađen je u ožujku 1991. Godine, a naziva se „Glavni rudarski projekt glinokopa „Grabovac“ Đakovo“ (Nuić 1991). U njemu je predložena i prihvaćena varijanta eksploatacije s dva bagera vedričara tipa BK-I za rad na visinskoj etaži te jedan bager vedričar tipa BK-V za rad na dubinskoj etaži lepezastim načinom. Predviđeni rad bagera u dubinskom rezu zauzima poziciju na gornjoj ivici dubinske etaže, dok bager u visinskom rezu dovodi na donju ivicu visinske etaže. Transport se vršio kamionima.

U Glavnom rudarskom projektu (Nuić 1991) napravljena je analiza stabilnosti kopa u kojoj se eksploatacija vršila pomoću bagra vedričara, dok u Dopunskom rudarskom projektu za primjenu hidrauličnih bagera. Nestabilnost se pojavljivala u kišnim razdobljima i to kao

pojedinačni odroni u nožici donje etaže. Pojave odrona je posljedica zadržavanje oborinskih voda uz nožicu. Sile poremećaja su vlastita težina mase, vode u tlu i vanjska opterećenja kao npr. bageri te ostala mehanizacija.

Navedeno u Glavnom rudarskom projektu izabrana je metoda proračuna po Bishop-u s kružnocilindričnom kontinuiranom kritičnom kliznom plohom s negativnim utjecajem vode. Hoek je ovu metodu grafički razradio u 5 modela. Za ovaj slučaj izabran je model s maksimalnim piezometarskim nivoom vode na udaljenosti 4H od nožice kosine. Faktor sigurnosti za visine etaže od 4 metra iznosi 2,6 do 3.

U siječnju 2004. godine izrađen je „II Dopunski rudarski projekt eksploatacije ciglarske gline eksploatacijskog polja „Grabovac“ (Strajher 2004). Razlozi prelaska na otkopavanje s hidrauličnim bagerima je zbog nedovoljnog kapaciteta, dotrajalosti bagera vedričara i izbjegavanja eksploatacije gline u nepovoljnim vremenskim uvjetima. Zbog potrebe odležavanja gline formiraju se deponije. Za otkopavanje se koriste hidraulički bageri. U ovome elaboratu (Strajher 2004) navedeno je da se eksploatacija vrši samo u ljetnom periodu. Odobreni tehnološki proces i u ovome elaboratu ostaje nepromijenjen.

3. 3. 1 Rezerve i značajke mineralne sirovine

Dosadašnja istraživanja obavljala su se metodom bušenja. Izbušene su ukupno 52 bušotine u mreži za dokazivanje A, B, C₁ kategorije rezervi. Bušenje prve 42 bušotine izvedeno je 1988. i 1989. godine, dok je preostalih 10 bušotina izvedeno u 2000. godini. Ukupna duljina bušenja iznosila je 961,8 metara te su sve nabušile predmetnu sirovinu – ciglarsku glinu pleistocenske starosti. Ukupno je iz jezgara uzeto 161 uzorak za pojedinačne analize (64 uzorka u 2000. godini). Zbog potrebe proračuna ležište je podijeljeno na dva dijela: ležište Grabovac 1 i Grabovac 2. Podjela je napravljena zbog kanala koji drenira područje.

Izvanbilančne rezerve se nalaze na završnim kosinama i zaštitnom sloju te u zaštitnom stupu stambenog i gospodarskog objekta u ležištu Grabovac 1, prilog broj 1, (Kastmüller 2013). Količine potvrđenih rezervi nalaze se tablici 3-3.

Tablica 3-3. Potvrđene količine rezervi ciglarske gline na eksploatacijskom polju „Grabovac“ sa stanjem 31.12.2012. (Kastmüller 2013)

Klasa Kategorija	Ukupne rezerve			Eksploatacijski gubici (%)	Eksploatacijske rezerve (u 1 000 m ³)
	Bilančne	Izvanbilančne	Ukupno		
1	2	3	4	5	6
A	110 311	101 302	211 613	3	107 002
B	1 666 575	1 050 173	2 716 748	3	1 616 578
C ₁	424 280	391 257	586 519	3	411 552
A+B+C ₁	2 201 166	1 542 632	3 514 880	3	2 134 986

Ukupna količina jalovinskog pokrova koju je potrebno odstraniti da bi se otkopale bilančne rezerve iznose ukupno 49 147 m³.

U 1988. i 1989. godini obavljena su ispitivanja iz buštine od kojih je 97 djelomičnih (pojedinačni uzorci) te 16 kompletnih (kompozitnih) za primjenu u opekarskoj industriji. Dobiveni rezultati pokazuju veliku sličnost.

Svi dobiveni uzorci su žute boje s ostatkom na situ 10.000 oč/cm² u granicama 1,4 do 1,6%. Dobiveni mineralni sastav na situ glasi: limonitne konkrecije, muskovit i kvarc, a reakcija na karbonate je negativna. Uzorak iz bušotine B/K-22 sadrži oko 6% karbonata i zbog toga se razlikuje od svih ostalih uzoraka. Vrijednost za plastičnost po Pfefferkornu kreću se od 28,7 do 31,6 što odgovara srednjeplastičnoj glini. Stezanje uzoraka provelo se sušenjem na 105°C te se kretalo u granicama od 8,1 do 9,8%, a dobivena svojna čvrstoća iznosila 7,6 do 11,5 MPa. Granulometrijskom i sedimentacijskom analizom dobiveno je da sva sirovina nema čestica većih od 2 mm dok ispod 2 μm iznosi oko 30%. U 2001. godini završena su ispitivanja uzoraka uzetih iz bušotina B-43 do B-52.

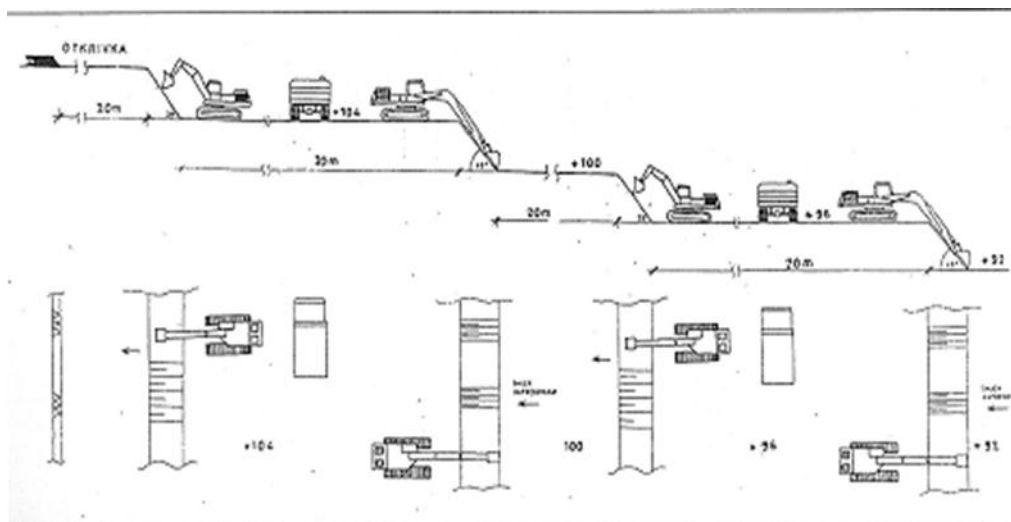
Rezultati dobiveni ispitivanjem pokazuju da glinište Grabovac se sastoji od siltozne gline ujednačene kvalitete po čitavom istražnom prostoru. Udio karbonata je povećan na položaju bušotine B-49 pa je preporuka da se u potpunosti ne vrši eksploatacija na tom području (slika 3-4).

Mjerilo (m)	Aps. kota (m)	Grafički	Litološki sastav naslaga	Uzorak		Starost
			Opis	Broj	Interval (oznaka)	
0	97		Površina terena			pleistocen
1	95		GLINA smeđe boje	1	0,5-2,0	
2			GLINA tamnosive boje s vapnenim konkrekcijama	2	2,0-3,5	
3	93,5					
4	90,5		GLINA sive boje, siltozna	3	3,5-6,5	
5						
6						
7	85		zaglinjeni SILT sive do sivoplave boje	4	6,5-9,5	
8						
9						
10						
11				5	9,5-12,0	
12						

Slika 3-4. Prikaz geološkog profila bušotine B-49 (Kastmüller 2013)

3. 3. 2 Eksploatacija mineralne sirovine

Granica iskopa, iz dopunskog rudarskog projekta, se u potpunosti poistovjećuje s konturom utvrđenih rezervi i nagibom završne kosine $\beta = 30^\circ$. Donja granica iskopa ide do nivoa utvrđenih rezervi na koti +92. Kote visine etaže iskopa po cijeloj površini utvrđenih rezervi određene su svakih 4 metra zbog visine zahvata hidrauličnog bagera. Zbog spomenute visine zahvata postoje etaže na kotama: +92, +96, +100 i +104. Shema otkopa i utovara prikazana je na slici 3-5. Veći dio osnovnog terena nalazi se na koti +108 te je zbog toga ukupna visina zahvata 16 metara ($H = 16$ m).



Slika 3-5. Shema iskopa i utovara (Strajher 2004)

Zbog načina rada hidrauličnog bagera i njihove visine zahvata etaže su pod sljedećim nagibom (slika 3-5):

1. Etaža +92/+96 $\rightarrow \alpha=35^\circ$
2. Etaža +96/+100 $\rightarrow \alpha=30^\circ$
3. Etaža +100/+104 $\rightarrow \alpha=35^\circ$
4. Etaža +104/+108 $\rightarrow \alpha=30^\circ$

Osnovno projektno rješenje Dopunskog rudarskog projekta da se određenim redoslijedom postojeće stanje dovede prvo u projektiranu raspodjelu po visini i da se izvrši iskop uz istočnu granicu prema glavnoj cesti Đakovo-Osijek do južne granice eksploatacijskog polja, a zatim da se sve etaže pomiču prema zapadnoj granici kopa Grabovac 1 uz generalno pružanje etaža sjever-jug. Nakon otkopavanja polja Grabovac 1 uz ostavljanje zaštitnog stupa duž kanala po istom principu ide i eksploatacija polja Grabovac 2. Ovakav način eksploatacije podijeljen je u četiri faze.

Faza 1 obuhvaća frontu dužine oko 450 metara na postojećem stanju kopa na zapadnoj strani u izradi etaža +96, +100, +104 i iskop na istočnoj strani gdje dolazi do proširenja rezervi u polju Grabovac 1A. U ovoj fazi započinje odvodnjavanje kopa pomoću pumpnog sistema na sjevernoj strani kopa dok se sabirnik nalazi na koti +92.

Faza 2A je po površini i količini gline najveća i čini glavninu eksploatacije gline. Iz faze jedan se prema tehnološkom opisu iskopom ide prema jugu na istočnoj strani polja (cesta Đakovo-Osijek). Uz izrađene etaže iz faze jedan nastavlja se razvoj kopa. Bager na etaži

+96 vrši nadkopno do etaže +100 i podkopno do etaže +92 (donja određena granica rezervi). Drugi bagger otkopava na etaži +104 do osnovnog terena +108 i podkopno do etaže +100. Nakon postizanja geometrije kopa iz faze 2A, orijentacija napredovanja kopa se okreće za 90° i vrši se iskop po postojećim etažama prema zapadnoj granici kopa (slika 3-5)

U fazi tri se nastavlja eksploatacija po navedenoj fazi 2. U fazi četiri predviđa se iskop etaže +96 do završne konture kopa u polju Grabovac 1 te iskop cijele mase u polju Grabovac 2. Eksploatacija na zapadnoj strani odvija se odmah na početku faze pri čemu završne konture kopa su pod nagibom $\beta = 30^\circ$ (Strajher 2004).



Slika 3-6. Prikaz eksploatacijskog polja Grabovac

3. 4 Odvodnjavanje i zaštita od površinskih i podzemnih voda

Slivno područje na lokaciji kopa ima generalni pad od istočne granice otkopnog polja prema zapadnoj granici gdje je smješten i prihvatni kanal na koti +92 m n. m. (najniža kota terena).

Unutar kontura kopa, formira se slivno područje na nivou dubinske etaže, gdje postiže svoj maksimum od 231,130 m² na južnoj granici iskopa (Nuić 1991). Obzirom na vrstu slivne

površine usvaja se koeficijent sliva 0,8 za otkriveno tlo pijesak ili glinu. Budući da je površina otkopnog polja generalno nagnuta u pravcu zapadne granice, očekivano je da će oborinske vode imati, većinom, tendenciju toka u tom pravcu, a jedan dio gravitirati prema kosini visinske etaže. Izrađeni su kanali na kotama +92 i +102 m n. m. Količine vode koju može primiti kanal na dubinskoj etaži iznosi 0,945 m³/s, dok na visinskoj 0,178 m³/s. Kanali za prihvati i odvod vode dimenzionirani su na maksimalne oborine, a kod većih oborina rad na gliništu se obustavlja. Zbog nedostatka vode za tehnološke vode izveden je zdenac dubine 51 metar. Statička razina podzemne vode iznosila je 2,70 metara. Za proračun izdašnosti zdenca usvojeni su koeficijenti transmisibiliteta ($T = 1,40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), kritična brzina ulaska vode u zdenac ($V_{\text{krit}} = 5,44 \times 10^{-4} \text{ m/s}$), koeficijent hidrauličke provodljivosti ($k = 6,66 \times 10^{-5} \text{ m/s}$).

Podaci su preuzeti iz izvedbeno pokusno- eksploatacijskog zdenca na lokaciji „Tondach d. o. o.“ Đakovo (Tusić 2002).

4. Analiza stabilnosti glinokopa „Grabovac“

U ovome radu provedena je analiza stabilnosti radnih i završnih kosina glinokopa „Grabovac“ na temelju podataka iz projektne dokumentacije koju posjeduje Tondach Đakovo. Analiza je provedena zbog toga što se u prošlosti pojavljivala nestabilnost na pojedinom dijelovima kopa. Zbog specifičnosti zadatka analiza je provedena proračunima faktora sigurnosti pomoću tri metode: Hoekovog dijagrama za kružni slom (Hoek i Bray 1974), računalnim programom GeoStudio/Slope (GEO – SLOPE international ltd 2012) i aplikacijom Slope/Ex (Hrženjak 2004). Proračuni na ovaj način provedeni su iz razloga određene ograničenosti primjene svake od ovih metoda, odnosno studentskih verzija aplikacija, kako bi se dobivene vrijednosti faktora sigurnosti mogle međusobno usporediti.

