

ANALIZA STABILNOSTI SIDRENIH STIJENSKIH KOSINA PREMA EUROKODU 7

STABILITY ANALYSIS OF ANCHORED ROCK SLOPES ACCORDING TO EUROCODE 7

Jasmin Jug ^{1*}, Miljenko Špiranec ², Stjepan Strelec ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Republika Hrvatska

² SPP d.o.o., Trstenjakova 3, 42000 Varaždin, Republika Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: jasmin.jug@gfv.hr

Sažetak: Osiguravanje stabilnosti stijenske kosine tijekom i nakon iskopa propisivanjem dugoročnih zaštitnih mjera jedna je od čestih zadaća praktičnog geotehničkog inženjerstva i mehanike stijena. U radu je prikazan primjer određivanja optimalnih parametara čvrstoće karbonatne stijenske mase i procjene stabilnosti sidrene stijenske kosine. Kriterij sloma stijenske mase definiran je generaliziranim Hoek-Brownovim kriterijem čvrstoće, pri čemu su korišteni rezultati geotehničkih istražnih radova, kojima je stijenska masa podijeljena u pet različitih geotehničkih zona. Analiza globalne stabilnosti kosine formirane iskopom zasjeka visine do 25 metara provedena je prema pravilima Eurokoda 7, projektni pristup 3. Kod procjene stabilnosti odabrana je mjerodavna klizna ploha. Provedena je analiza nestabilnog bloka za slučaj globalnog sloma i ravninskog klizanja po diskontinuitetu. Pretpostavljeno je pružanje diskontinuiteta u smjeru iskopa. U cilju usporedbe dobivenih rezultata, faktori sigurnosti proračunavani su sa i bez seizmičkih potresnih djelovanja te je provedena kontrola primjenom komercijalnog računalnog programa za analizu stabilnosti kosina.

Cljučne riječi: Stabilnost stijenskih kosina, Geotehnička sidra, Eurokod 7, Seizmička djelovanja, Faktor konzervativnosti.

Abstract: Ensuring the rock slope stability during and after excavation by prescribing long-term protection measures is one of the frequent tasks of practical geotechnical engineering and rock mechanics. The paper presents an example of determining optimal carbonate rock mass strength parameters and assessing the stability of the anchored rock slope. The rock mass failure criterion is defined by the generalized Hoek-Brown's strength criteria, using the results of geotechnical investigations, where the rock mass is divided into five different geotechnical zones. Analysis of global slope stability formed by excavation the cut height up to 25 meters is carried out according to the rules of Eurocode 7, project approach third. For the stability estimation the relevant sliding surface was selected. An analysis of the unstable block in the case of global sloping and flat sliding was performed on discontinuity. It is assumed that discontinuity is provided in the direction of excavation. In order to compare the obtained results, the safety factors were calculated with and without seismic earthquake effects and control was carried out using a commercial computer program for slope stability analysis.

Keywords: Rock slope stability, Geotechnical anchors, Eurocode 7, Seismic activities, Factor of conservatism.

Received: 08.05.2017 / Accepted: 27.06.2017

Published online: 21.07.2017

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Okolišem se smatra cijela čovjekova okolina, kako živa i neživa priroda, tako i čovjekove tvorevine. Očuvanje okoliša nije potrebno samo na mjestima gdje dolazi do onečišćenja, već i na mjestima gdje se zbog prirodnih pojava (potresi, klizišta) ili ljudskih aktivnosti, kao što je to primjer u ovom radu, naruši izgled i/ili stabilnost prirodnog terena.

Za potrebe izgradnje Centra zdravstvenog turizma u Segetu Donjem bilo je potrebno izvesti građevinsku jamu iskopom zasjeka visine do 25 metara. Da bi se prikupili relevantni podaci potrebni za projektiranje, na predmetnoj lokaciji izvedeni su geotehničko-geofizički istražni radovi, kojima je utvrđeno da je istražna lokacija geološki izgrađena od karbonatne stijenske mase.

Kako bi projektirana stijenska kosina izvedena iskopom bila sigurna, trebalo je analizom dokazati njezinu stabilnost i propisati dugoročne zaštitne mjere, u skladu s propisima Eurokoda 7. Analize su provedene korištenjem

parametara čvrstoće karbonatne stijenske mase, koji su usvojeni na temelju rezultata in situ istraživanja, uz djelovanje stabilizacijske sile u vidu geotehničkih sidara.

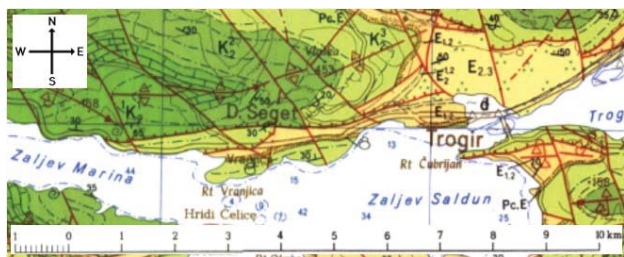
Konačno rješenje zaštite iskopa određeno je temeljem rezultata provedenih istražnih radova, kojima je utvrđeno da postoji velika mogućnost pojave dominantnog diskontinuiteta, pa je kod proračuna stabilnosti kosine pretpostavljen nepovoljni diskontinuitet kroz razlomljene zone stijenske mase po kojem može doći do ravninskog klizanja.

2. ISTRAŽNI RADOVI

2.1. Opća geologija istraživanog područja

Prije samog izvođenja terenskih istražnih radova proučena je opća geološka situacija na istražnoj lokaciji, te je prema osnovnoj geološkoj karti, list K 33-21 Split

(Marinčić et al. 1971), utvrđeno da uže područje zahvata pripada masivnim krednim naslagama (K_2^2 , K_2^3), a koje odgovaraju vapnencima s rijetkim prosljocima dolomita, zatim gromadastim i uslojenim vapnencima te vapnenačkim dolomitima (Slika 1).



