

Bojan ŽLENDER  
prof.dr., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

Borut MACUH  
asist.mag., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

## **STABILNOSTNA ANALIZA PO PREDSTANDARDU EUROCODE 7**

**POVZETEK:** V prispevku je prikazana izvedba stabilnostne analize skladno s predstandardom Eurocode 7, ki lahko služi kot vzorec za veliko praktičnih primerov. Namenoma je izbran primer pobočja iz DIN (1983), ki smo ga analizirali peš in z računalniškim programom ter primerjali rezultate. Na spremenjenem modelu smo dodali še obtežbo objekta in prometno obtežbo. Primerjana sta pristopa z globalnim faktorjem varnosti in parcialnimi faktorji varnosti. Oba pristopa dajeta različni kritični porušnici. Direktna primerjava rezultatov je težko izvedljiva in je delno možna, ko je znana zahteva za globalno varnost.

## **STABILITY ANALYSIS ACCORDING TO EUROCODE 7 PRESTANDARD**

**SUMMARY:** The paper presents stability analysis according to Eurocode 7 prestandard, which can serve as an example for many practical cases. Example from DIN (1983) is taken on purpose. It has been analysed manually and using a computer programme, and the results have been compared. The model has also been changed by adding the persistent and transient loads. Principles of global safety factor and partial safety factors have been compared. Both approaches give different critical slip surfaces. Direct comparison of results is not easily made, and is only partly possible when requirement of global safety is known.

## UVOD

V dosedanji geotehnični praksi so se izvajale stabilnostne analize z določevanjem globalnega faktorja varnosti. Definiran je kot kvocient med razpoloživo strižno trdnostjo in mobilizirano strižno napetostjo, ki je potrebna za doseg ravnotežja po celotni porušni ploskvi. Ta osnovna definicija varnosti se primerno uporabi v posameznih teorijah stabilnostnih analiz. Na primer pri teoriji stabilnostnih analiz s krožno porušnico po Bishopu je faktor varnosti kvocient med vsoto momentov vseh strižnih odporov na porušni ploskvi in vsoto momentov vseh obtežb, ki delujejo na telo nad porušno ploskvijo.

Predstandard Eurocode 7 vpeljuje uporabo izračuna po mejnih stanjih s principom parcialnih faktorjev varnosti. Po mejnih stanjih morajo biti vrednosti računskih vplivov manjše od vrednosti računskih odporov reduciranih za modelni faktor. Računske vplive je potrebno povečati s pripadajočimi faktorji varnosti (jih množimo), računske odpore pa dobimo z zmanjšanjem karakteristik strižnih odporov s pripadajočimi faktorji varnosti (jih delimo). Kvocient med računskimi vplivi in računskimi odpori nam predstavlja izkoriščenost strižne trdnosti, njegova obratna vrednost pa nam pove kolikšna je dodatna varnost. V stabilnostnih analizah je potrebno po Eurocode izvesti izračun za primer C, ker je bistvena trdnost tal.

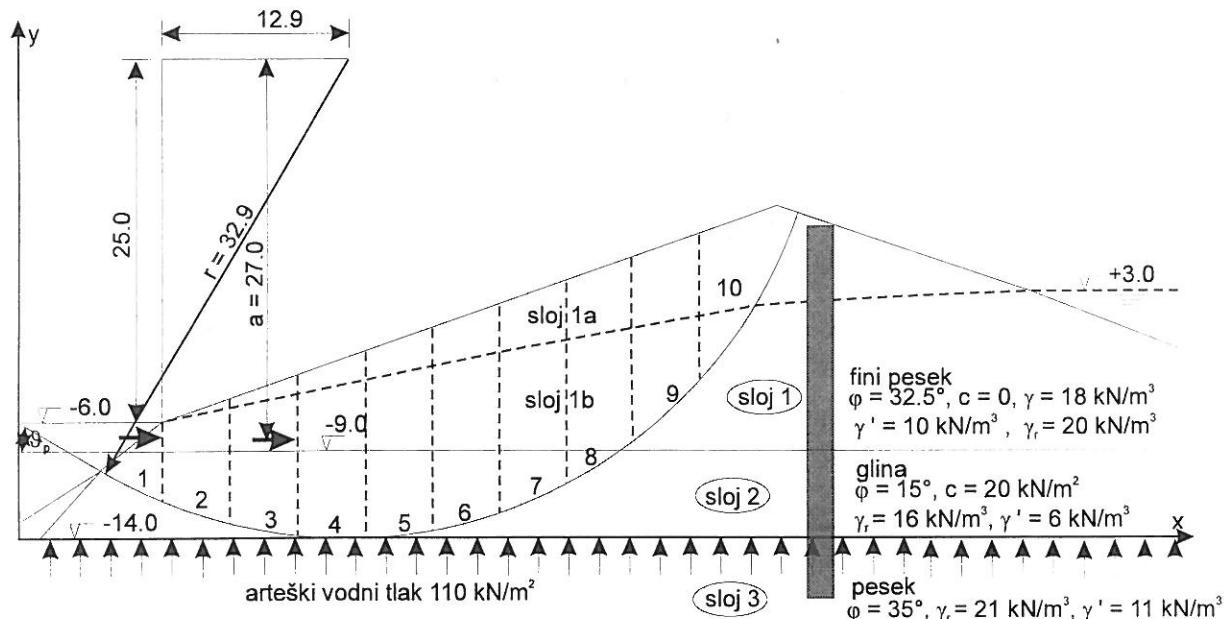
V nadaljevanju je prikazan primer stabilnostne analize pobočja po obeh principih na ravninskem modelu. Za peš analizo je bila uporabljenha osnovna metoda krožnih porušnic po Bishopu (1955), ki ne upošteva trenja na medlamelnih ploskvah. Primerjalne izračune smo izvedli z računalniškim programom, ki je zasnovan na modificirani Bishopovi metodi krožnih porušnic.

