



## SEIZMI KI PRORA UN POTPORNIH ZIDOVA PREMA EUROPSKIM NORMAMA

<sup>1</sup>doc.dr.sc. **Radoslav Marki** , dipl.ing.gra .

<sup>2</sup>prof.dr.sc. **Predrag Miš evi** , dipl.ing.gra .

<sup>1</sup>mr.sc. **Dragan ubela**, dipl.ing.gra .

<sup>1</sup>**Željko Mikuli** , dipl.ing.gra .

<sup>1</sup>Gra evinski fakultet, Sveu ilište u Mostaru

<sup>2</sup>Fakultet gra evinarstva, arhitekture i geodezije, Sveu ilište u Splitu

**Sažetak:** U ovom radu je prikazan postupak prora una potpornih zidova prema Europskim normama za dinami ko optere enje uzrokovano potresom. Prvo su izložene teorijske osnove, a zatim je na prakti nom primjeru armiranobetonskog konzolnog potpornog zida visine 4.40 m proveden prora unski postupak prema EN 1997-1 i EN 1998-5. Na kraju su dati zaklju ci sa op enitim komentarima primjene Europskih normi.

**Klju ne rije i:** Europske norme, potporni zid, tlak tla, seizmi ki tlak tla

## SEISMIC CALCULATION OF RETAINING WALLS ACCORDING TO EUROCODES

**Abstract:** This paper presents calculation procedure of retaining walls according to European norms for dynamic loads caused by earthquake. First, the theoretical basics are presented and then on the practical example of reinforced concrete canteliver retaining wall height of 4.40 m, calculation procedure according to EN 1997-1 and EN 1998-5 is performed. Main conclusions with the general comments of application of European norms are given on the end.

**Key words:** Eurocodes, retaining wall, earth pressure, seismic earth pressure



## 1. UVOD

Prora un potpornih zidova podrazumijeva odre ivanje optere enja, prora un unutarnjih sila za predvi eni stati ki sustav, zatim dokaz globalne stabilnosti na prevrtanje i klizanje, dokaz nosivosti temeljnog tla te dokaz nosivosti i uporabljivosti popre nih presjeka zida. Optere enja na potporne zidove se prora unavaju prema teoriji mehanike tla uvažavaju i odredbe važe ih normi.

Europska norma EN 1997-1 [1], geotehni ko projektiranje-Dio 1: Op a pravila, daje izraze i smjernice za prora un djelovanja od tlaka tla na potporne zidove te ostale geotehni ke parametre potrebne za sami prora un. Sa aspekta optere enja na zidove u sklopu te norme su data prvenstveno stati ka djelovanja.

Dinami ka djelovanja uzrokovana potresom se odre uju prema Europskoj normi EN 1998-5 [2]-Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija-5.dio:Temelji, potporne konstrukcije i geotehni ka pitanja te EN 1998-1 [3]- Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Op a pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade. Za ocjenjivanje sigurnosti potpornih konstrukcija na seizmi ka djelovanja prema navedenoj normi, op enito su prihvatljive sve utvr ene metode utemeljene na postupcima dinamike konstrukcija i dinamike tla te za koje postoje iskustvo i opažanja. Imaju i u vidu složenost problematike odre ivanja potresnog djelovanja naprednijim metodama dinamike analize koji prvenstveno ovise od ulaznih podataka, norma je predvidjela i metodu prora una seizmi ke sile pojednostavnjenim postupkom u vidu pseudostati kog prora una.

Prora un unutarnjih sila (momenti savijanja, popre ne i uzdužne sile) se prora unavaju za poznati stati ki sustav metodama gra evne statike ili numeri ki u nekom od komercijalnih softvera za prora un konstrukcija.

Prora un globalne stabilnosti podrazumijeva prora un na prevrtanje i klizanje zida kao krute konstrukcije pod optere enjem tlaka tla i drugih optere enja na zid (promjenjivo, seizmi ko, od tlaka stupca vode iza zida itd.). Stabilnost na prevrtanje definira se za grani no stanje nosivosti na na in da prora unska djelovanja moraju biti manja od prora unskog otpora, a koji se prora unava usporedbom destabiliziraju ih sila oko to ke prevrtanja u odnosu na stabiliziraju e sile. Stabilnost na klizanje se iskazuje usporedbom destabiliziraju ih horizontalnih sila na kontaktu temelj-tlo u odnosu na stabiliziraju e horizontalne sile koje su proizvod vertikalnih sila i odgovaraju eg koeficijenta trenja temelj-tlo. Potporni zid mora biti tako dimenzioniran da je tradicionalno definiran faktor sigurnosti na prevrtanje i faktor sigurnosti na klizanje ve i od jedan.