Slika 1. Isječak osnovne geološke karte, list K 33-21 Split (Marinčić et al. 1971)

2.2. Geofizički istražni radovi

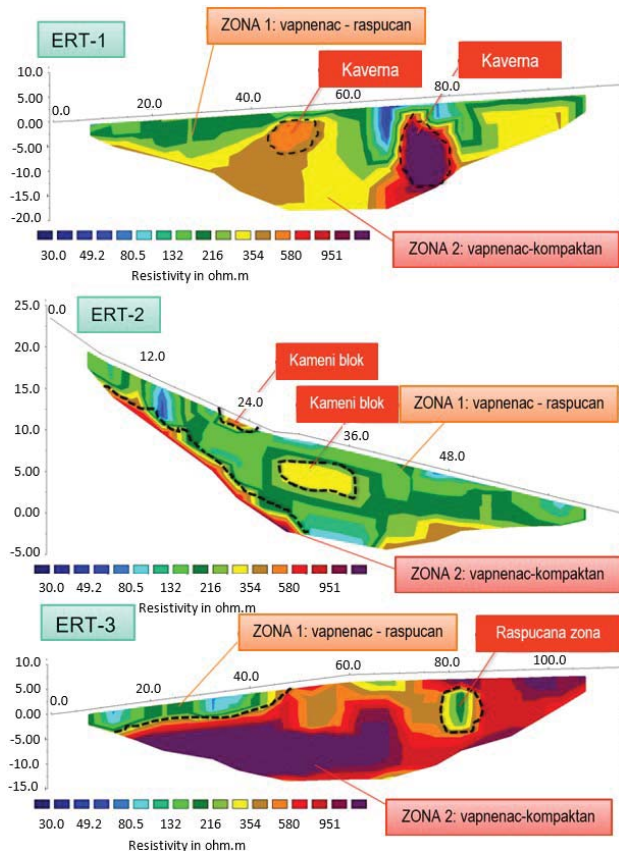
Geotehnički istražni radovi uglavnom su izvedeni primjenom geofizičkih metoda ispitivanja. Prema pravilima Eurokoda 7 (HRN EN 1997-2:2012 hr) izrađen je program istraživanja prema kojem su izvedena tri geofizička presjeka metodom geoelektrične tomografije (ERT) (Slika 2), tri presjeka metodom višekanalne analize površinskih valova (Slika 3), te četiri presjeka metodom georadara.

Na temelju iskustvenih podataka autora ovog rada, a za slične geoelektrične sredine, uz podatke iz literature o specifičnom električnom otporu nekih materijala, interpretacijom su generalno utvrđene dvije različite zone otpornosti stijenskog materijala. Tako se u prvoj zoni nalazi materijal manjih električnih otpornosti (80–350 Ωm) koji se opisuje kao raspucani vapnenac, a u drugoj zoni materijal većih otpornosti (350–1000 Ωm) opisan kao čvrsti kompaktni vapnenac (Slika 2).

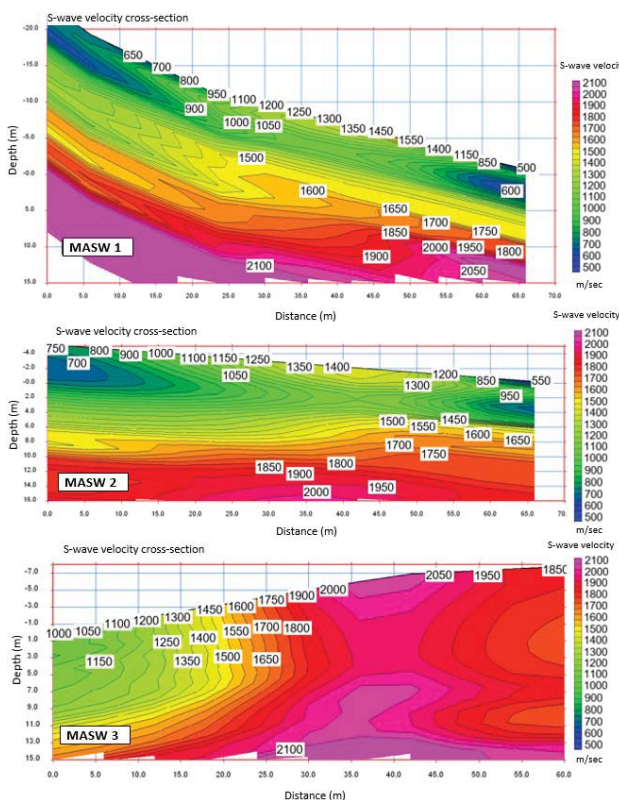
Seizmičkim istraživanjem metodom višekanalne analize površinskih valova (MASW) određene su brzine posmičnih valova v_s po dubini istraživanog temeljnog tla na dvodimenzionalnim presjecima prikazanim na Slici 3.

2.3. In situ geotehnička istraživanja

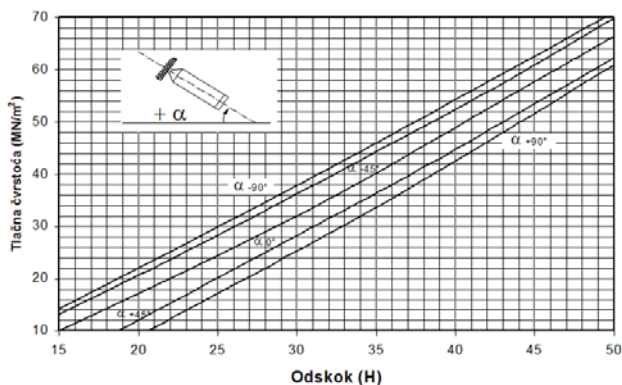
Osim geofizičkih istražnih radova, na izdancima stijene izvedena su ispitivanja Schmidtovim čekićem u pravcu okomitom na zidove stijene, prema preporukama Međunarodnog društva za Mehaniku stijena (ISRM 2007). Srednja vrijednost odskoka Schmidtova čekića R iskorištena je za određivanje čvrstoće stijenki diskontinuiteta i Youngova modula elastičnosti stijene E . Rezultati dobiveni pomoću korelacijskih dijagrama na Slikama 4 i 5 za odklon čekića $\alpha = 0^\circ$ prikazani su u Tablici 1.