U Glavnom rudarskom projektu (Nuić 1991) provedena je analiza stabilnosti glinokopa Hoekovom dijagramskom metodom pa je i u ovome radu provedena analiza istom metodom, ali prema stanju glinokopa (projektним parametrima) iz Dopunskog rudarskog projekta, 2004. godine. Osim Hoekovog dijagrama za kružni slom koristio se i program GeoStudio/Slope. Navedene dvije metode korištene su za analizu stabilnosti glinokopa bez utjecaja podzemne vode i dodatnog opterećenja. Geostudio/Slope zbog studentske verzije je ograničen na takve slučajeve pa se zbog toga koristila aplikacija Slope/Ex koja ima mogućnosti provođenja analize stabilnosti s utjecajem podzemne vode i opterećenja.

U tablicama 4-1. i 4-2. prikazani su podaci koji su korišteni za analizu stabilnosti glinokopa „Grabovac“.

Tablica 4- 1. Tehnički elementi (Strajher 2004)

Visina etaže	$h = 4 \text{ m}$
Visina na završnoj kosini	$H=108-92=16 \text{ m}$
- Projekcije kosina za podkopni rad za nadkopni rad	$x_2 = 5,7 \text{ m}$ $x_1 = 6,9 \text{ m}$
- Kutovi nagiba etaža u radu Za podkopni rad Za nadkopni rad	$\alpha=35^\circ$ $\alpha=35^\circ$

Tablica 4- 2. Fizikalno - mehaničke značajke sirovine (Strajher 2004)

γ - volumna masa	1,82 t/m ³
c – kohezija	Maksimalno do 30 kPa
ϕ - kut otpora na smicanje	18,7°
φ - kut unutarnjeg trenja materijala	26 do 30°

4. 1. Proračuni faktora sigurnosti Hoekovom metodom

Eksploatacija na glinokopu odvija se u četiri radne etaže. Kote etaža i pripadajući nagibi iznose:

1. Etaža +92/+96 $\rightarrow \alpha=35^\circ$
2. Etaža +96/+100 $\rightarrow \alpha=30^\circ$
3. Etaža +100/+104 $\rightarrow \alpha=35^\circ$
4. Etaža +104/+108 $\rightarrow \alpha=30^\circ$

Podaci koji su korišteni u proračunima su (za sve radne etaže):

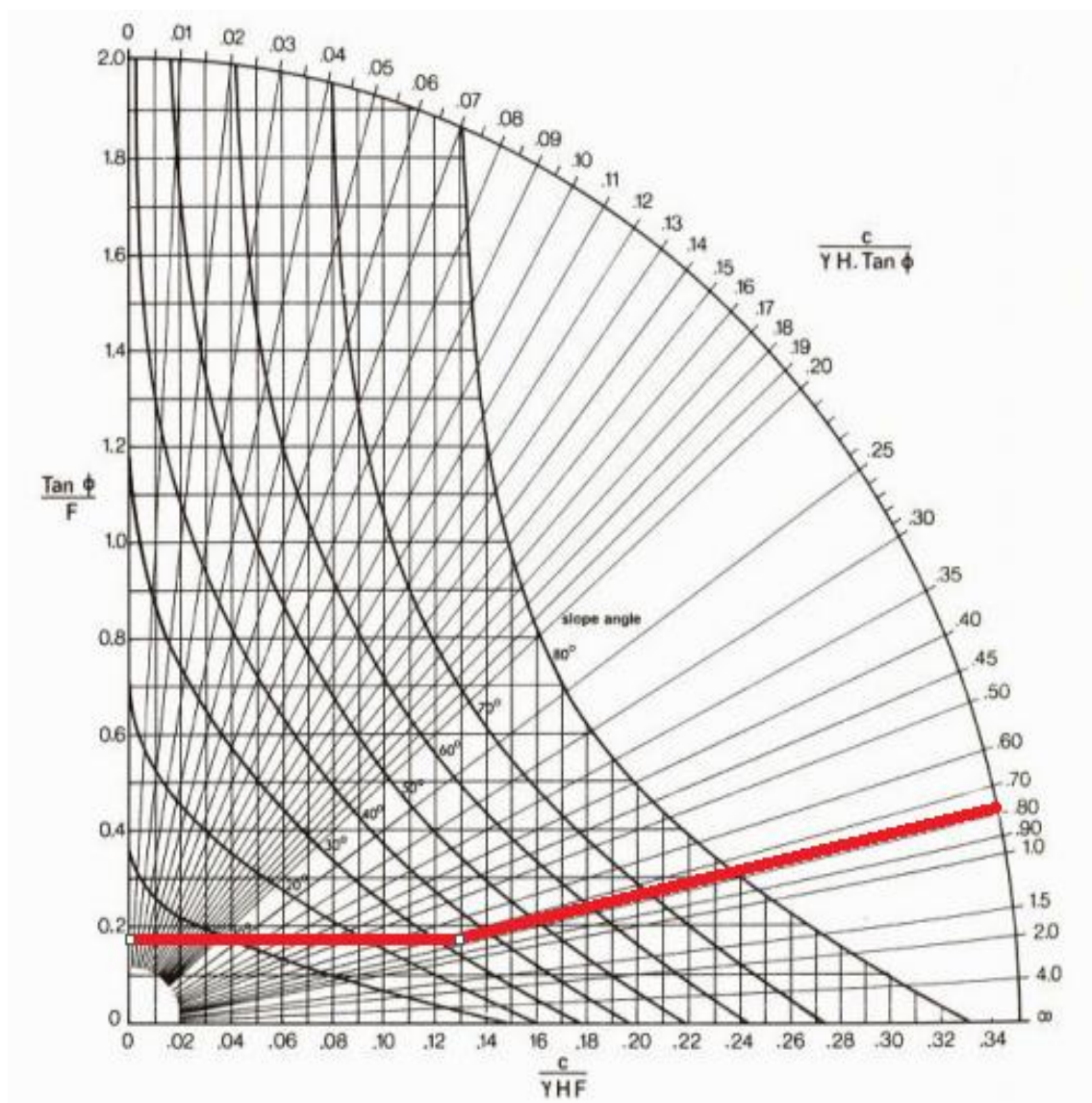
1. c (kohezija) = 30 kPa = 626,56 lb/ft²
2. γ (volumna masa) = 1,82 t/m³ = 113,62 lb/ft³
3. H (visina kosine) = 4 m = 13,12 stopa
4. φ (kut unutarnjeg trenja materijala) = 26°

Izračun faktora sigurnosti za etaže +92/+96 i +100/+104 s nagibom od 35° prikazan je na dijagramu slike 4-1.

Za etaže +96/+100 i +104/+108 s nagibom od 30° na dijagramu slike 4-2.

Izračun bezdimenzionalnog faktora za etaže +92/+96 i +100/+104, izraz 4-1:

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \tan \varphi} = \frac{626,56}{113,62 \cdot 13,12 \cdot \tan(28)} = 0,79 \quad (4-1)$$

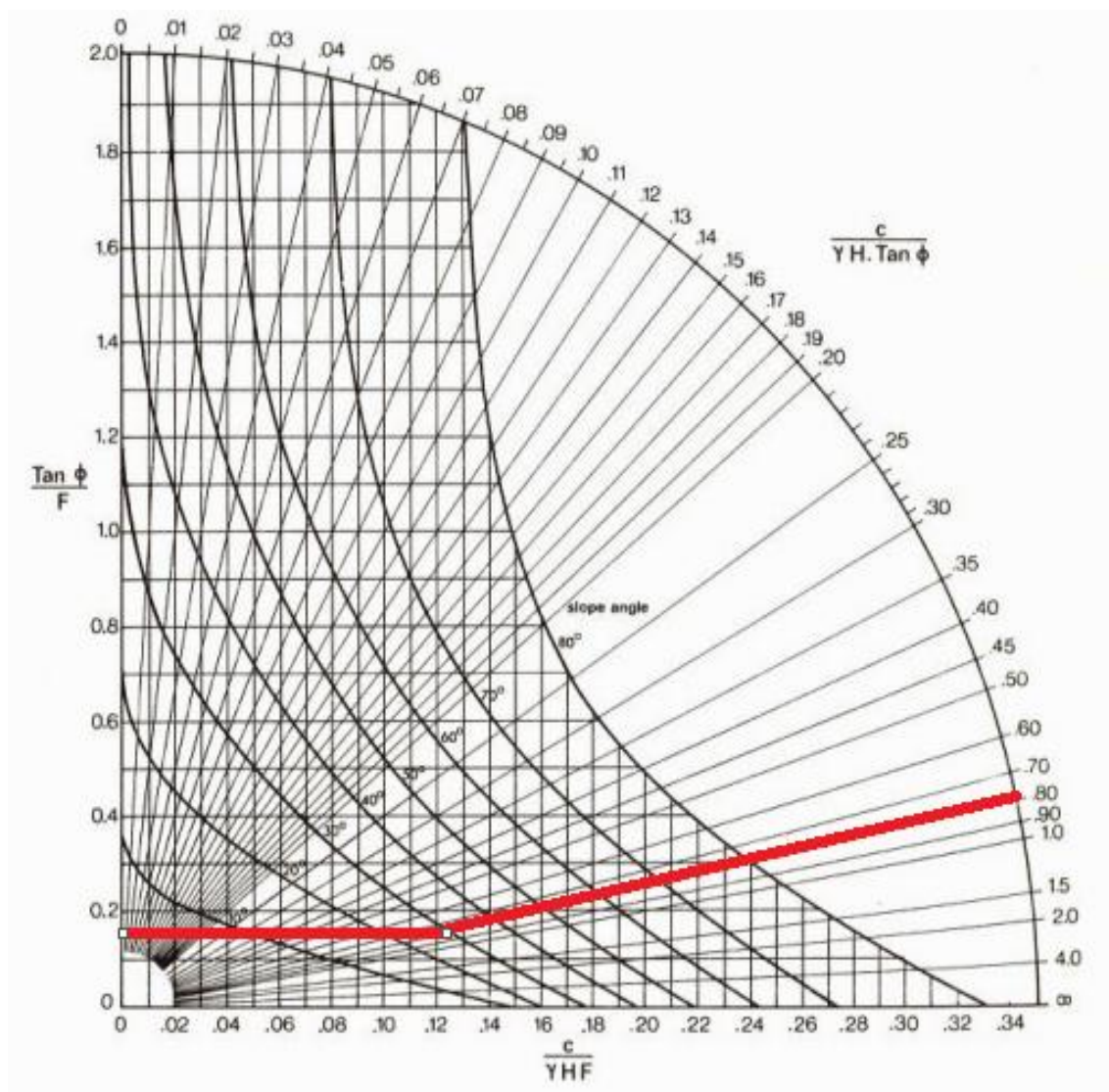


Slika 4- 1. Prikaz vrijednosti za izračun faktora sigurnosti za etaže +92/+96 i +100/+104

Očitana vrijednost $\tan\phi/F$ iznosi 0,18, na temelju koje faktor sigurnosti za etaže +92/+96 i +100/+104 pod nagibom od 35° iznosi, izraz 4-2:

$$F = \frac{\tan \phi}{0,18} = \frac{\tan(28)}{0,18} = 2,95 \quad (4-2)$$

Izračunata vrijednost faktora sigurnosti za etaže +92/+96 i +100/+104 iznosi 2,95, što prikazuje da je prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86) mjera stabilnosti zadovoljena.



Slika 4-2. Prikaz vrijednosti za izračun faktora sigurnosti za etaže +96/+100 i +104/+108

Očitana vrijednost $\tan\phi/F$ iznosi 0,16, na temelju koje faktor sigurnosti za etaže +96/+100 i +104/+108 pod nagibom od 30° iznosi, izraz 4-3:

$$F = \frac{\tan\phi}{0,16} = \frac{\tan(28)}{0,16} = 3,33 \quad (4-3)$$

Izračunata vrijednost faktora sigurnosti za etaže +96/+100 i +104/+108 iznosi 3,33, što prikazuje da je prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86) mjera stabilnosti zadovoljena.

Osim radnih kosina provedena je analiza i završne kosine glinokopa.

Završna kosina kopa nalazi se na koti +92/+108.

Zadani podaci završne kosine:

$$c \text{ (kohezija)} = 30 \text{ kPa} = 626,56 \text{ lb/ft}^2$$

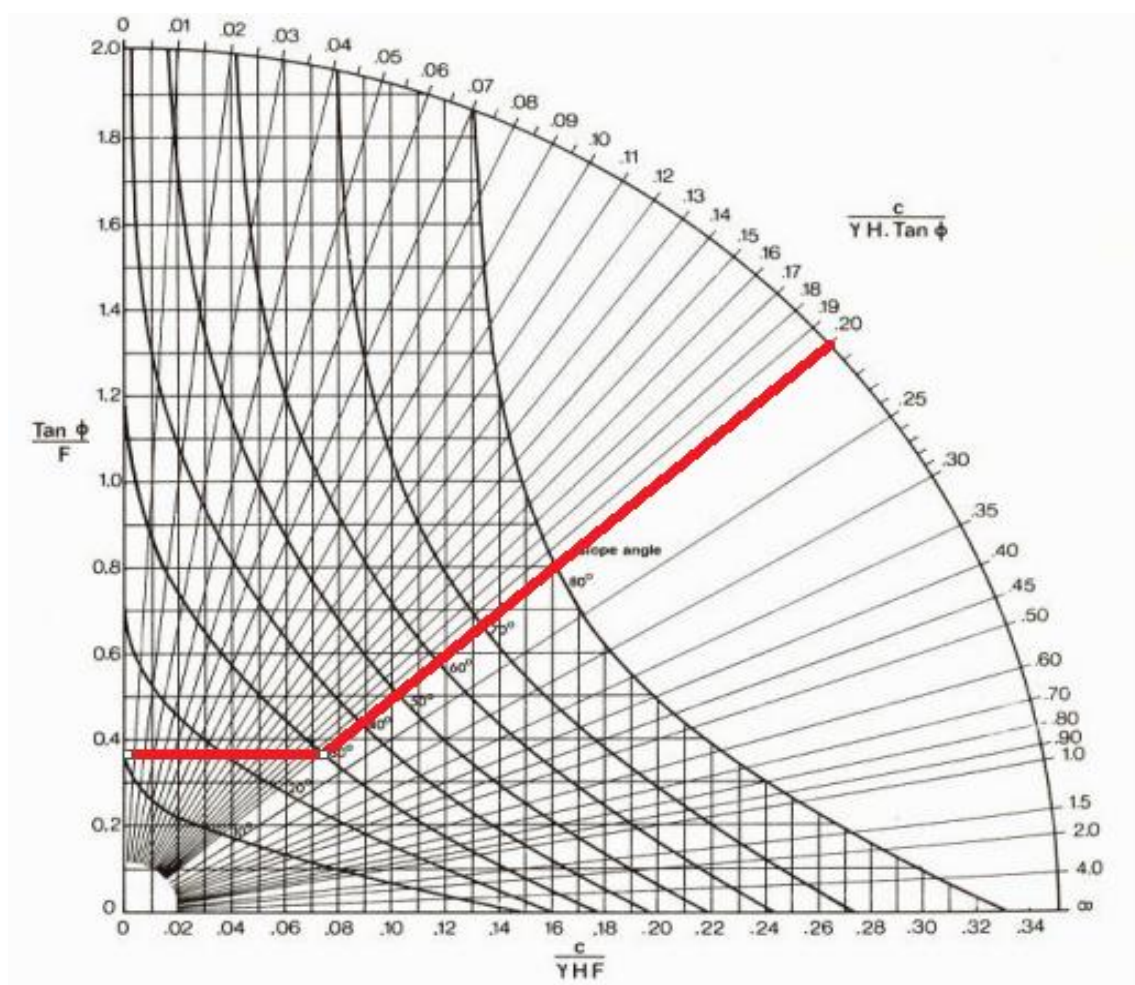
$$\gamma \text{ (volumna masa)} = 1,82 \text{ t/m}^3 = 113,62 \text{ lb/ft}^3$$

$$H \text{ (visina kosine)} = 16 \text{ m} = 52,49 \text{ stopa}$$

$$\varphi \text{ (kut unutarnjeg trenja materijala)} = 28^\circ$$

Izračun bezdimenzionalnog faktora za završne kosine, izraz 4-4:

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \tan \varphi} = \frac{626,56}{113,62 \cdot 52,49 \cdot \tan(28)} = 0,20 \quad (4-4)$$



Slika 4-3. Prikaz rješenja za faktor sigurnosti završne kosine glinokopa

Iz slike 4 – 3. očitana vrijednost za $\tan\varphi/F$ iznosi 0,38. Iz dobivene vrijednosti izračunat je faktor sigurnosti, izraz 4-5:

$$F = \frac{\tan\varphi}{0,38} = \frac{\tan(28^\circ)}{0,38} = 1,40 \quad (4-5)$$

Dobivena vrijednost faktora sigurnosti (1,40) pokazuje da je završna kosina glinokopa „Grabovac“ stabilna jer je faktor sigurnosti u propisanom rasponu najmanjih vrijednosti. Prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86) određeni faktor zadovoljava mjere stabilnosti.