Prora un grani ne nosivosti temeljnog tla podrazumijeva dokaz da tlo ima dostatnu otpornost na sile koje djeluju preko temelja na tlo. Pri tome se uvijek provjerava i grani no stanje uporabljivosti, a to je prora un slijeganja.

Ovisno od materijala od kojeg je izra en potporni zid, potreban je i prora un grani ne nosivosti i uporabljivosti popre nih presjeka zida i temelja. Ukoliko je potporni zid od armiranog betona što je naj eš i slu aj, onda prora un podrazumijeva dimenzioniranje armiranobetonskog presjeka na maksimalne prora unske unutarnje sile (momente savijanja, popre ne sile i uzdužne sile) te prora un širine i razmaka pukotina u betonu. Uporabljivost uklju uje i prora un horizontalnih pomaka zida.

U sklopu ovog rada je na prakti nom primjeru armiranobetonskog konzolnog potpornog zida visine 4.4 m prikazan prora un za geostati ka i seizmi ka optere enja prema EN 1997-1 i EN 1998-5. Na kraju su dati zaklju ci sa komentarima.



## 2. SEIZMI KA DJELOVANJA NA POTPORNE ZIDOVE

### 2.1 Op enito

Europska norma EN 1998-5 zahtijeva da se potporne konstrukcije u seizmi ki aktivnim podru jima moraju projektirati tako da ispune svoju ulogu tijekom potresa i nakon njega bez znatnog konstrukcijskog ošte enja.

Zbog dinami kog me djelovanja tla i konstrukcije uslijed djelovanja potresa, pored stati kih sila uzrokovanih tlakom tla javljaju se i dodatne seizmi ke sile koje treba uzeti u obzir pri globalnoj analizi. Ovisno od tipa konstrukcije (kruta ili mekana) i vrste temeljnog tla (kruto ili meko tlo) odziv može imati ve i ili manji u inak kako na samu konstrukcije tako i na temeljno tlo.

U ovom radu e se prezentirati pojednostavnjeni postupak odre ivanja seizmi kih sila na potporne zidove sukladno odredbama europske norme EN 1998-5 (dodatak E) kojim se jednostavno prora unava veli ina i smjer seizmi ke sile. Prema dodatku E.3 i E.4 navedene norme, koeficijent tlaka tla za zidove koji se mogu slobodno zaokretati ili pomicati može se prora unati iz Mononobe-Okabe-ove formule [4] dok se za krute konstrukcije za koje se pretpostavlja da se ne mogu slobodno zaokretati ili pomicati dodatna dinami ka sila uzrokovana potresom izra unava prema prema posebnom izrazu navedenom u normi.

Prora un prema Mononobe i Okabe-u je zapravo modifikacija Coulomb-ove teorije aktivnog klina gdje se seizmi ki efekti zamjenjuju pseudostati kom inercijalnom silom nastalom ubrzanjem mase tla i pripadaju ih optere enja iza zida uslijed djelovanja potresa. Time se dinami ka potresna sila pretvara u pseudostati ku silu, a sami postupak prora una potpornih zidova provodi u potpunosti jednako kao za sva ostala stati ka optere enja. Pri tome se klizna ploha pretpostavlja pravac usprkos injenici da je vjerojatnije neka zakrivljena linija. Postoji više radova na tu temu gdje se navode i prednosti i mane ovog pojednostavnjenog pristupa, me utim EN 1998-5 ga je prihvatio kao standard i kao takvog ga treba primjenjivati. Više o teoriji Mononobeovog i Okabeovog pristupa se može na i u radu [5].

Sukladno EN 1998-5 osnovni model pseudostati koga prora una mora se sastojati od potporne konstrukcije i njezinog temelja, od klina tla iza konstrukcije za kojeg se pretpostavlja da je u stanju aktivne grani ne ravnoteže (ako je konstrukcija dovoljno savitljiva), od dodatnih optere enja koja djeluju na klin tla i od mase tla u podnožju zida koja se pretpostavlja da je u stanju pasivne ravnoteže.

Da bi došlo do aktivnog stanja tla nužan je dovoljno velik pomak zida tijekom prora unskog potresa koji kod savitljivih konstrukcija može nastati savijanjem, a kod masivnih (gravitacijskih) konstrukcija klizanjem ili zaokretanjem. O pomaku zida potrebnom da do e do aktivnoga grani nog stanja je ve nešto re eno u poglavlju 2.2. ovog rada, a više se može vidjeti u samoj normi EN 1997-1.