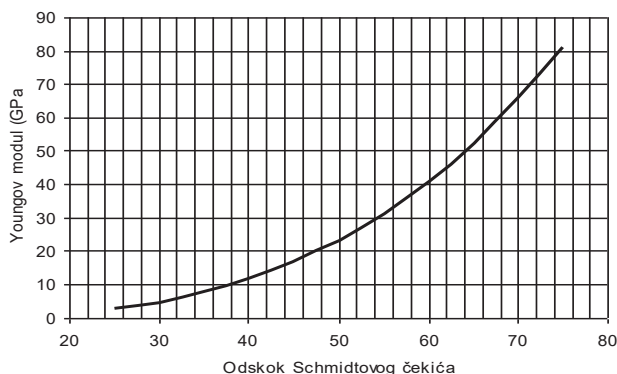
Slika 2. Rezultati geoelektrične tomografije (ERT)



Slika 3. Brzine posmičnih valova v_s po dubini ispitivane stijenske mase



Slika 4. Korelacijski dijagram tlačne čvrstoće prema vrijednostima odskoka Schmidtovog čekića



Slika 5. Korelacijski dijagram Youngovog modula prema vrijednostima odskoka Schmidtovog čekića

Tablica 1. Rezultati ispitivanja izdanaka stijene Schmidtovim čekićem

VRIJEDNOST ODSKOKA R [-]	JEDNOOSNA ČVRSTOĆA σ_c [MPa]	YOUNGOV MODUL E [GPa]
49	66	21
42	52	14
39	45	11

3. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE STIJENE NA ISTRAŽNOJ LOKACIJI

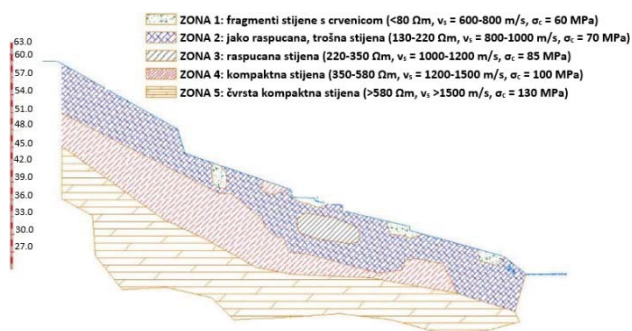
Na osnovi svih provedenih istražnih radova i svih prikupljenih informacija stijenska masa na istražnoj lokaciji podijeljena je u pet različitih geotehničkih zona. Detaljan opis temeljne stijenske mase dat je geotehničkim profilom (Slika 6), te opisno u Tablici 2. Istražnim radovima nije zabilježena pojava podzemne vode.

Sukladno rezultatu seizmičkih geofizičkih ispitivanja, odnosno izmjerenih brzina sekundarnih (posmičnih) valova v_s , napravljena je klasifikacija tla prema Eurokodu 8 (HRN EN 1998-1:2011), te temeljno tlo odgovara "A" kategoriji tla prema stupnju seizmičnosti, $v_s > 800$ m/s.

Prema karti potresnih područja Republike Hrvatske, koja je sastavni dio Nacionalnog dodatka za niz normi HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, određeno je vršno ubrzanje za tip tla A, a za istražni prostor iznosi: $a_{gR} = 0,22g$ (povratni period 475 godina), kako je prikazano na Slici 7.

Tablica 2. Detaljan opis temeljne stijenske mase podijeljene u pet različitih geotehničkih zona

GEOT. ZONA	NAZIV	OPIS
1	Fragmenti stijene sa ispunom	Sloj se pojavljuje lokalno u fragmentima, debljina sloja 1,0 do 5,0 m. Električna otpornost u granicama 45-80 Ω m, a brzina posmičnih valova $v_s = 600-800$ m/s. Posmični modul G_0 dobiven na osnovi brzine posmičnih valova iznosi oko 790 000 kN/m ² . Geološki indeks čvrstoće GSI = 20, konstanta materijala $m_i = 7$, a faktor poremećaja stijene zbog miniranja D = 1. Nosivost ovog sloja iznosi oko 590 kN/m ² .
2	Jako raspucana, trošna stijena	Debljina sloja 7,0 do 9,0 m unutar kojeg se mogu nalaziti izdanci kompaktnije stijene. Električna otpornost u granicama 130-220 Ω m, a brzina $v_s = 800-1000$ m/s. Posmični modul G_0 iznosi oko 1 800 000 kN/m ² . Geološki indeks čvrstoće GSI = 30, konstanta materijala $m_i = 7$, a faktor D = 1. Nosivost ovog sloja iznosi oko 1200 kN/m ² .
3	Raspucana stijena	Debljina sloja 5,0 do 9,0 m unutar kojeg se mogu nalaziti izdanci kompaktnije stijene ili područja jače okršene stijene. Električna otpornost u granicama 220-350 Ω m, a brzina $v_s = 1000-1200$ m/s. Posmični modul G_0 iznosi oko 2 900 000 kN/m ² . Geološki indeks čvrstoće GSI = 35, konstanta materijala $m_i = 7$, a faktor D = 1. Nosivost ovog sloja iznosi oko 1800 kN/m ² .
4	Kompaktna stijena	Debljina sloja 2,0 do 10,0 m, a može se naći i na površini terena u obliku istake. Električna otpornost u granicama 350-580 Ω m, a brzina $v_s = 1200-1500$ m/s. Posmični modul G_0 iznosi oko 4 200 000 kN/m ² . GSI = 50, konstanta $m_i = 7$, a faktor D = 1. Nosivost ovog sloja iznosi oko 4000 kN/m ² .
5	Čvrsta kompaktna stijena	Debljina sloja veća od 5,0 m, a nalazi se na većim dubinama. Električna otpornost u granicama 580-950 Ω m, a brzina $v_s > 1500$ m/s. Modul G_0 iznosi oko 5 600 000 kN/m ² . GSI = 70, konstanta $m_i = 7$, a faktor D = 1. Nosivost ovog sloja iznosi oko 12 000 kN/m ² .