Svi faktori sigurnosti dobiveni za radne i završne kosine ovom metodom odnose se na analizu bez utjecaja vode i opterećenja te zbog toga ova metoda ima velika ograničenja.

4. 2. Proračuni faktora sigurnosti GeoStudio/Slope programom i Slope/Excel aplikacijom

Postupak modeliranja pomoću programa SLOPE/W sastoji se u postavljanju modela i zadavanja ulaznih veličina. Koraci pri modeliranju su postavljanje geometrije modela, odabir kriterija čvrstoće i zadavanje pripadnih značajki materijala, zadavanje posebnih konstrukcija, djelovanje posebnih konstrukcija i zadavanja kliznih ploha. Postavljanje geometrije modela podrazumijeva zadavanje točaka. Pomoću zadanih točaka kreiraju se poligoni koji su potrebni za definiranje raspodjele svojstava materijala. Nakon toga se kreiraju slobodne linije i točke ukoliko su one potrebne za dodatna opterećenja i sl. U programu se mora obaviti postupak definiranja, odnosno zadavanja potencijalne klizne plohe, nakon čega slijedi diskretizacija modela klizne mase na lamele. Važan dio modeliranja je odabiranje kriterija čvrstoće materijala. Kriterij koji se koristio u projektu je Mohr-Coulombov. Mohr-Coulombov kriterije čvrstoće ima parametre koheziju i kut unutarnjeg trenja. Kružne klizne plohe zadavaju se pomoću točke središta kružnica i tangenti koje definiraju polumjere u slučaju SLOPE/W aplikacije, odnosno ulaza i izlaza klizne plohe u slučaju Slope/Ex aplikacije. Klizne plohe složenog oblika zadavaju se kružnim dijelom kroz nestabilnu masu te rubnim dijelom po kontaktu uz krutu podlogu. Prikaz i vrednovanje rezultata proračuna obuhvaća pregled dobivenih vrijednosti, F_s , i oblika kliznih ploha. Provjerava se uspješnost pronalaženja kritične klizne plohe, odnosno

globalnog minimuma vrijednosti F_s jer on predstavlja realnu kritičnu kliznu plohu, te pregled i ocjena prihvatljivosti rješenja za oblik kritične klizne plohe.

U računalnom programu GeoStudio/Slope provedene su analize radnih i završnih kosina bez utjecaja vode, opterećenja na njih te seizmičkog opterećenja. Nemogućnost provođenja takvih analiza je zbog toga što je na raspolaganju samo studentska verzija. Analize su se provodile za završne kosine, profili A-A' i B-B' te radne kosine, profili C-C' i D-D' (prilog I i II) prema metodi Bishopa. Za provođenje analize ovim programom koristili su se fizikalno – mehaničke značajke sirovine prikazane u tablici 4-2. Izlazni rezultati s prikazanom geometrijom kosina prikazani su u prilogima 3-7. Dobivene vrijednosti faktora sigurnosti nalaze se u tablici 4-3.

Aplikacija Slope/Ex (Hrženjak 2004) namijenjena je za analizu stabilnosti kosina u slučaju kada se slom odvija po zakrivljenoj ili složenoj kliznoj plohi prema metodi Bishopa.

U ovoj aplikaciji provedene su također analize stabilnosti radnih i završnih kosina glinokopa „Grabovac“. Analiza radnih kosina, profili C-C' i D-D', provodila se: bez podzemne vode i opterećenja, s utjecajem podzemne vode i opterećenja na kosini što čini bager koji vrši eksploataciju, te za svaki slučaj posebno. Utjecaj podzemne vode postavljen je jedan metar ispod površine tla dok težina bagera iznosila je 338 kN (Strajher 2004).

Za analizu završnih kosina osim utjecaja podzemnih voda koristio se i seizmički koeficijent koji je iznosio 0,15 u horizontalnom smjeru. Podzemna voda se isto postavljala na jedan metar ispod površine tla. Za analizu završnih kosina nije se koristilo opterećenje na kosini (bager). Izlazni podaci aplikacije Slope/Ex prikazani su u prilogima od 8-20. Vrijednosti faktora sigurnosti, bez utjecaja podzemne vode i opterećenja prikazani su u tablici 4-3, dok s utjecajem podzemne vode i opterećenja su prikazani u tablici 4-4.

Tablica 4-3. Prikaz vrijednosti faktora sigurnosti bez utjecaja podzemne vode i opterećenja

Metode proračuna	GeoStudio/Slope	Slope/Ex
Profili	Faktor sigurnosti	
A-A'	2,010	1,990
B-B'	1,965	1,952
C-C'	3,125	3,059
D-D'	3,908	3,842

Tablica 4-4. Prikaz vrijednosti faktora sigurnosti s utjecajem podzemne vode i opterećenja, Slope/Ex

Utjecaj	Profili			
	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'
Podzemna voda	1,583	1,501	2,258	3,285
Opterećenje (bager)	/	/	2,093	1,639
Seizmičko opterećenje	1,484	1,454	/	/
Opterećenje + podzemna voda	/	/	1,836	1,544

Provedenom analizom stabilnosti glinokopa „Grabovac“ pomoću tri neovisne metode dobivene su vrijednosti faktora sigurnosti za radne i završne kosine. U svakoj metodi proračuna analizirano je stanje stabilnosti bez utjecaja podzemne vode, opterećenja na kosini te seizmičkog opterećenja kako bih se mogle usporediti dobivene vrijednosti faktora sigurnosti.

Prema Hoekovoj metodi za radne kosine pod nagibom 35° (profil D-D') faktor sigurnosti iznosi 3,33. U programu GeoStudio/Slope za taj isti profil faktor sigurnosti iznosi 3,908. Izlazni podatak za faktor sigurnosti u aplikaciji Slope/Ex iznosi 3,842

Radna kosina pod nagibom 30° (profil C-C') Heokovom metodom faktor sigurnosti iznosi 2,95. Izlazne vrijednosti GeoStudio za taj profil iznosi 3,125 dok u aplikaciji Slope/Ex faktor sigurnosti iznosi 3,059.

Završne kosine A-A' i B-B' Hoekovom metodom se nije mogla analizirati pojedinačno jer imaju iste ulazne parametre potrebne za tu dijagramsku metodu te zbog toga njihov zajednički faktor sigurnosti iznosi 1,40. Ovaj slučaj pokazuje na još jedno ograničenje ove metode koja koristi samo nagib radne kosine i ukupnu visinu od geometrijskih značajki.

U analizi stabilnosti završne kosine profila A-A' faktor sigurnosti u GeoStudio/Slope-u iznosi 2,010 dok u aplikaciji Slope/Ex iznosi 1,990. Faktor sigurnosti završne kosine profila B-B' u GeoStudio/Slope-u iznosi 1,965 dok u aplikaciji Slope/Ex iznosi 1,952.

Najmanji faktori sigurnosti za slučajeve na kosini koji se mogu usporediti dobivaju se Hoekovom dijagramskom metodom, dok najveći faktor sigurnosti dobiva se programom GeoStudio/Slope. Najmanji faktor sigurnosti za završne kosine prema Hoekovoj metodi iznosi 1,40, dok najveći iznosi 2,010 dobiven iz GeoStudio/Slope-a. Za radne kosine sa slučajem bez utjecaja podzemne vode i opterećenja najmanji faktor sigurnosti, također je dobiven Hoekovom metodom i iznosi 2,95 dok najveći faktor sigurnosti za isti slučaj radne kosine dobiven je u programu GeoStudio/Slope-a, i iznosi 3,908.

Dobivene vrijednosti faktora sigurnosti za sve radne i završne kosine, dobivene s tri različite metode proračuna, nalaze se u propisanom rasponu najmanjih vrijednosti prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86) te je mjera stabilnosti zadovoljena.

5. Zaključak

U ovome radu provedena je analiza stabilnosti glinokopa „Grabovac“ s tri različite metode, koje su međusobno neovisne. Korištene metode su grafička Hoekova metoda za kružni slom, program GeoStudio/Slope i aplikacija Slope/Ex. Razlog korištenja te tri metode je usporedba dobivenih vrijednosti faktora sigurnosti te njihova ograničenost za pojedine slučajeve na kosinama. Analiza stabilnosti se provodila za radne i završne kosine glinokopa s različitim utjecajima na nju. Koristio se utjecaj podzemne vode, opterećenja (bager za radne, a seizmički koeficijent za završne kosine) te njihov zajednički utjecaj za radne kosine.

Provedenom analizom se ustanovilo da radne i završne kosine glinokopa „Grabovac“ su stabilne jer faktor sigurnosti zadovoljava kriterije prema Pravilniku o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (SL, 4/86)

6. Literatura

ANUŠIĆ, A. 1989. Elaborat o rezervama i kvalitetu sirovine za opekarsku industriju. Zagreb

HIGHLAND, L. M. and BOBROWSKY, P., 2008. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Virginia, U.S. Geological Survey Circular

HOEK, E., BRAY, J. W., 1974. Rock Slope Engineering. London: The institution of Mining and Metallurgy

HRŽENJAK, P., 2004. Određivanje složenih kliznih ploha i postupaka proračuna stabilnih stijenskih kosina, doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

KASTMULLER, Ž., 2013. Elaborat o rezervama ciglarske gline na eksploatacijskom polju „Grabovac“ – obnova rezervi. Zagreb: GeoTim d.o.o društvo za projektiranje i nadzor u geologiji i rudarstvu

MIHALIĆ-ARBANAS, S. 2006. Inženjerska geologija: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

NONVEILLER, E., 1987. Kliženje i stabilizacija kosina, Zagreb: Školska knjiga

NUIĆ, J. 1991. Glavni rudarski projekt glinokopa „Grabovac“ – Đakovo. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

POČEKAL, N., 2012. Geoinformacijski postupci otkrivanja potencijalnih ležišta: diplomski rad. Varaždin: Geotehnički fakultet

SLUŽBENI LIST SFRJ, 1983. Pravilnik o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (11/86). Beograd: Službeni list SFRJ

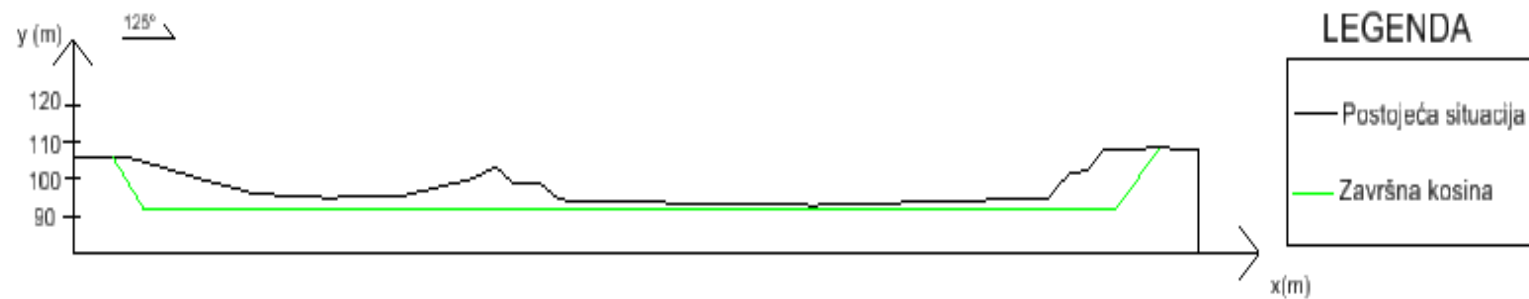
STRAJHER, M., 2004. II Dopunski rudarski projekt eksploatacije ciglarske gline eksploatacijskog polja „Grabovac“. Virovitica

SZAVITS- NOSSAN, V., 2006. Mehanika tla i stijena, stabilnost kosina. Zagreb: školska knjiga

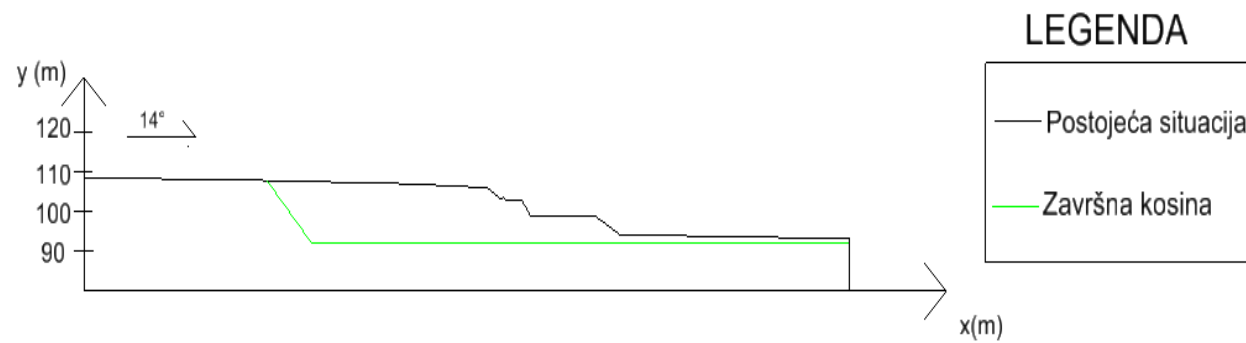
TUSIĆ, V., 2002. Izvedba pokusno-eksploatacijskog zdenca na lokaciji „Tondach“ – Đakovo. Osijek: GEOISTRAŽIVANJE OSIJEK d.o.o