Namenoma je bil izbran primer pobočja iz DIN (1983), ki smo ga analizirali peš in z računalniškim programom ProArq ter primerjali rezultate. Na spremenjenem modelu pobočja smo dodali še stalno obtežbo (objekt) in spremenljivo (prometno) obtežbo.

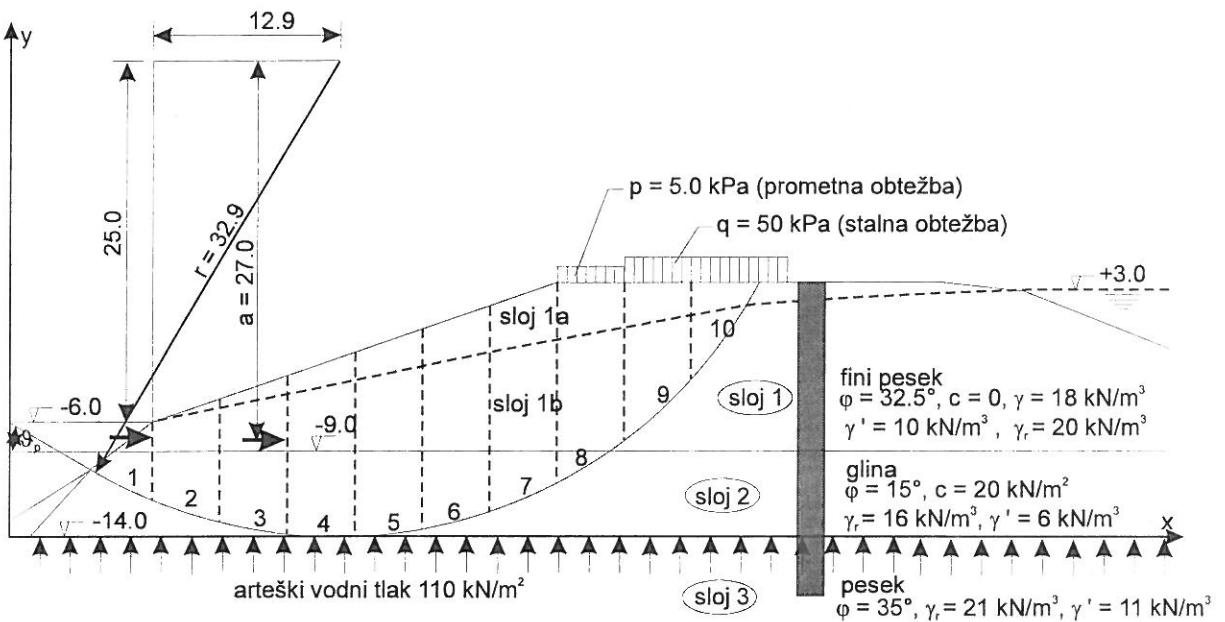
## PODATKI ZA ANALIZO

Analizirano je pobočje s tremi zemljinskim sloji. Skozi zgornji sloj poteka precejšnjica, ki ga deli na delno zasičen in potopljeni del. Spodnja sloja ležita horizontalno. Na srednji sloj deluje arteški pritisk podtalnice iz spodnjega sloja. Geometrijski podatki in ostali podatki za analizo so razvidni iz slike 1. Detajlnnejši opis in podatki modela (M1) so podani v DIN (1983).

Model pobočja smo spremenili (v M2) tako, da smo dodali obtežbo objekta in prometno obtežbo. Geometrijski podatki in ostali podatki za analizo so razvidni iz slike 2.