Slika 6. Karakteristični geotehnički profil stijenske mase na istražnoj lokaciji u Segetu Donjem (Špiranec et al. 2013)



Slika 7. Isječak karte potresnih područja Republike Hrvatske za povratni period 475 godina, područje Segeta Donjeg (Herak et al. 2011)

4. KRITERIJ SLOMA STIJENSKE MASE I PARAMETRI ČVRSTOĆE

Kako bi se odredile optimalne vrijednosti parametara čvrstoće karbonatne stijenske mase, korišten je kriterij sloma stijenske mase definiran generaliziranim Hoek-Brown-ovim kriterijem čvrstoće stijenske prikazan Izrazom 1 (Hoek et al. 2002).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

gdje su:

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća homogenog uzorka stijene, σ'_1 i σ'_3 – veće i manje efektivno glavno naprezanje, m_b , a , s – iskustveni parametri stijenske mase.

Reducirana vrijednost konstante materijala m_i je vrijednost m_b , a daje se Izrazom 2. Parametri s i a su konstante stijenske mase, a dobivaju se pomoću Izraza 3 i 4 (Hoek et al. 2002).

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D} \right)} \quad (2)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D} \right)} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4)$$

U Izrazima 2, 3 i 4 parametar D je faktor poremećenosti stijene, m_i je konstanta materijala ovisna o vrsti stijene, a GSI je geološki indeks čvrstoće stijenske mase.

Iskustveni parametri čvrstoće karbonatne stijenske mase na lokaciji u Segetu Donjem dobiveni proračunom generaliziranim Hoek-Brown-ovim kriterijem prikazani su u Tablici 3. Vrijednosti kohezija c i kutova unutarnjeg trenja ϕ dobivene su na temelju veze između maksimalnih i minimalnih vrijednosti glavnih naprezanja za Hoek-Brownov i ekvivalentni Mohr-Coulombov kriterij, koji se najviše koristi u geotehničkom inženjerstvu, pomoću računalnog programa RocLab (Rocscience Inc. 2005).

Tablica 3. Prikaz proračunatih parametara čvrstoće stijenske mase za pet različitih geotehničkih zona

GEOT. ZONA	PARAMETRI ČVRSTOĆE STIJENSKE MASE					
	m_b	s	a	σ_c [MPa]	c [kN/m ²]	ϕ [°]
1	0,023	$1,6 \times 10^{-6}$	0,544	60	5	25,0
2	0,047	$8,6 \times 10^{-6}$	0,522	70	77	25,0
3	0,067	$1,97 \times 10^{-5}$	0,516	85	106	29,9
4	0,197	0,0002	0,506	100	187	37,3
5	0,821	0,067	0,501	130	270	40,9

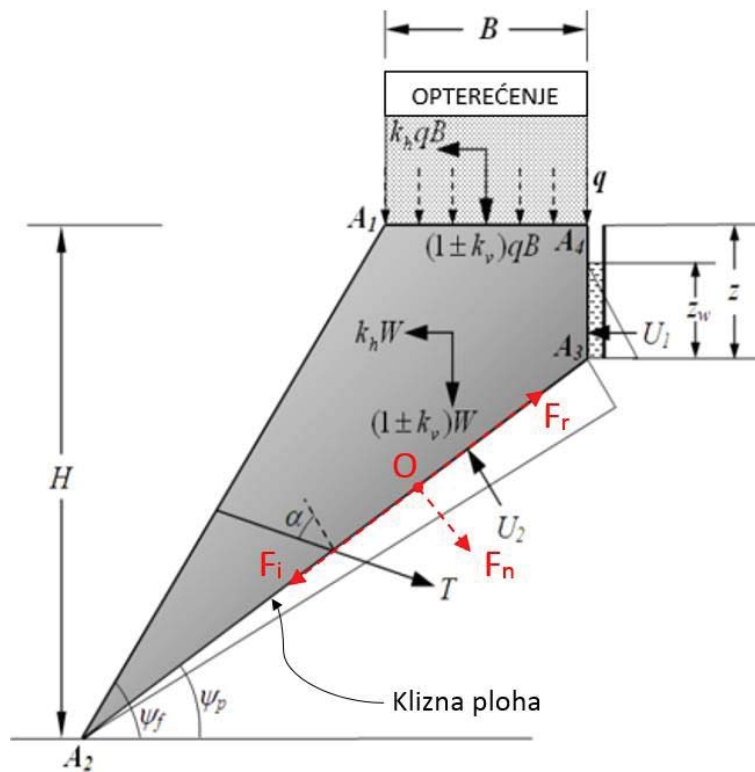
5. ANALIZA GLOBALNE STABILNOSTI KOSINE ISKOPA

Analiza stabilnosti provedena je u skladu sa Eurokodom 7, odnosno Hrvatskim normama HRN EN 1997-2:2012 i HRN EN 1997-2:2012/NA:2012, prema projektnom pristupu 3. U skladu s navedenim projektnim pristupom, korišteni su parcijalni koeficijenti $\gamma_c = 1,25$ i $\gamma_\phi = 1,25$, koji su utjecali na vrijednosti proračunatih parametara čvrstoće stijenske mase kako je prikazano u Tablici 4. Parcijalni koeficijenti su u Eurokodu 7 određeni tako da uvažavaju vjerojatnosti rizika od prekoračenja odgovarajućeg graničnog stanja.

Pomoću skice na Slici 8 postavljeni su izrazi za proračun ukupne vertikalne sile na plohu sloma F_n (Izraz 5) i ukupne sile koja prouzrokuje klizanje F_i (Izraz 6), dok je izraz za proračun faktora globalne stabilnosti kosine FS (Izraz 7) poznat otprije (Hoek & Bray 1981).