PRILOZI

Profil A - A'

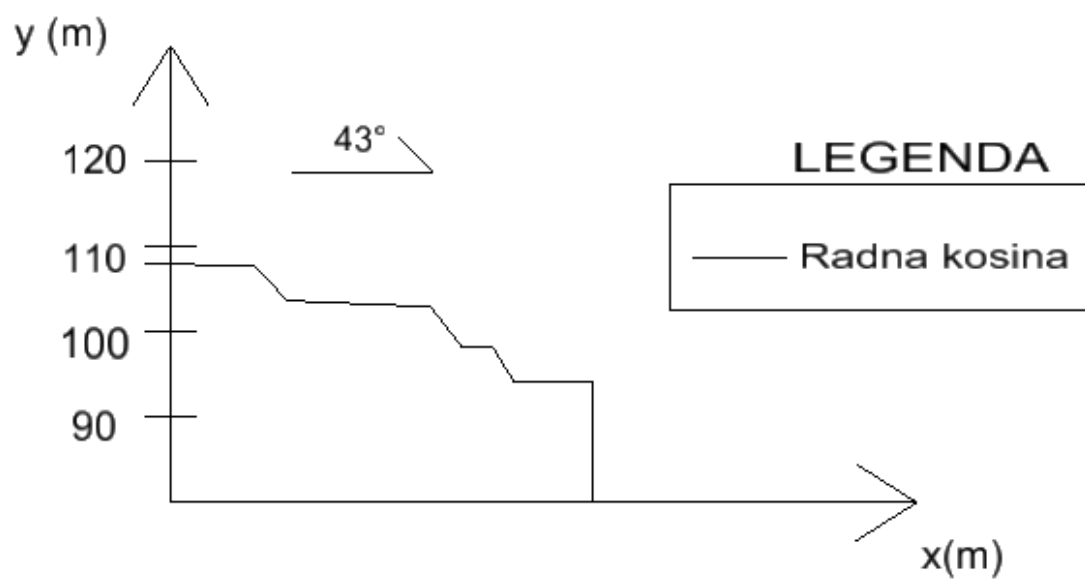


Profil B - B'

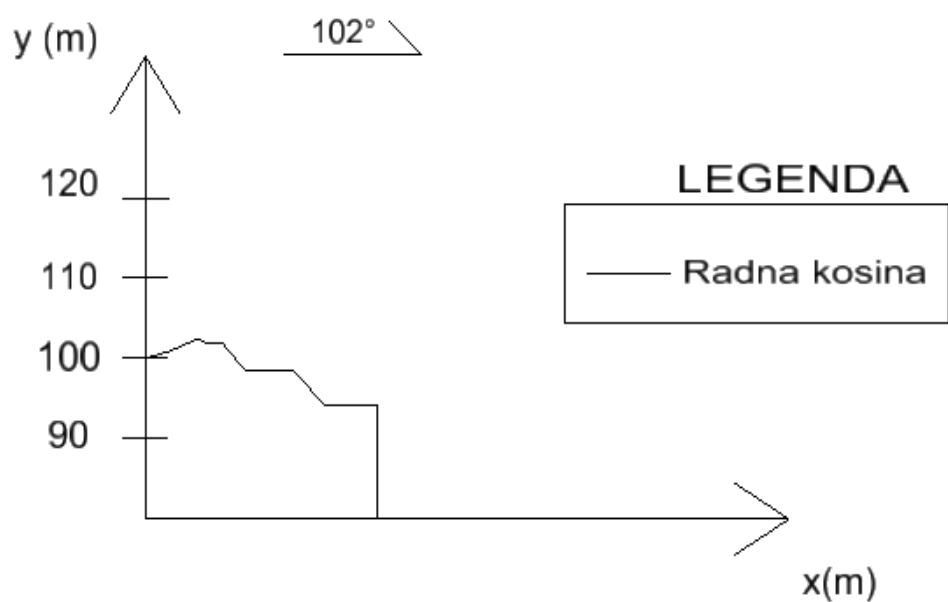


Prilog 2a. Završne kosine, profili A-A' i B-B', Mj: Hz 1:5000, V 1:2000

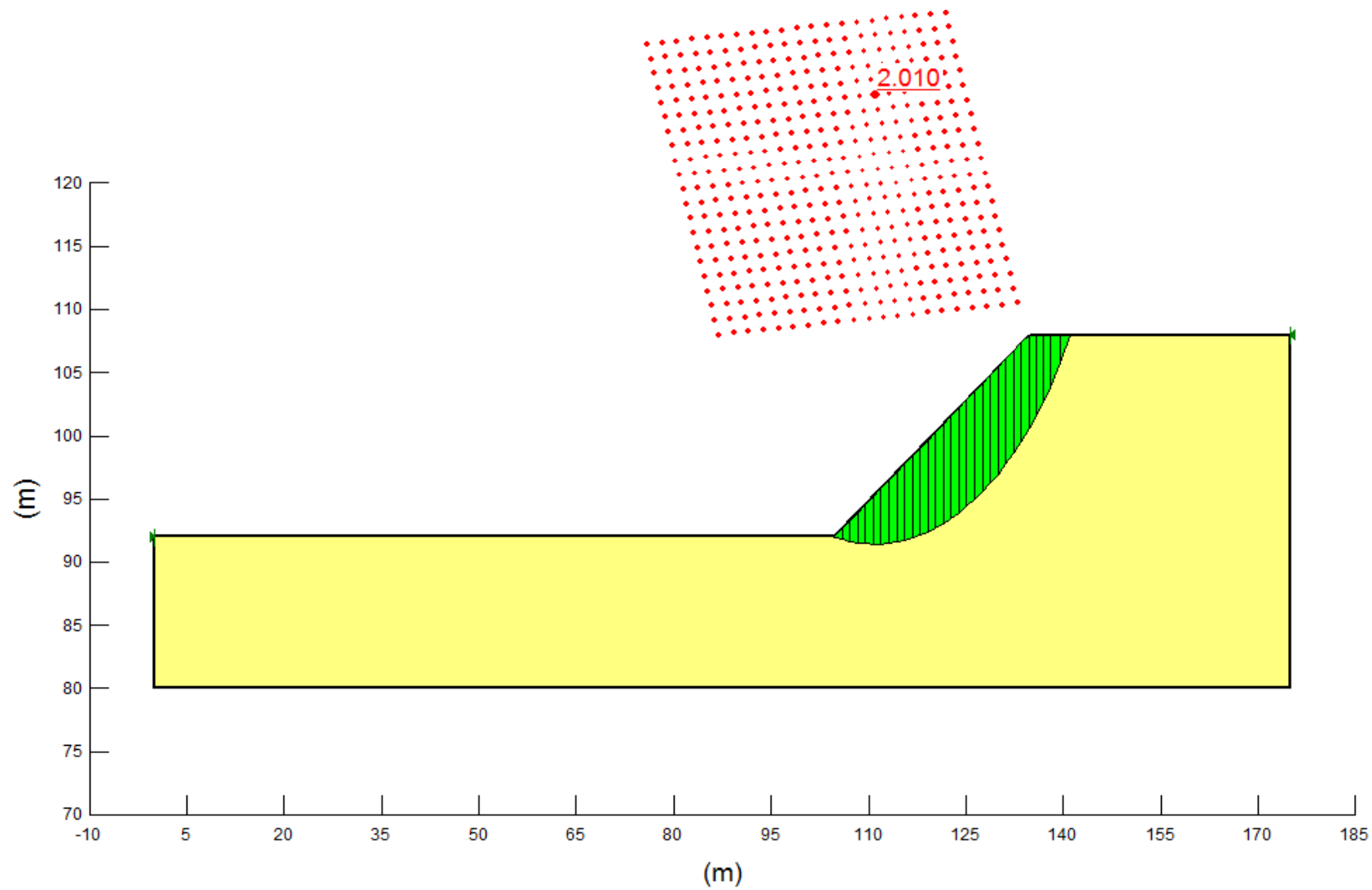
Profil C - C'



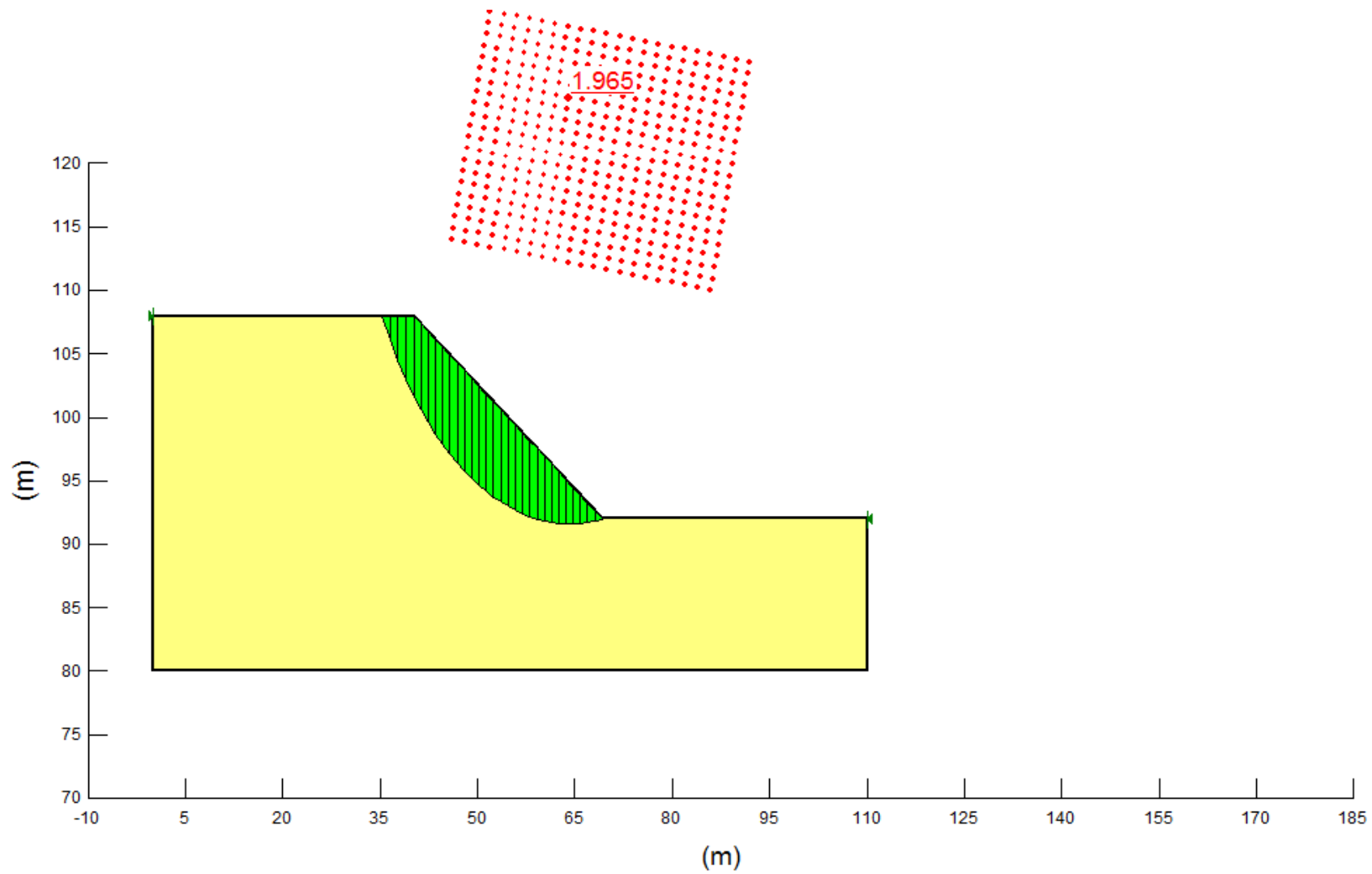
Profil D - D'



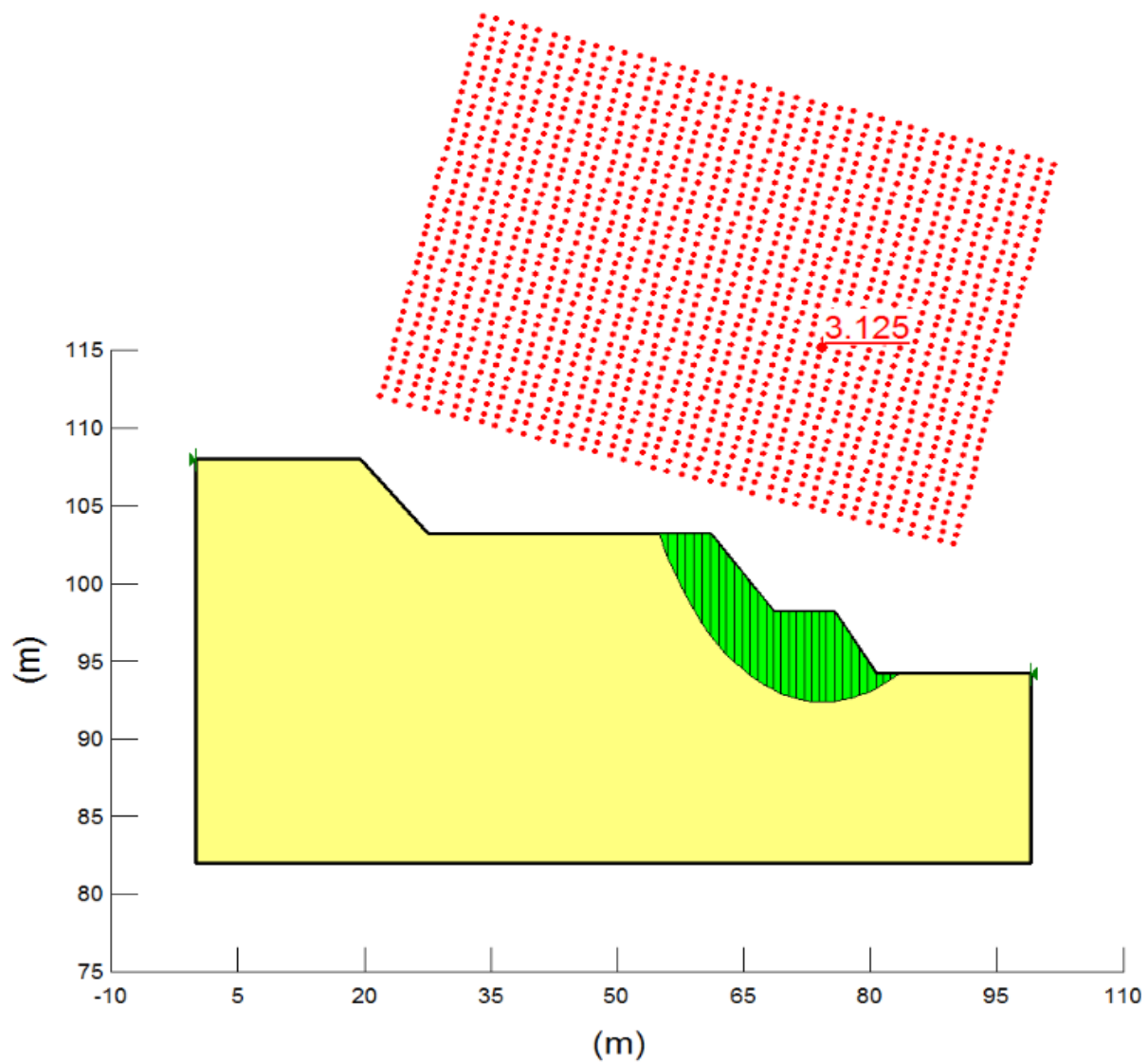
Prilog 2b. Radne kosine, profili C-C' i D-D', Mj: Hz 1:5000, V 1:1000