Slika 1: Model pobočja M1



Slika 2: Model pobočja M2

## ANALIZA

Preglednica 1 vsebuje rezultate vseh analiz za oba modela. V obeh modelih je izbrana krožna porušnica in enaka razdelitev lamel z 10 oziroma 14 lamelami. Število lamel lahko vpliva na rezultate, kar pa ta prispevek ne obravnava.

Iz preglednice 1 so razvidni globalni faktorji varnosti po končanih iteracijah ter dodatna varnost oziroma izkoriščenost strižne trdnosti po principu parcialnih faktorjev varnosti. V vseh analizah s principom parcialnih faktorjev varnosti za izbrana primera je bil pogoj varnosti izpolnjen. Izpolnitev pogoja varnosti pri izračunu globalnega faktora varnosti je odvisna od postavljene zahtevane vrednosti.

Preglednica 1: Rezultati analiz

Primer	M1		M2			
	"peš"	"računalnik"	"peš"		"računalnik"	
Analiza	brez	brez	z	brez	z	brez
Obtežba (promet + objekt)	1.39	1.38	1.39	1.49	1.37	1.52
Globalni faktor varnosti						
Parcialni faktorji varnosti						
- dodatna varnost	1.05	1.03	1.05	1.12	1.01	1.13
- izkoriščenost strižne trdnosti	0.95	0.97	0.95	0.89	0.99	0.88

V nadaljevanju so prikazane stabilnostne analize samo za primer M2. V preglednicah 2 in 3 sta prikazana izračuna vsote trenjskih sil in vsote projekcij vseh aktivnih sil na krožno porušnico s peš izračunom globalnega faktora varnosti in po principu parcialnih faktorjev varnosti. Za preglednicama sledi nadaljevanje analiz z izračuni vpliva pasivnega odpora in hidrostatičnega tlaka ter faktorjev varnosti, dodatne varnosti oziroma izkoriščenosti.

Za zahtevano globalno varnost 1.30 je v konkretnem primeru pri varnosti 1.39 dodatna varnost  $1.39 / 1.30 = 1.07$ , kar je več kot dodatna varnost (1.05) izračunana s parcialnimi faktorji varnosti.

Analize so izvedene za izbrano porušnico. V praksi je potrebno poiskati kritično porušnico, ki daje najmanjši faktor varnosti oziroma najvišjo stopnjo izkoriščenosti. Oba pristopa bosta dala različni kritični porušnici.

Preglednica 2: Stabilnostna analiza z globalnim faktorjem varnosti po končanih iteracijah

### Preglednica 3: Stabilnostna analiza s parcialnimi faktorji varnosti

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Številka lamele	Številka sloja	Debelina sloja	Prostor. teža sloja	Širina lamele $b_i$	Lastna teža lamele $G_i$	Stalna obtežba na lamele $Q_i$	Prometna obtežba na lamele $P_i$	Vsota obtežb na lamele $G_i + Q_i + P_i$	Naklon osnove lamele $\vartheta_i$	Strižni kot $\varphi_i$	Kohezija $c_i$	Porni tlak na drsini $u_i$	Strižna sila na drsini $T_i$	ž	
1	1	1a 1b 2	0,00 3,00 1,42	18,0 20,0 16,0	4,82	398,7	0,0	0,0	398,7	-28,0	12,1	12,5	52,72	116,64	-187,18
2	2	1a 1b 2	0,48 3,44 3,41	18,0 20,0 16,0	4,82	636,2	0,0	0,0	636,2	-17,5	12,1	12,5	85,96	121,25	-191,32
3	3	1a 1b 2	1,34 4,20 4,30	18,0 20,0 16,0	4,82	852,8	0,0	0,0	852,8	-9,0	12,1	12,5	100,48	145,92	-133,40
4	4	1a 1b 2	2,02 5,12 4,70	18,0 20,0 16,0	4,82	1031,3	0,0	0,0	1031,3	-1,0	12,1	12,5	106,47	171,98	-18,00
5	5	1a 1b 2	2,80 5,88 4,42	18,0 20,0 16,0	4,82	1150,6	0,0	0,0	1150,6	8,8	12,1	12,5	104,06	195,28	176,03
6	6	1a 1b 2	3,61 6,66 3,36	18,0 20,0 16,0	4,82	1214,4	0,0	0,0	1214,4	16,2	12,1	12,5	95,76	217,25	338,79
7	7	1a 1b 2	4,42 7,56 1,40	18,0 20,0 16,0	4,82	1220,2	0,0	0,0	1220,2	26,0	12,1	12,5	85,23	235,46	534,91
8	8	1a 1b 1a 1b	4,49 7,00 3,83 3,86	18,0 20,0 18,0 20,0	4,82	1064,4	0,0	31,3	1095,7	35,8	27,0	0,0	70,00	348,42	640,93
9	9	1a 1b 1a 1b	4,49 7,00 3,30 0,00	18,0 20,0 18,0 20,0	4,82	704,4	241,0	0,0	945,4	46,2	27,0	0,0	38,60	365,10	682,35
10	10	1a 1b	3,17	188,3	158,5	0,0	346,8	59,0	27,0	0,0	0,0	0,0	0,00	185,68	297,26
													$\Sigma$	2102,96	2140,37