Tablica 4. Parametri čvrstoće stijenske mase korigirani s parcijalnim koeficijentima za potrebe analize stabilnosti stijenske kosine prema Eurokodu 7

G. ZONA	c [kN/m ²]	ϕ [°]	c_d [kN/m ²]	ϕ_d [°]
1	5	25,0	4	20
2	77	25,0	60	20
3	106	29,9	85	25
4	187	37,3	150	31
5	270	40,9	215	35
DISKONTINUITET	0	30	0	25



Slika 8. Mehanizam sloma stijenske kosine koja je pod djelovanjem opterećenja, vlastite težine, vlačne pukotine, potresa i stabilizacijske sile

$$F_n = (W + q \cdot B) \cdot \{(1 \pm k_v) \cdot \cos \psi_p - k_h \cdot \sin \psi_p\} - U_1 \cdot \sin \psi_p - U_2 + \sum_{i=1}^n T_i \cdot \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$F_i = (W + q \cdot B) \cdot \{(1 \pm k_v) \cdot \sin \psi_p + k_h \cdot \cos \psi_p\} + U_1 \cdot \cos \psi_p - \sum_{i=1}^n T_i \cdot \sin \alpha_i \quad (6)$$

$$FS = \frac{F_r}{F_i} = \frac{c \cdot A + F_n \cdot \tan \phi}{F_i} \quad (7)$$

gdje su:

- F_r – sila otpora klizanju, [kN];
- τ – posmična čvrstoća plohe sloma, [kN/m²];
- c – karakteristična kohezija diskontinuiteta (plohe sloma), [kN/m²];
- ϕ – karakteristični kut trenja diskontinuiteta (plohe sloma), [°];
- σ_n – vertikalno naprezanje na plohu sloma, [kN/m²];
- F_n – vertikalna sila na plohu sloma, [kN];
- A – površina plohe sloma, [m²];
- Ψ_p – kut nagiba plohe sloma, [°];
- Ψ_f – kut nagiba kosine, [°];
- F_i – sila koja uzrokuje klizanje, [kN];
- W – težina nestabilnog bloka, [kN];
- V – volumen nestabilnog bloka, [m³];
- q – vanjsko opterećenje, [kN/m²];
- k_h, k_v – horizontalni i vertikalni seizmički koeficijent;
- z – dubina vlačne pukotine, [m];
- z_w – dubina vode u vlačnoj pukotini, [m];
- U_1 – tlak vode u vlačnoj pukotini, [kN/m²];
- U_2 – tlak vode na plohu sloma, [kN/m²];
- H – visina pokosa, [m];
- α_i – kut nagiba plohe sloma i stabilizacijske sile, [°];
- T_i – stabilizacijska sila (sila u sidru), [kN];
- O – hvatište sila F_r, F_n i F_i .

U analizu globalne stabilnosti kosine uključena su djelovanja geotehničkih sidara koja predstavljaju stabilizacijske sile, odnosno sile koje povoljno djeluju na stabilnost kosine. Stabilnost sidrenih stijenskih kosina među prvima su proučavali Hoek & Bray (1981), a u novije vrijeme Shukla & Hossain (2011).

Analiza stabilnosti postaje još složenija kada se kosine podvrgavaju vibracijama uzrokovanim potresima, kao što je to u ovom radu. U takvim slučajevima koeficijenti k_h i k_v koriste se za izračun vodoravnih i okomitih seizmičkih inertnih sila uzrokovanih potencijalnim potresom. Te se sile zatim dodaju u ukupni izračun ravnoteže za pojedinačni blok koji predstavlja otklizanu masu (Melo & Sharma 2004), što je vidljivo iz Izraza 5 i 6.

Općenito se ovakav pristup integracije Eurokoda 7 u analize stabilnosti kosina sve više koristi posljednjih godina. Tako Pantelidis & Griffiths (2014) u svojem radu koriste propise EC7 kod određivanja parcijalnih koeficijenata ili faktora neuobičajenim strategijama faktoriranja s primjenom kod analize stabilnosti kosina.

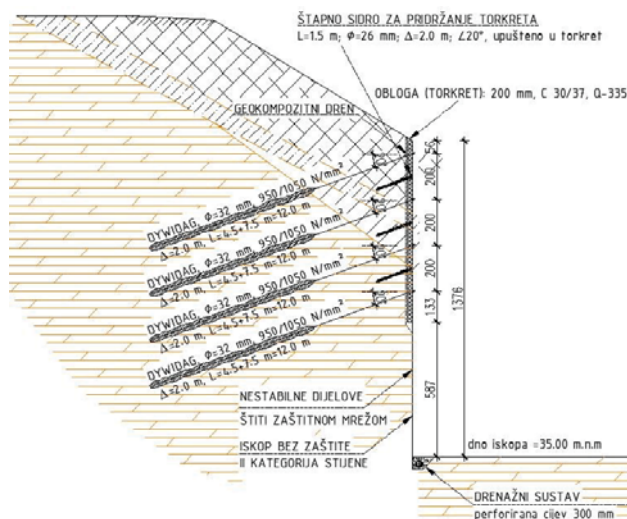
Na Slici 9 prikazan je karakteristični presjek za predmetnu lokaciju u Segetu Donjem, na temelju kojeg je provedena analiza stabilnosti. Na istoj slici se vidi da je projektom zaštite građevne jame isplanirana potporna konstrukcija u obliku zida koji se sastoji od obloge (torkreta) i pasivnih sidara u gornjem dijelu iskopa gdje je

stijena lošijih svojstava, dok u donjem dijelu iskopa nema dodatne zaštite, jer je iskop u čvrstoj kompaktnoj stijeni.

Visina sidrene dionice iskopa je do maksimalno 15 m. Iskop se vrši vertikalno, odnosno pod kutom od 90°. Maksimalna visina iskopa je 21 m. Sidra su pasivna i trajnog karaktera, ukupne duljine 10 - 12 m. Izvedena se u nagibu 20° s duljinom slobodne 4,5 m i sidrene dionice 7,5 m. Razmak sidara je 2 m u vertikalnom smjeru i 2 m u horizontalnom smjeru (Markić et al. 2014)

Iza obloge (torkreta) postavljen je drenažni materijal kojeg sačinjavaju geokompozitni drenovi. Procjedne vode koje prikupe geokompozitni drenovi sprovode se u sustav drenažnih cijevi u nožici kosine (Markić et al. 2014).

Za pridržanje torkreta, obzirom da je stijanka iskopa vertikalna, ugrađena su štapna sidra duljine 1,5 m između glavnih sidara. Na zidove pokosa koji nemaju zaštitnu konstrukciju na labilnim dijelovima postavljena je zaštitna mreža (Markić et al. 2014).