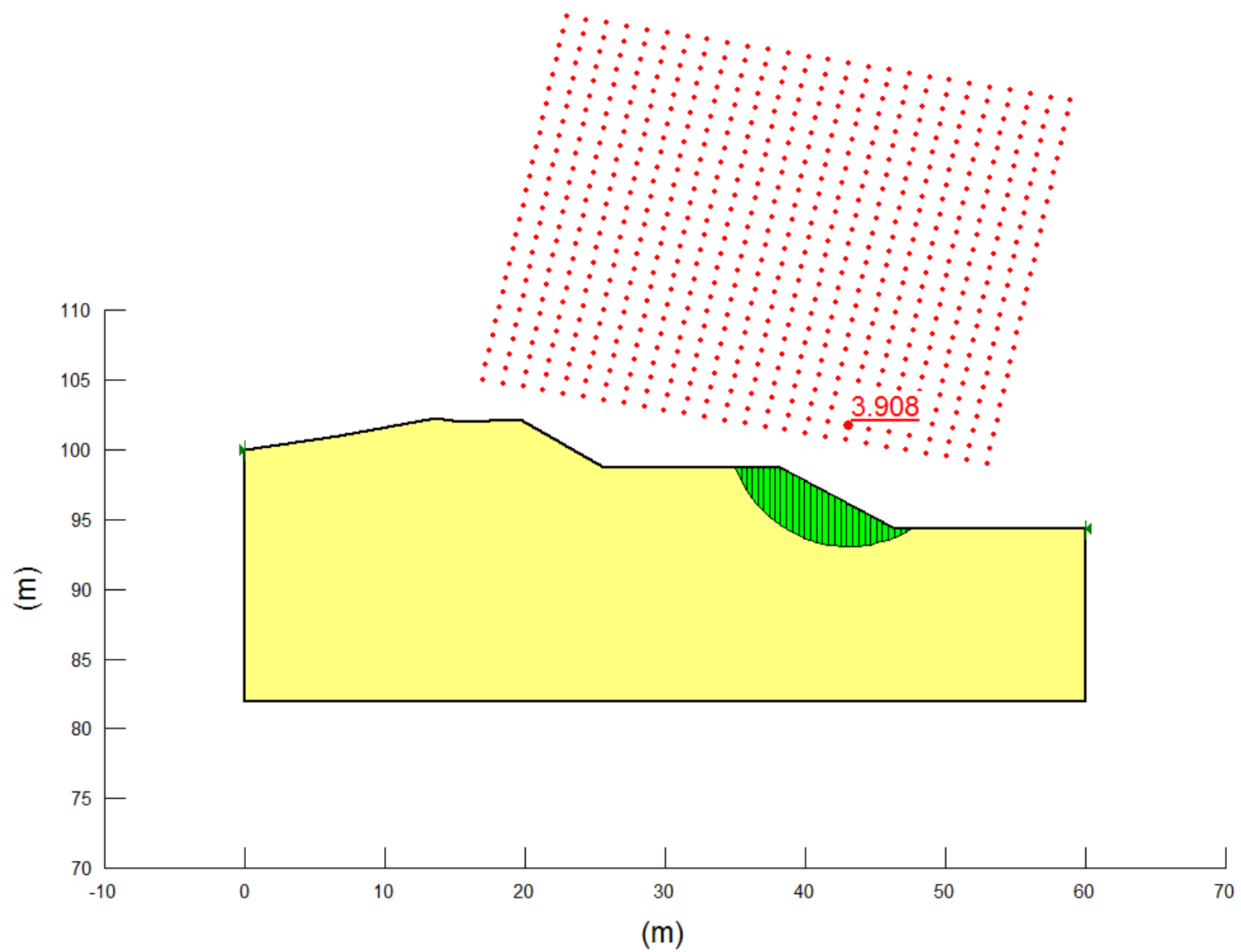
Prilog 3. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, završna kosina A – A', MJ Hz 1:1000; V 1:500



Prilog 4. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, završna kosina B – B'; MJ Hz 1:1000; V 1:500



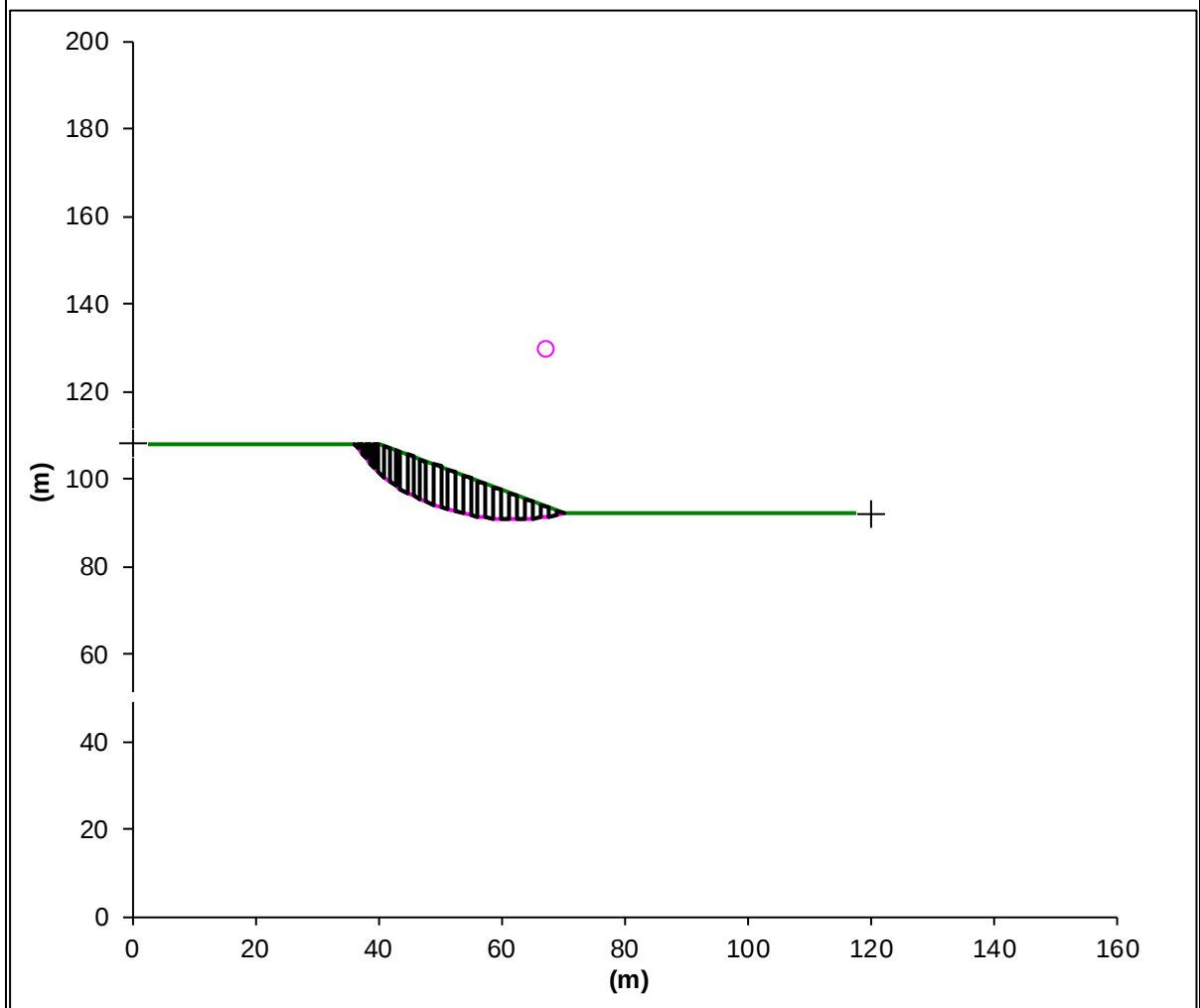
Prilog 5. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, radna kosina C – C'; MJ Hz 1:1000; V 1:500



Prilog 6. Prikaz faktora sigurnosti - GeoStudio/Slope, radna kosina D – D'; MJ Hz 1:500; V 1:500

Projekt Analiza stabilnosti završne kosine glinokopa "Grabovac"

Opis Profil A-A'



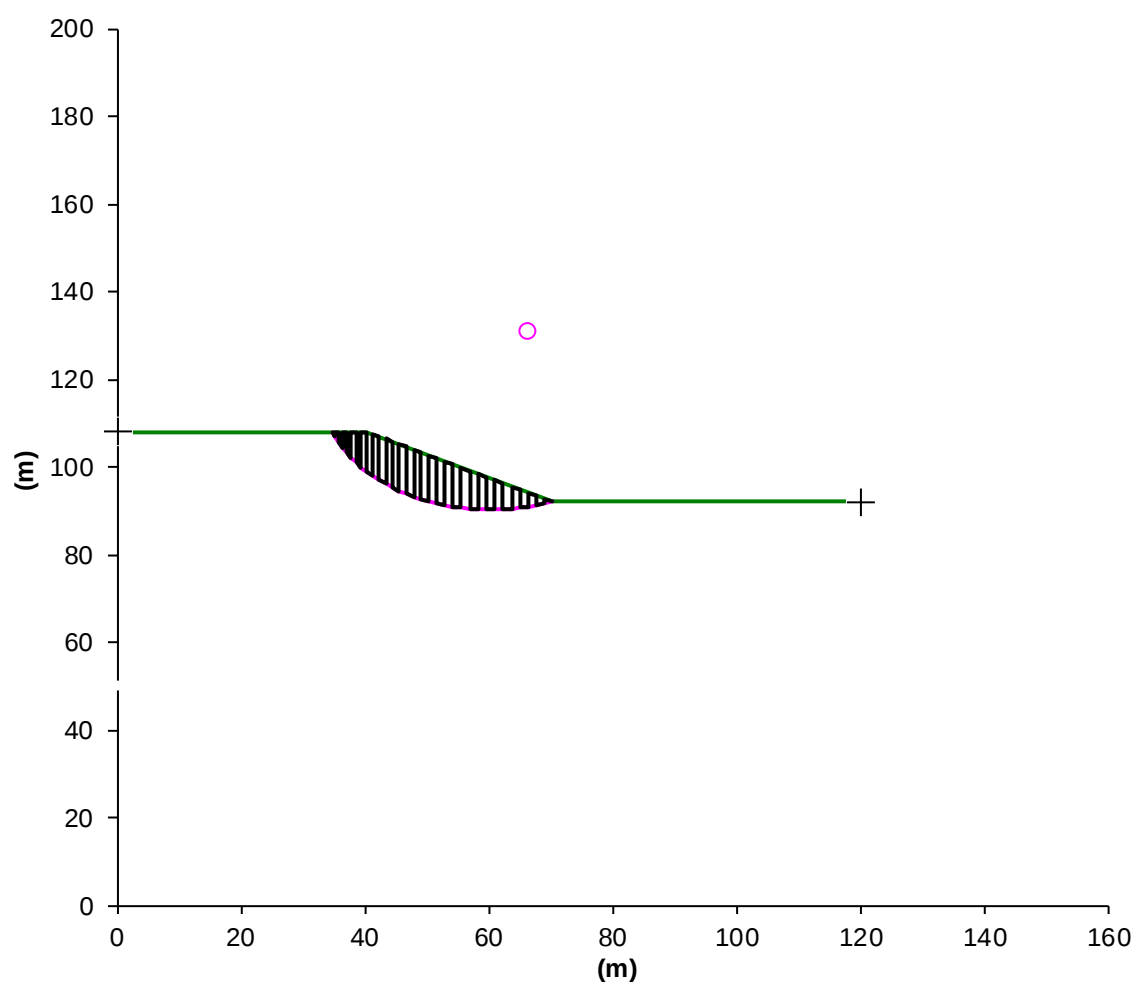
FAKTOR SIGURNOSTI 1,990

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

Visina	16 m	Duljina klizne plohe	41 m
Površina	219 m ²	Težina	4252 kN

Projekt Analiza stabilnosti završne kosine glinokopa "Grabovac"