Stabilnostna analiza z globalnim faktorjem varnosti po končanih iteracijah

Predpostavljena vrednost koeficiente varnosti

$$\eta = 1.39$$

Prostorninska teža vode in zemljine

$$\gamma_w = 10.00 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_z = 20.00 \text{ kN/m}^3$$

Strižni kot in kohezija

$$\varphi = 32.50 \text{ deg}$$

$$c = 0.00 \text{ kPa}$$

$$\varphi_m = 24.62 \text{ deg}$$

$$c_m = 0.00 \text{ kPa}$$

za stalno obtežbo: 1.00

za neugodno spremenljivo: 1.30

za strižni kot  $\gamma_\varphi$ : 1.25

za kohezijo  $\gamma_c$ : 1.60

Koeficient pasivnega zemeljskega pritiska

$$K_{ph} = 2.43$$

$$K_{phd} = 2.66$$

Polmer krožne porušnice

$$r = 32.90 \text{ m}$$

$$r = 32.90 \text{ m}$$

Vsota vseh strižnih odporov na porušnici

$$\Sigma T_i = 2822.2 \text{ kN}$$

$$\Sigma T_i = 2103.0 \text{ kN}$$

Vsote vseh projekcij obtežb na lamele na njihovo osnovu

$$\Sigma (G_i + Q_i + P_i) \sin \theta_i = 2136.1 \text{ kN}$$

$$\Sigma (G_i + Q_i + P_i) \sin \theta_i = 2140.4 \text{ kN}$$

$$\text{Višina } h = 3.00 \text{ m}$$

$$\text{Višina } h = 3.00 \text{ m}$$

Ročica rezultante pasivnih zemeljskih pritiskov  $E_p$  in hidrostatičnih tlakov  $W$

$$r = 27.00 \text{ m}$$

$$M_{Ep} = 2950.6 \text{ kNm/m}$$

$$M_w = 1215.0 \text{ kNm/m}$$

$$r = 27.00 \text{ m}$$

$$M_{Ep} = 3236.2 \text{ kNm/m}$$

$$M_w = 1215.0 \text{ kNm/m}$$

Globalna varnost po izvršenih iteracijah

$$F = 1.39$$

Dodatni faktor varnosti: 1.05

Izkoriščenost: 0.96

## ZAKLJUČEK

V prispevku je nazorno prikazana izvedba stabilnostne analize skladno s predstandardom Eurocode 7, ki lahko služi kot vzorec za veliko praktičnih primerov. Zajeti so samo nekateri vplivi (lastna teža, stalna in prometna obtežba, porni tlaki). Pri globalnih stabilnostnih analizah naprimer sidrih konstrukcij ali izboljšav tal z geotekstilom je potrebno upoštevati sile v sidrih ali geotekstilu, ki jih prečka porušnica, kot vplive. Pasivne tlake pa obravnavamo kot odpore. Vpeljava analiz po mejnih stanjih s principom parcialnih faktorjev varnosti, daje kot rezultat le izpolnitev ali neizpolnitev pogoja, da so računski vplivi manjši od računskih odporov. Zaradi tega je težko izvesti direktno primerjavo z rezultati analiz izračuna globalnega faktorja varnosti. Primerjava je delno možna, ko je znana zahteva za globalno varnost. Ekstremni vrednosti za zahtevano globalno varnost bi lahko bili vrednosti parcialnih faktorjev varnosti za tangens strižnega kota 1.25 (za tla brez kohezije) in kohezijo 1.6 (za koherentna tla). Oba pristopa dajeta različni kritični porušnici.

## LITERATURA

- [1] Bishop, A., W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, *Geotechnique*, London
- [2] DIN (1997). Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemesung in der Geotechnik, Beispiele, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin
- [3] DIN (1981a). DIN 4084: Baugrund – Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, *Beuth Verlag GmbH*, Julij 1981, Berlin
- [4] DIN (1981b). Beiblatt 1 zu DIN 4084: Baugrund – Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Erläuterungen, *Beuth Verlag GmbH*, Julij 1981, Berlin
- [5] DIN (1983). Beiblatt 2 zu DIN 4084: Baugrund – Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Berechnungsbeispiele, *Beuth Verlag GmbH*, September 1983, Berlin
- [6] CEN (1994). Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules, Bruselj