Slika 9. Karakteristični proračunski presjek za lokaciju u Segetu Donjem, pripremljen za analizu nestabilnog bloka, slučaj sloma po diskontinuitetu

Ulazni parametri proračuna stabilnosti stijenske kosine za karakteristični presjek na lokaciji u Segetu Donjem su:

- Parcijalni koef.: $\gamma_G = 1,0$, $\gamma_Q = 1,3$, $\gamma_c = 1,25$, $\gamma_\phi = 1,25$;
- Jedinичna težina bloka stijene: $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$;
- Vanjsko opterećenje: $q = 5 \text{ kN/m}^2$;
- Duljina djelovanja vanjskog opterećenja: $B = 7,5 \text{ m}$;
- Kut nagiba plohe sloma: $\psi_p = 36^\circ$;
- Koeficijent potresa: $k_h = 0,11$ (50% a_{gR}), $k_v = 0$;
- Karakteristični kut trenja plohe sloma: $\phi = 25^\circ$;
- Karakteristična kohezija na plohi sloma: $c = 0 \text{ kN/m}^2$;
- Kut nagiba plohe sloma i stabilizacijske sile: $\alpha_i = 34^\circ$;
- Nosivost sidra: $T_{\max} = 760 \text{ kN}$;
- Visina pokosa: $H = 18,8 \text{ m}$;
- Tlak vode: $U_1 = 0 \text{ kN/m}^2$, $U_2 = 0 \text{ kN/m}^2$;
- Volumen nestabilnog bloka: $V = 193 \text{ m}^3/\text{m}$;
- Težina nestabilnog bloka stijene: $W = 4825 \text{ kN/m}$;
- Stabilizacijska sila: $T_i = 380 \text{ kN/m}$.

S obzirom na činjenicu da istražnim radovima nije utvrđena prisutnost podzemne vode (nedrenirano stanje), za proračun sila F_n i F_i korišteni su pojednostavljeni Izrazi 5 i 6. Tako je za izračun sile okomite na plohu sloma bez seizmičkog djelovanja korišten Izraz 8, a sa seizmičkim djelovanjem Izraz 9. Za izračun sile koja uzrokuje klizanje analogijom su korišteni Izrazi 10 i 11. Za kontrolu stabilnosti izračunom faktora sigurnosti korišten je Izraz 7 (Hoek & Bray 1981), pri čemu su ulazni podaci bili parametri čvrstoće diskontinuiteta prema Tablici 4, odnosno proračunska kohezija $c_d = 0 \text{ kN/m}^2$, proračunski kut trenja $\phi_d = 25^\circ$. Rezultati provedene analize prikazani su u Tablici 5.

Kontrola proračunatih faktora konzervativnosti globalne stabilnosti provedena je primjenom računalnog programa SLIDE 6.0 (Rocscience Inc. 2011), a koji se koristi za analize stabilnosti kosina. Postavke računalnog programa bile su u skladu s HRN EN 1997-2:2012 hr i HRN EN 1997-2:2012/NA:2012 hr, prema projektnom pristupu 3. Na Slici 10 prikazana je analiza bez seizmičkog djelovanja (potresa), a na Slici 11 s uključenim seizmičkim djelovanjem.

Tablica 5. Rezultati proračuna sila koje djeluju na kosinu i faktora konzervativnosti ovisno o seizmičkom djelovanju

SEIZMIČKO DJELOVANJE (POTRES)	F_n [kN/m']	F_i [kN/m']	FK
NE	5518	1803	1,43
DA	5194	2229	1,08

6. GEOTEHNIČKO OPAŽANJE STABILNOSTI KOSINE ISKOPA

Za potrebe opažanja horizontalnih pomaka prilikom iskopa predmetnog zasjeke u Segetu Donjem, prema opisu i parametrima prikazanim u ovom radu, ugrađen je vertikalni inklinometar dubine 23 m na najvišoj lokaciji prema mogućem pristupu, uz sam rub zasjeke. Poslije referentnog ili nultog mjerenja, opažalo se još četiri puta, mjesečno jednom, za vrijeme izvedbe iskopa miniranjem i ugradnje sidara. Mjerenja su provedena pomoću digitalnog inklinometarskog sustava, primjenom najnovije biaxial digital MEMS mjerne sonde.

Rezultati inklinometarskih opažanja prikazuju izmjerena odstupanja pojedinih točaka inklinometarske cijevi od nulte linije izmjerene kod nultog očitavanja, a mogu se prikazivati u obliku dijagrama kumulativnih pomaka (Slika 12a) i inkrementalnih pomaka (Slika 12b).

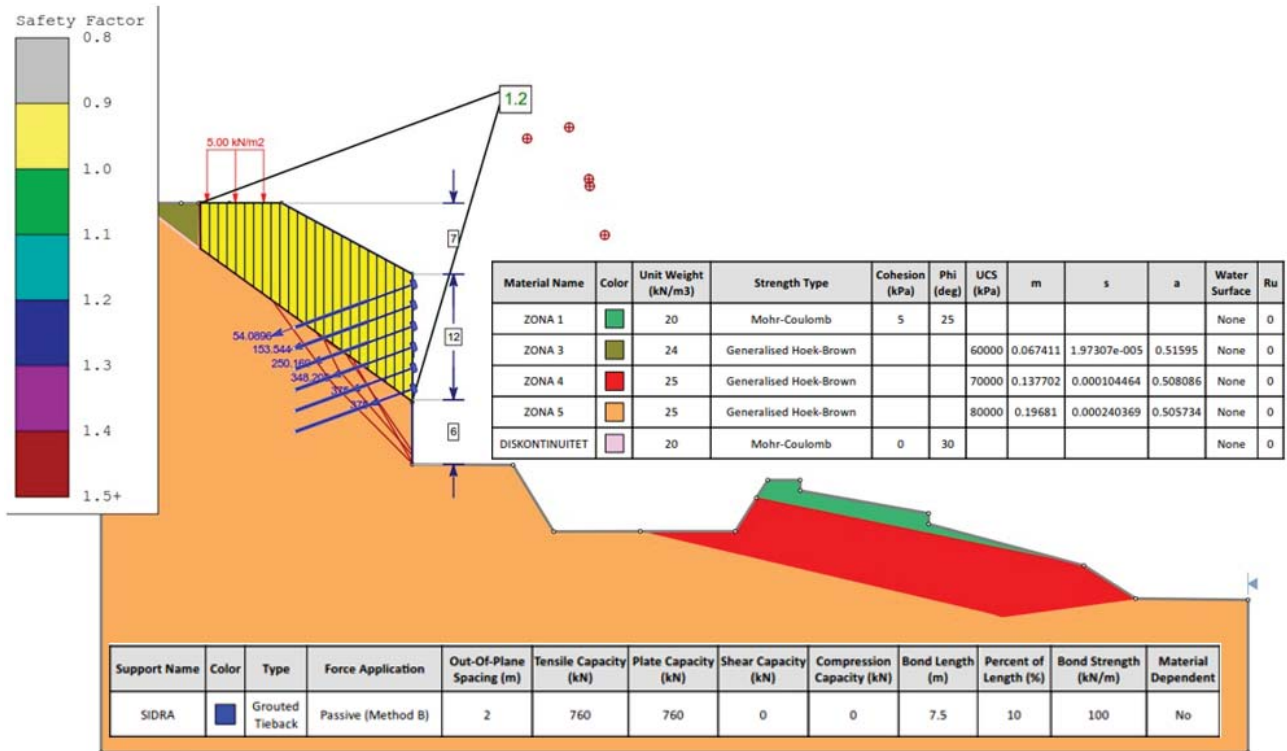
Kumulativni pomaci predstavljaju ukupne (pribrojene) pomake izmjerene kod svakog mjerenja u odnosu na referentno (nulto) mjerenje. Inkrementalni dijagrami prikazuju pojedinačne pomake na određenoj dubini, a koriste se za identificiranje dubina na kojima se pojavljuju pomaci. Može se zaključiti da izmjereni pomaci na inklinometru ukazuju da nema značajnijih pokreta u stijenskoj masi, a minimalni pomaci (<1,5 mm) koji su zabilježeni posljedica su miniranja, odnosno mehaničkog rastresanja stijenske mase (Grabar & Pažur 2016).