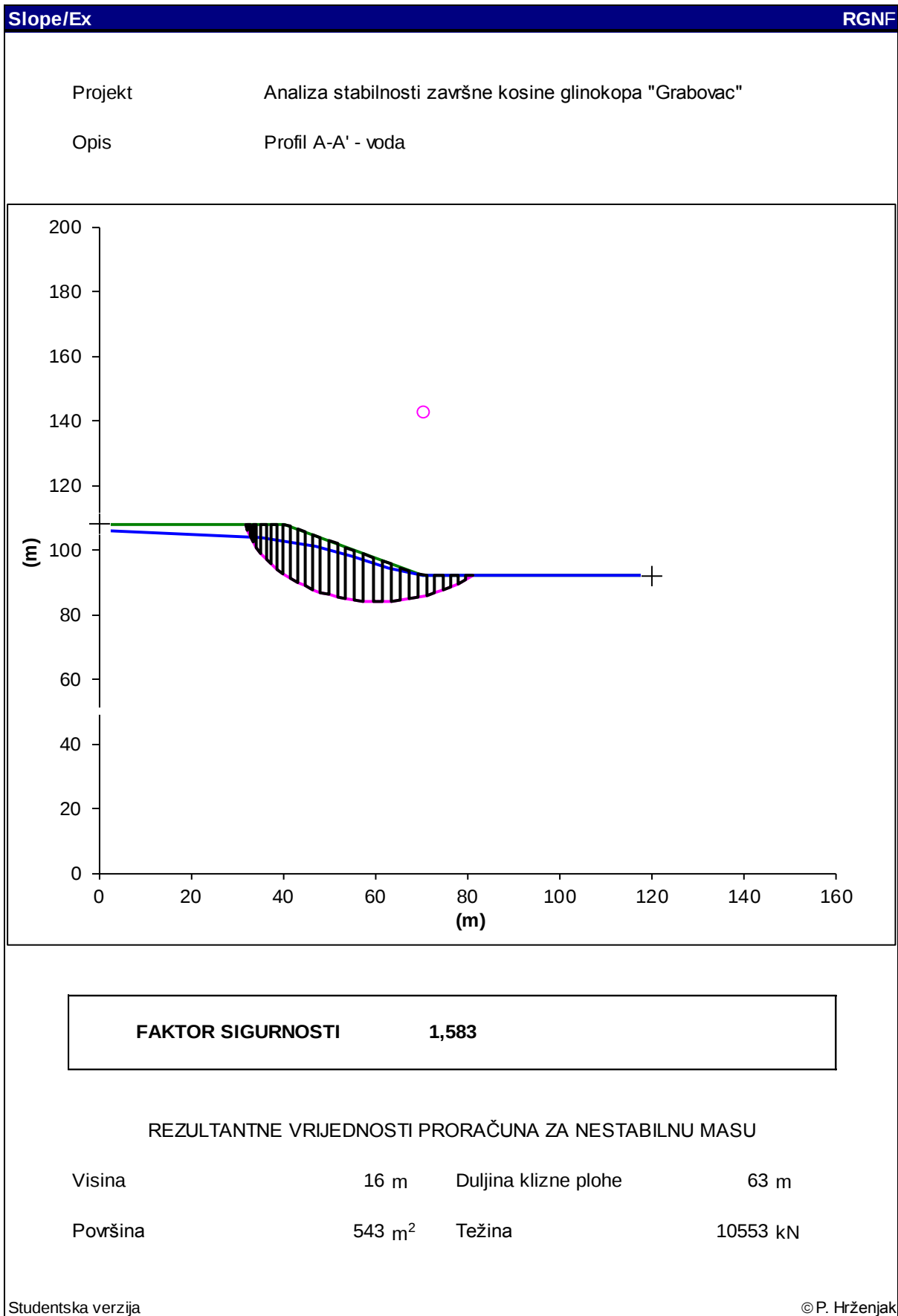
Opis Profil A-A' - seizmika



FAKTOR SIGURNOSTI 1,484

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

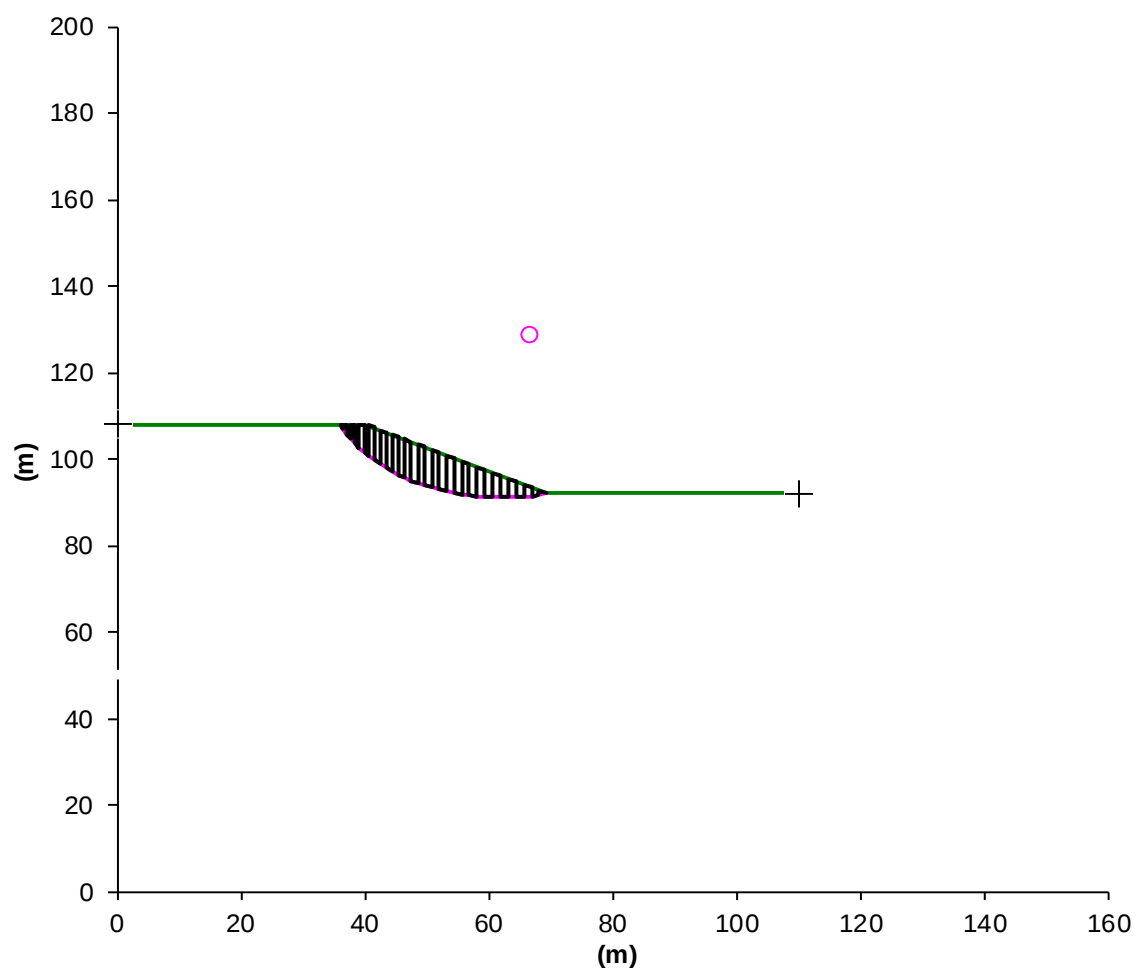
Visina	16 m	Duljina klizne plohe	43 m
Površina	261 m ²	Težina	5070 kN



Prilog 9. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil A – A'; podzemna voda

Projekt Analiza stabilnosti završne kosine glinokopa "Grabovac"

Opis Profil B-B'



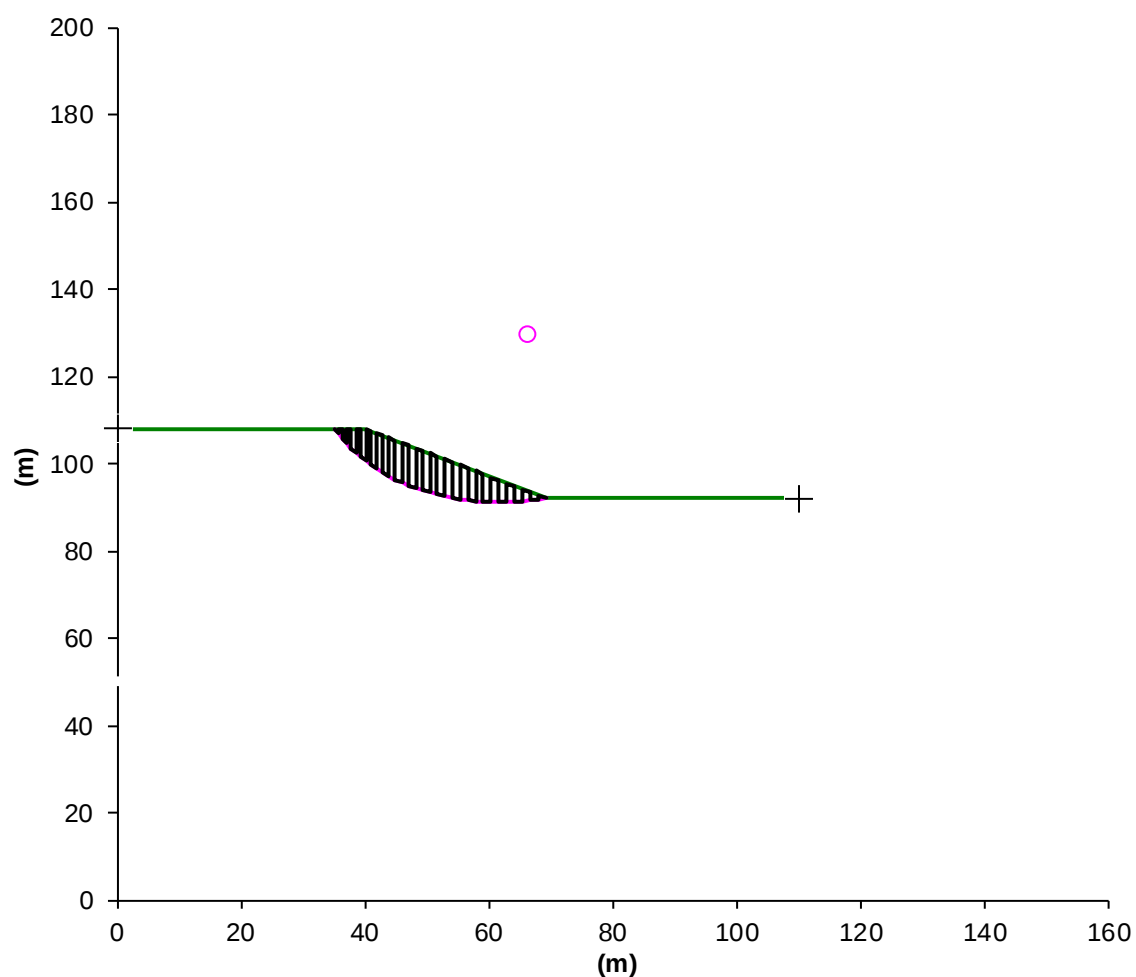
FAKTOR SIGURNOSTI 1,952

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

Visina	16 m	Duljina klizne plohe	40 m
Površina	205 m ²	Težina	3984 kN

Projekt Analiza stabilnosti završne kosine glinokopa "Grabovac"

Opis Profil B-B' - seizmika



FAKTOR SIGURNOSTI 1,454

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

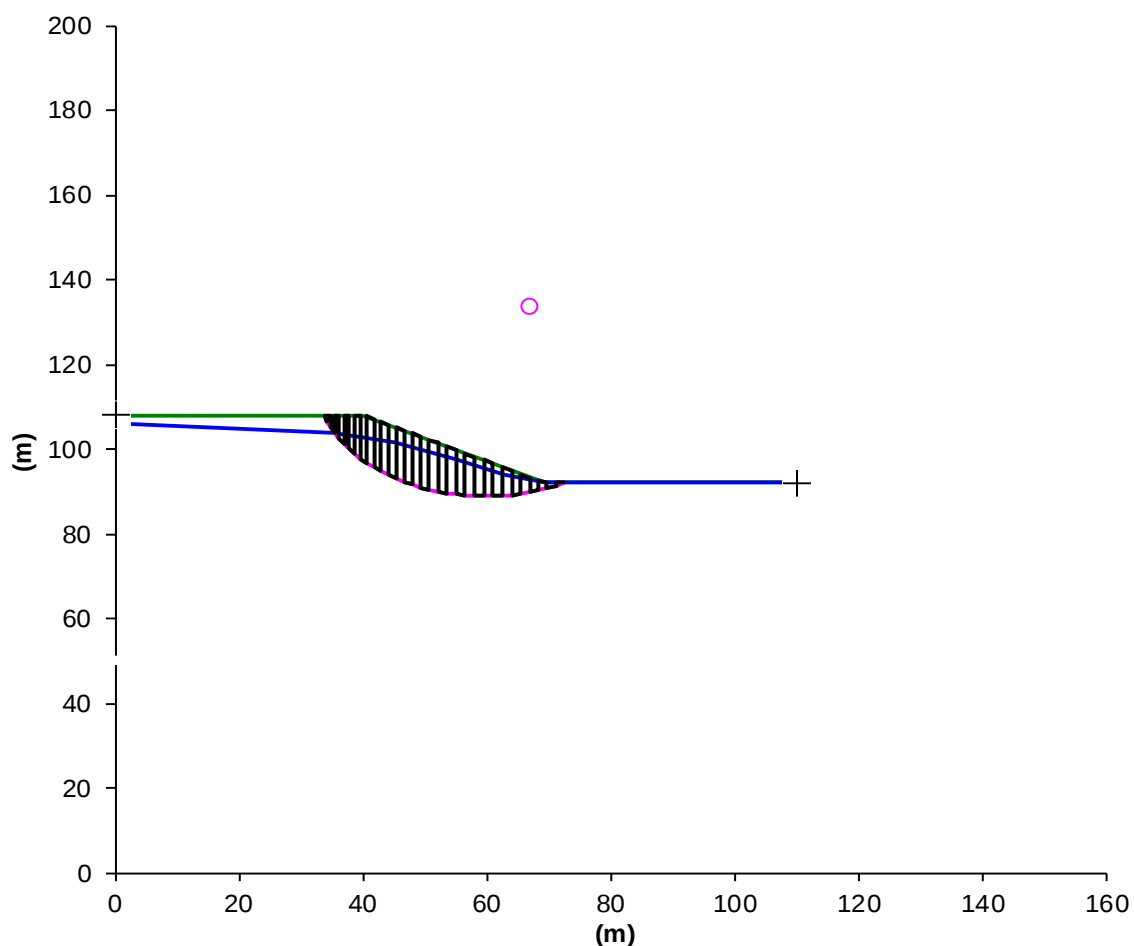
Visina	16 m	Duljina klizne plohe	41 m
Površina	213 m ²	Težina	4145 kN

Projekt

Analiza stabilnosti završne kosine glinokopa "Grabovac"

Opis

Profil B-B' - Voda

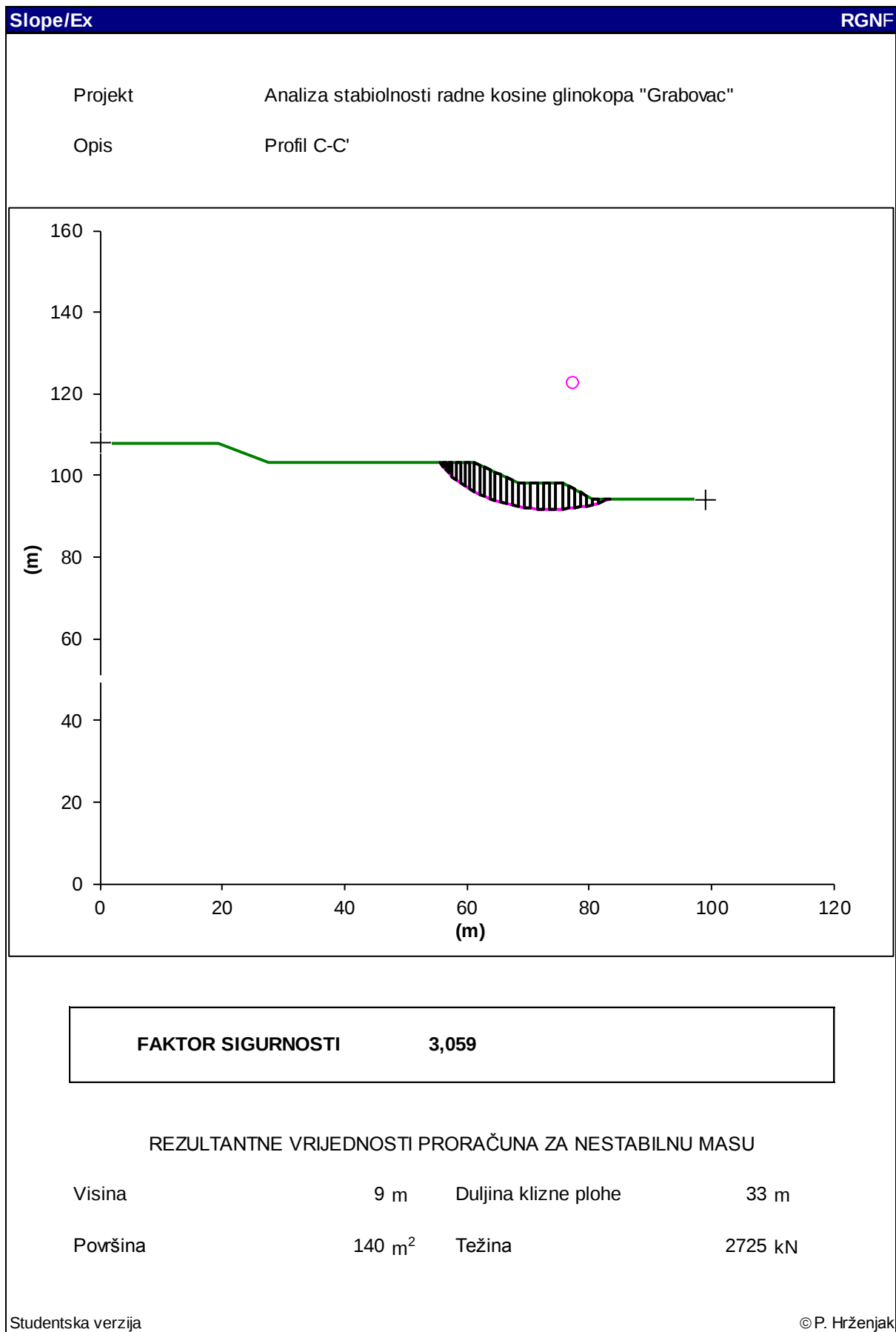


FAKTOR SIGURNOSTI

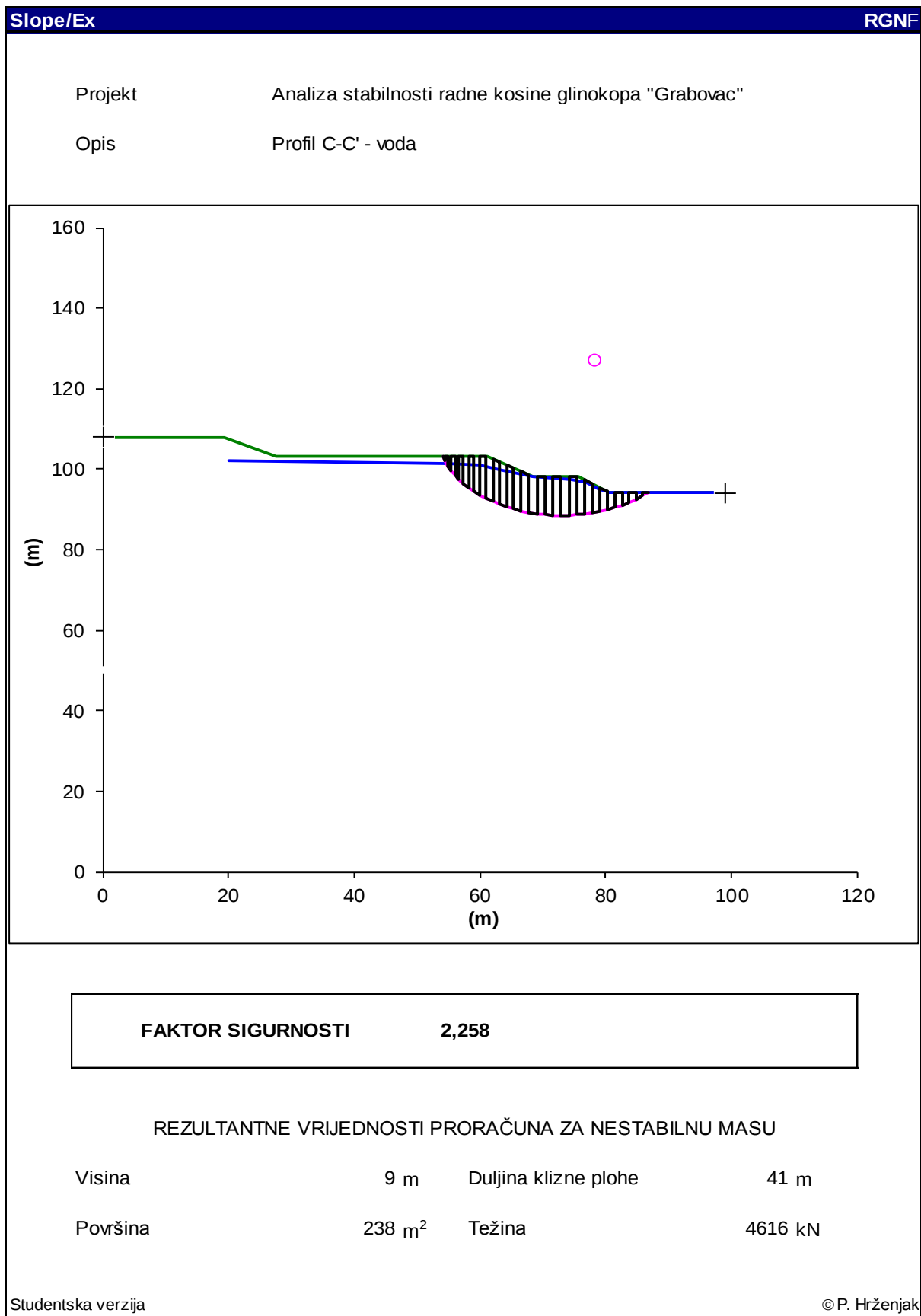
1,501

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

Visina	16 m	Duljina klizne plohe	48 m
Površina	309 m ²	Težina	6006 kN



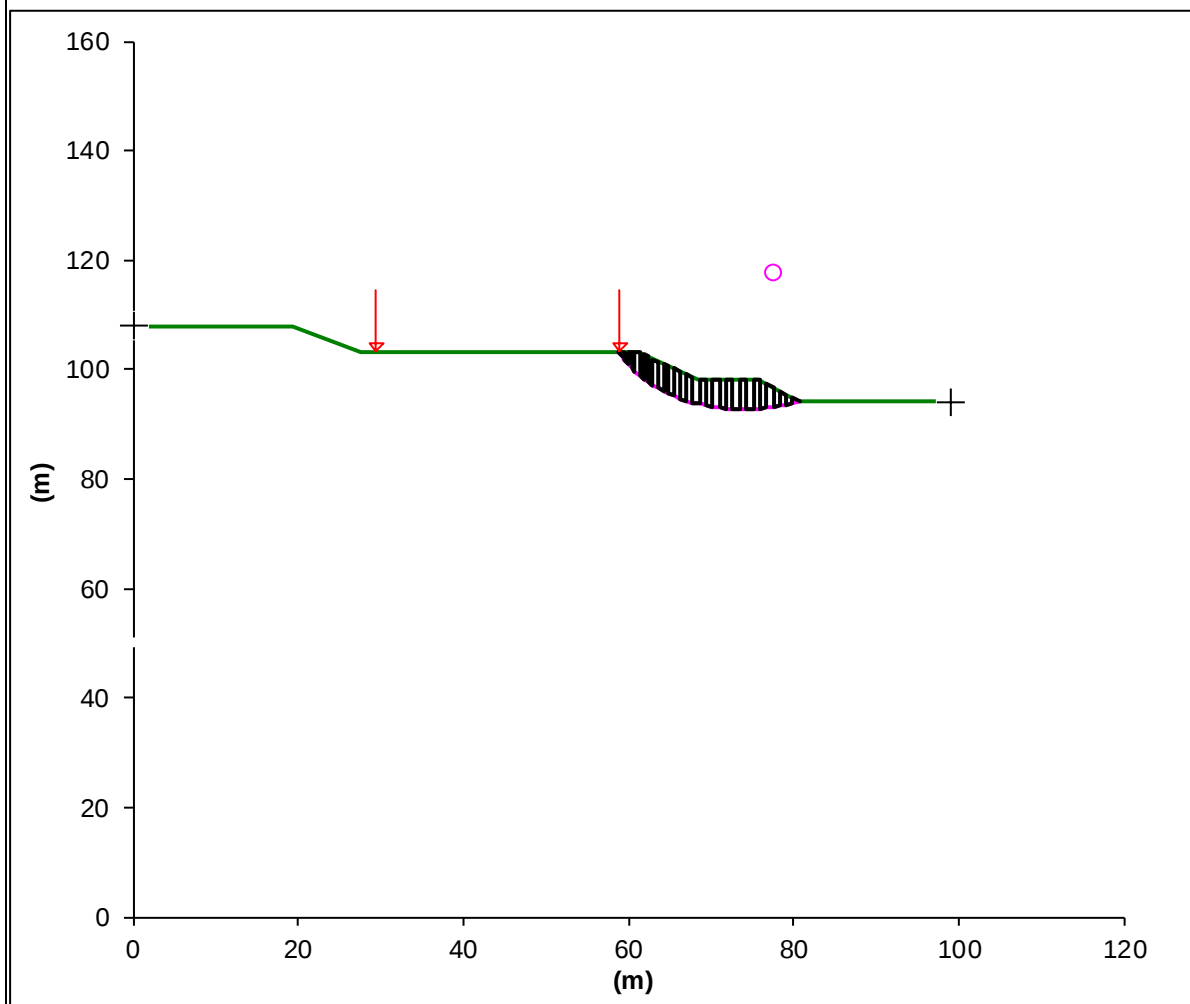
Prilog 6. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'



Prilog 7. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'; podzemna voda

Projekt Analiza stabilnosti radne kosine glinokopa "Grabovac"