$$F_n = (W + \gamma_Q \cdot q \cdot B) \cdot \cos \psi_p + \sum_{i=1}^5 T_i \cdot \cos \alpha_i \tag{8}$$

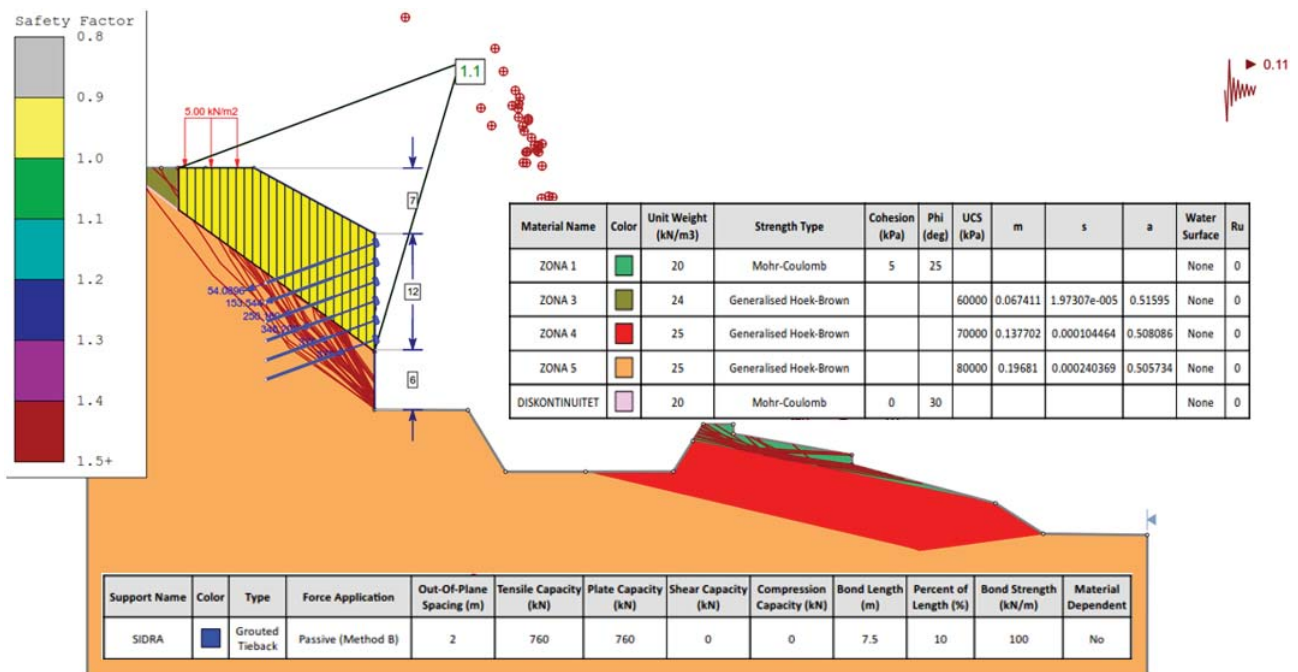
$$F_n = (W + \gamma_Q \cdot q \cdot B) \cdot \{ \cos \psi_p - k_h \cdot \sin \psi_p \} + \sum_{i=1}^5 T_i \cdot \cos \alpha_i \tag{9}$$

$$F_i = (W + \gamma_Q \cdot q \cdot B) \cdot \sin \psi_p - \sum_{i=1}^5 T_i \cdot \sin \alpha_i \tag{10}$$

$$F_i = (W + q \cdot B) \cdot \{ \sin \psi_p + k_h \cdot \cos \psi_p \} - \sum_{i=1}^5 T_i \cdot \sin \alpha_i \tag{11}$$



Slika 10. Analiza globalne stabilnosti programom Slide 6.0, bez seizmičkog djelovanja za karakteristični presjek u Segetu Donjem



Slika 11. Analiza globalne stabilnosti programom Slide 6.0, sa seizmičkim djelovanjem za karakteristični presjek u Segetu Donjem

7. ZAKLJUČAK

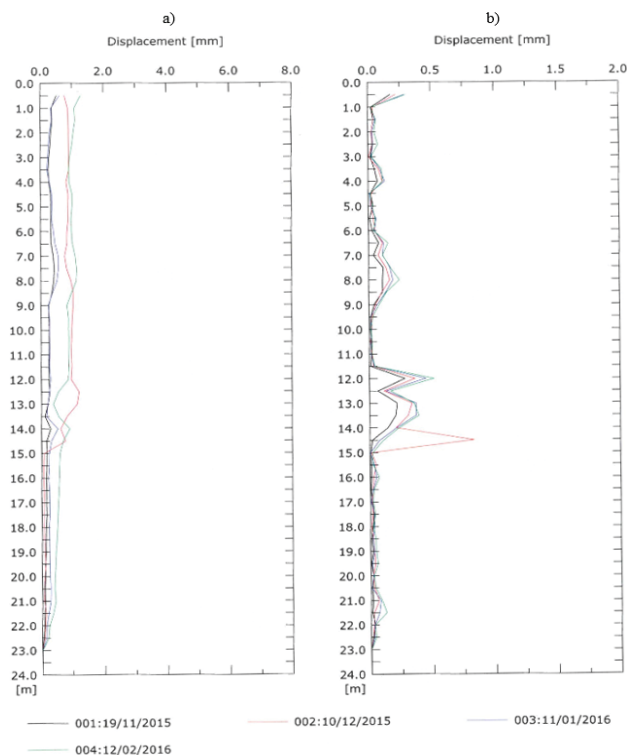
Ovaj rad primjer je praktičnog povezivanja znanja i zakonitosti iz geotehničkog inženjersva i mehanike stijena, uz značajnu ulogu primijenjene geofizike i seizmologije, za potrebe analize stabilnosti stijenske kosine. Temeljem dovoljno kvalitetno izvedenih geotehničko-geofizičkih istražnih radova, a prema propisanim normama i obrascima za njihovo provođenje, moguće je, uz pomoć generaliziranog Hoek-Brownovog kriterija, odrediti optimalne parametre čvrstoće stijenske mase, kao ulazne podatke za analize.

Primjena propisa Eurokoda 7 osim statičkih djelovanja poput opterećenja na vrhu kosine, vlastite težine stijenske mase i stabilizacijske sile, u proračun uključuje i dinamička djelovanja koja se mogu javiti prilikom seizmičkih aktivnosti. Kao rezultat stroge primjene propisa postiže se propisana margina sigurnosti.

Analize izvedene u ovom radu pokazuju kako seizmička potresna djelovanja značajno utječu na vrijednost faktora konzervativnosti stabilnosti kosine te ih svakako treba uzimati u obzir prilikom rješavanja problema iz geotehničkog inženjersva, iako povećavaju ukupnu cijenu koštanja tehničkog rješenja.

Kod budućih istraživanja treba razmotriti i slučajeve s tečenjem podzemne vode te složenim kliznim plohama koje su česte u stijenskoj masi, a rezultate iskoristiti za eventualne korekcije regulative s ciljem racionalizacije tehničkih rješenja. Do tada, s ciljem postizanja margine sigurnosti, analize stabilnosti stijenskih kosina treba provoditi u skladu s važećim Hrvatskim normama proizašlim iz Eurokoda 7. Potrebno je dobivene rezultate kontinuirano, na propisan način, provjeravati. Tijekom izvedbe zaštitne konstrukcije provoditi geotehnička opažanja.

Ovim radom također je pokazano kako se primjenom geotehničkih metoda može pridonijeti očuvanju okoliša.



Slika 12. ►

► **Rezultati inklinometarskih opažanja stijenske kosine u Segetu Donjem: a) Dijagram kumulativnih pomaka od dna prema vrhu, b) Dijagram inkrementalnih pomaka od dna prema vrhu**

8. LITERATURA

Eurokod 7 (2012): Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009); 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak; HRVATSKE NORME: HRN EN 1997-1:2012 hr, HRN EN 1997-1:2012/NA 2012

Eurokod 7 (2012): Geotehničko projektiranje - 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla; HRVATSKA NORMA, HRN EN 1997-2:2012 hr.

Eurokod 8 (2008, 2011): Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 5.dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja (EN 1998-5:2004); 5.dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja - Nacionalni dodatak; HRVATSKE NORME: HRN EN 1998-5:2008, HRN EN 1998-5:2011/NA.

Grabar, K.; Pažur, I. (2016): Izvještaj o mjeranju horizontalnih pomaka br. 4, Centar zdravog življenja Seget. SPP d.o.o., Varaždin, TD SPP/2015/141-4.

Herak, M.; Allegretti, I.; Herak, D.; Ivančić, I.; Kuk, V.; Marić, K.; Markušić, S.; Sović, I. (2011): Seismic hazard map of Croatia for a 475-year return period (<http://seizkarta.gfz.hr/>).

Hoek, E.; Bray, J. W. (1981). Rock slope engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, England.

Hoek, E.; Carranza-Torres, C.T.; Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 2002: 1: 267–73.

ISRM - International Society for Rock Mechanics (2007): The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson. Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. ISBN: 978-975-93675-4-1.

Marinčić, S.; Magaš, N.; Borović, I. (1971): Osnovna geološka karta SFRJ, list K 33-21 Split. Izradio Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1968. – 1969. Stručno-tehnološka redakcija seizmološkog zavoda, Beograd, 1971.

Markić, R.; Špiranec, M.; Pažur, I. (2014): Projekt zaštite građevne jame – Centar zdravstvenog turizma – Wellness, Spa i poliklinika u Segetu Donjem. METRION PROJEKT d.o.o., Zagreb. TD 04/2014-G.

Melo, C. and Sharma, S. (2004): Seismic coefficient for pseudo-static slope analysis. 13th world conference on earthquake engineering. 1-6 August 2004, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 369.

Pantelidis, L. and Griffiths D.V. (2014): Integrating Eurocode 7 (load and resistance factor design) using nonconventional factoring strategies in slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal, 51(2): 208-216.

Rocscience Inc. (2005): RocLab 1.0, Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown failure criterion. User Manual.

Rocscience Inc. (2011): Slide 6.0, Slope stability analysis software. User Tutorial.

Shukla, S. K. and Hossain, M. M. (2011): Analytical expression for factor of safety of an anchored rock slope against plane failure. International Journal of Geotechnical Engineering, USA, Vol. 5, No. 2.

Špiranec, M.; Grabar, K.; Filipović, A.; Sambolec, I.; Pažur, I. (2013): Geotehnički elaborat temeljenja poliklinike u Segetu Donjem. SPP d.o.o., Varaždin, TD 16-2/13.