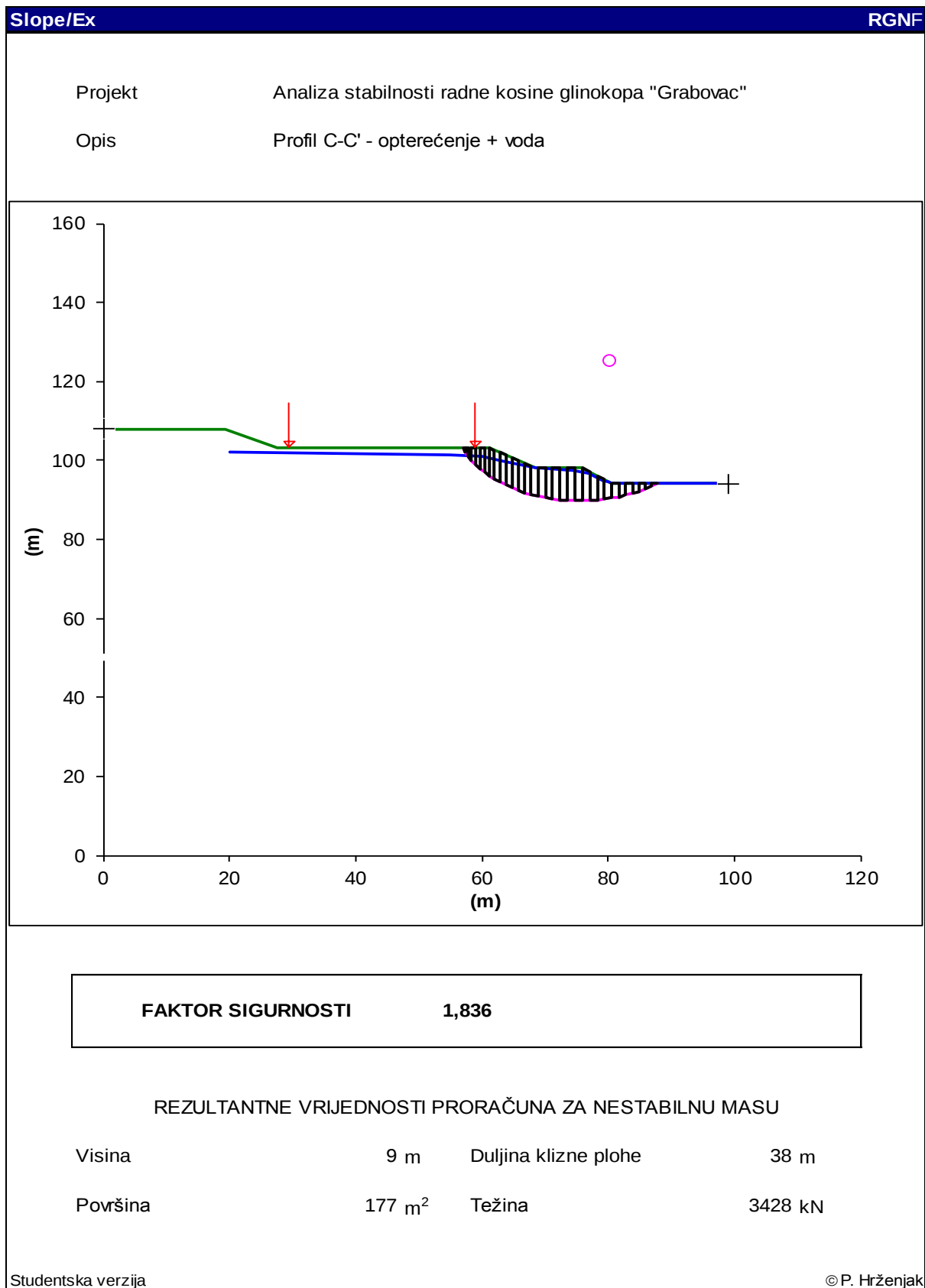
Opis Profil C-C' - opterećenje



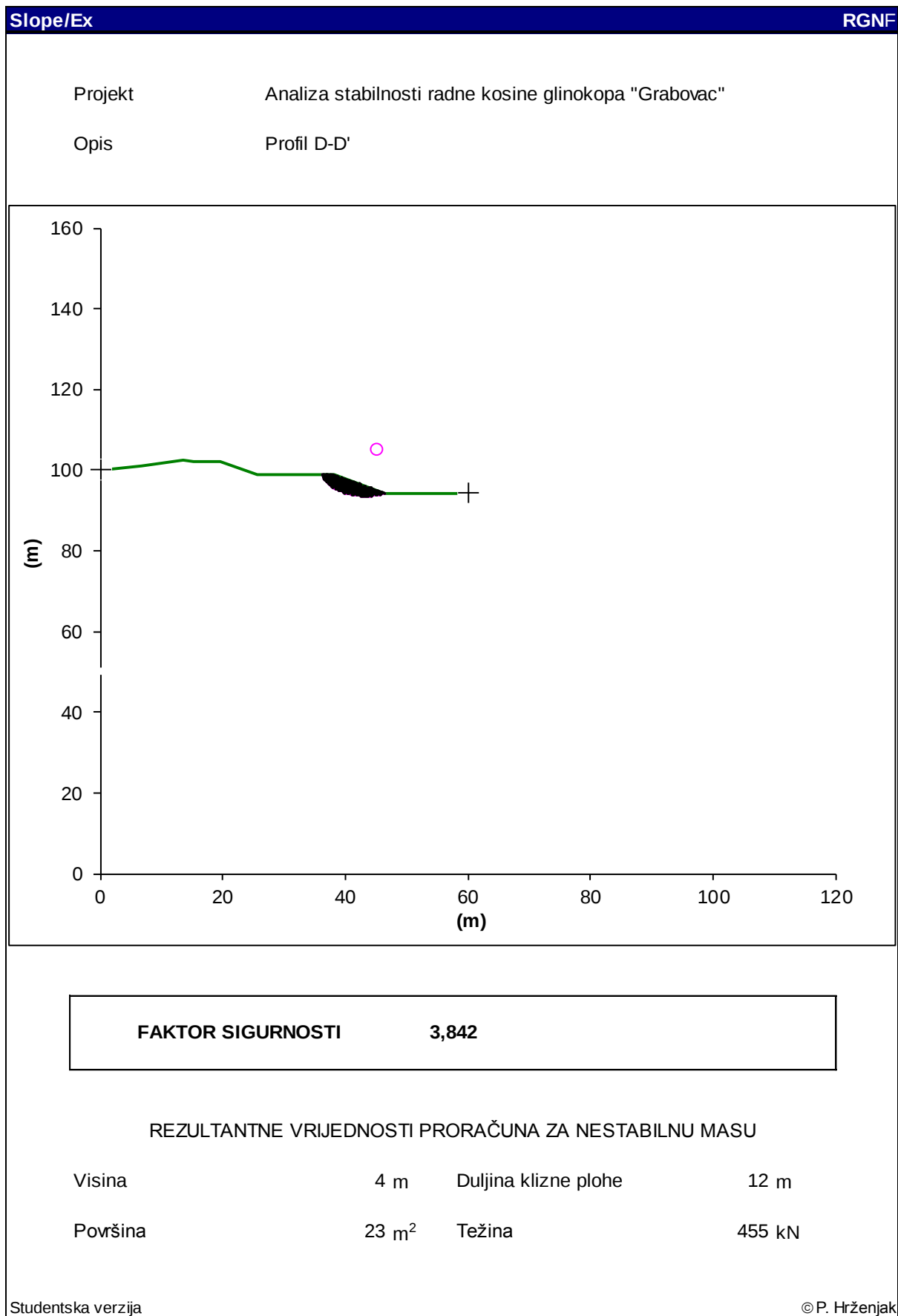
FAKTOR SIGURNOSTI 2,093

REZULTANTNE VRIJEDNOSTI PRORAČUNA ZA NESTABILNU MASU

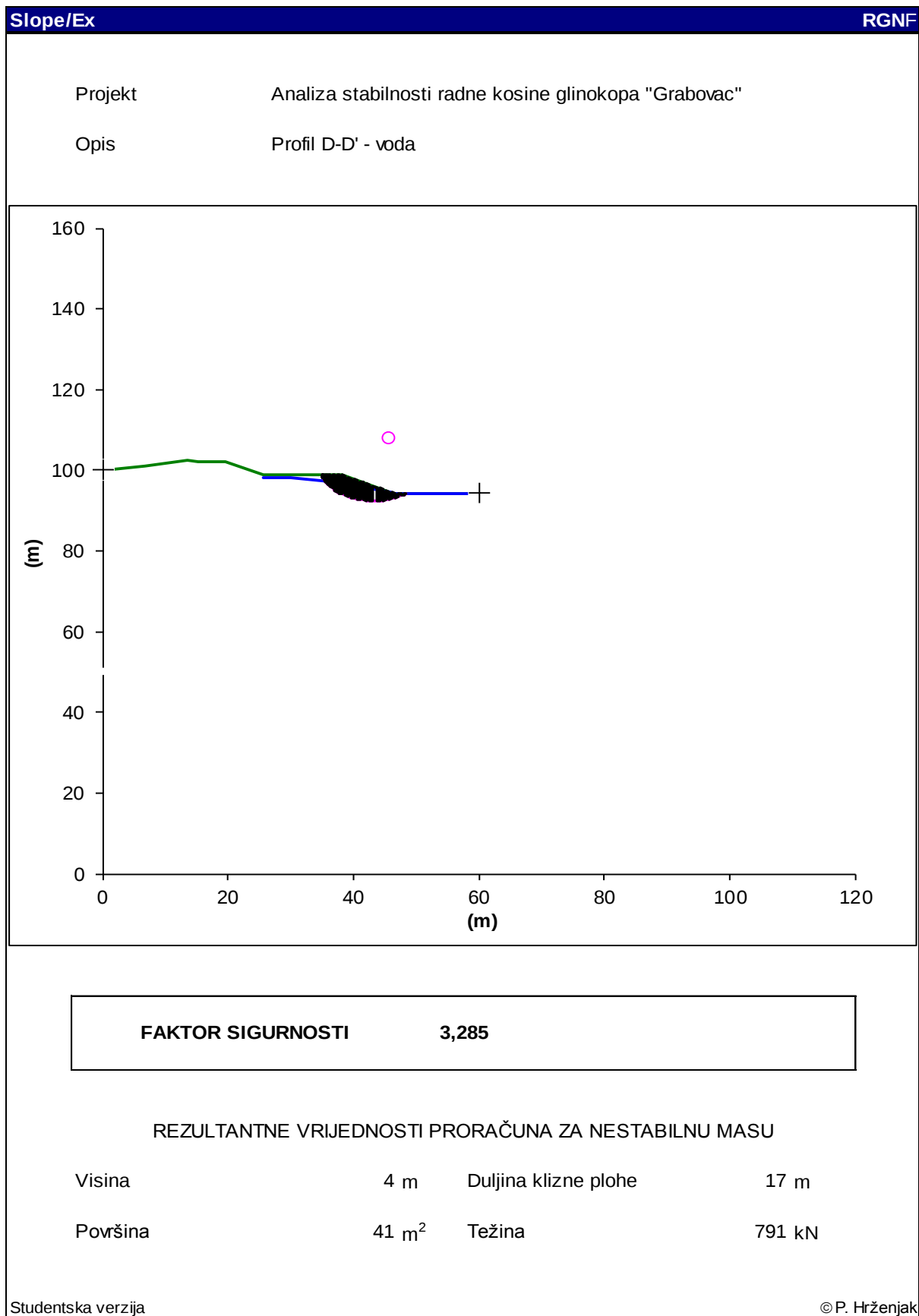
Visina	9 m	Duljina klizne plohe	26 m
Površina	92 m ²	Težina	1778 kN



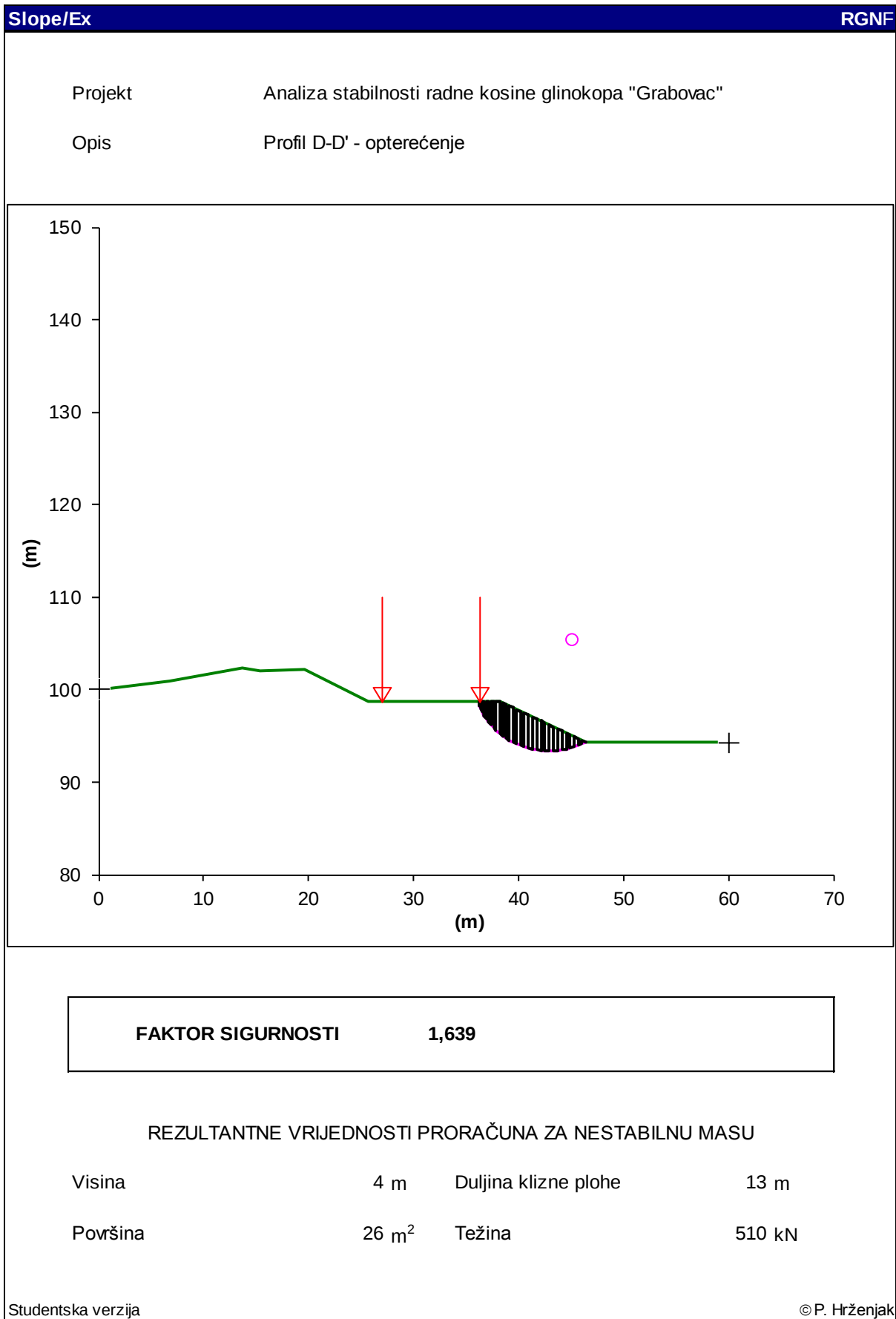
Prilog 16. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil C – C'; opterećenje i podzemna voda



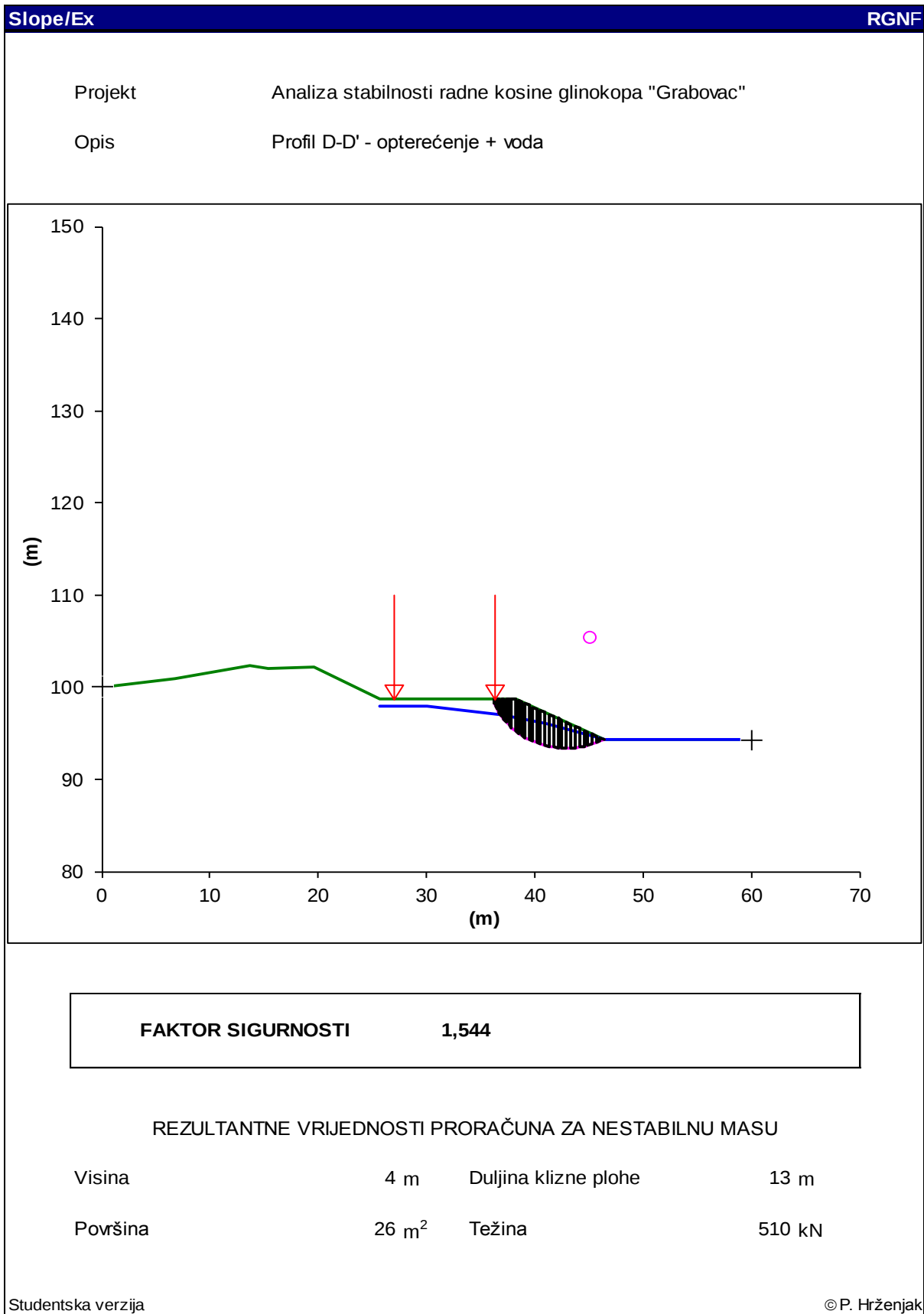
Prilog 17. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'



Prilog 18. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; podzemna voda



Prilog 19. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; opterećenje



Prilog 20. Rezultantne vrijednosti proračuna za nestabilnu masu – profil D – D'; podzemna voda i opterećenje