Za krute konstrukcije kao što su podrumski zidovi ili masivni zidovi temeljeni na stijeni ili pilotima, umjesto prora una sa aktivnim tlakom tla prikladnije je pretpostaviti bo ni tlak mirovanja, o kojem je ve nešto re eno u poglavlju 2.2. ovog rada, a više se može na i u samoj normi EN 1997-1. Isto treba pretpostaviti i za usidrene potporne zidove ako pomak nije dopušten.

Nedostatak postupka putem Mononobeove i Okabeove formule je da izrazi vrijede samo za potporne zidove koji se mogu slobodno zaokretati ili pomicati i za koje se može ostvariti aktivni tlak tla (aktivni klin) iza zida. U svim drugim slu ajevima kao na primjeru potpornih zidova koji su temeljeni na stijeni i za koje je upitna mogu nosti zaokretanja ili pomicanja prikladnije je koristiti bo ni tlak mirovanja, a primjena Mononobeove i Okabeove formule je diskutabilna i normom nije dopuštena. U tom slu aju se kao što je ve spomenuto primjenjuju odredbe EN 1998-5, dio E.9.



Projektanti konstrukcija su esto u dilemi obzirom da su u praksi esti slu ajevi projektiranja potpornih zidova u uvjetima koji su na granici izme u onih gdje se može ostvariti aktivni tlak tla i gdje ne može. Isto direktno utje e na veli inu stati kih i seizmi kih sila te kona nici na same dimenzije potpornog zida. Primjer takvih potpornih zidova su zidovi koji su temeljeni na vrstoj stijeni i koji su djelomi no vezani za neke druge konstrukcije, a nisu sastavni dio podrumskih etaža nekog objekta. U tim slu ajevima norma nema izri ito rješenje te ostaje na projektantu da se odlu i za pristup kojim e osigurati adekvatnu sigurnost.

## 2.2 Pojednostavnjeni prora un seizmi kih sila prema EN 1998-5, dodatak E

Zid se op enito pri djelovanju potresa može pomaknuti translacijski, može se zarotirati oko donjeg ruba, zarotirati oko gornjeg ruba ili istovremeno doživjeti translaciju i rotaciju. Maksimalna sila od tlaka tla na zid uslijed potresa se obi no dogodi kad se zid pomakne ili rotira u smjeru zasipa iza zida (kad je inercijalna sila iza zida usmjerena u pravcu zasipa). Minimalna sila je u slu aju da se zid pomakne ili rotira u suprotnom smjeru od zasipa. Oblik raspodjele tlaka tla iza zida se mijenja kako se zid pomi e. Kao naj eš a metoda za odre ivanje dinami ke sile uslijed djelovanja potresa je metoda bo nog optere enja, takozvana pseudostati ka metoda.

Za zidove za koje se može ostvariti aktivni tlak tla iza zida dodatak E, norme EN 1998-5 daje Mononobeove i Okabeove izraze za odre ivanje koeficijenta tlaka tla koji se koriste za pojednostavljeni pseudostati ki pristup u kojem se dinami ka sila prera unava u stati ku silu. Prema toj teoriji tlo iza zida se ponaša kao kruto tijelo tako da se inercijalna sila jednostavno prora unava na temelju Newton-ovog zakona gdje je sila proizvod mase krutog tijela i akceleracije. Prema toj teoriji ukupna prora unska sila koja djeluje na potpornu konstrukciju na strani terena  $E_d$  prora unava se prema izrazu:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot K \cdot H^2 + E_{ws} + E_{wd} \quad (1)$$

gdje je:

$H$  visina zida

$E_{ws}$  stati ka sila vode

$E_{wd}$  hidrodinami ka sila vode (definirana dodatkom E norme EN 1998-5)

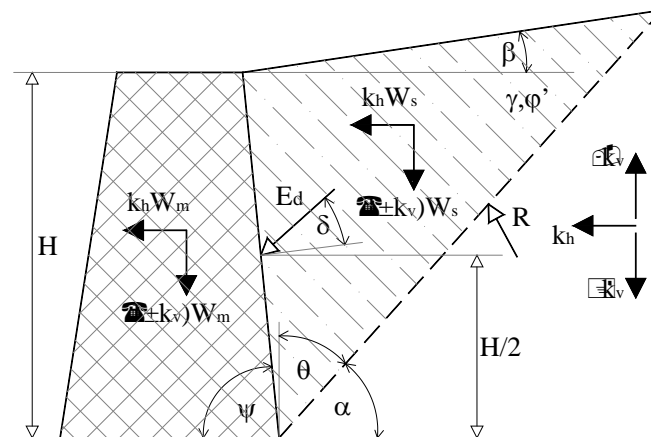
$\gamma$  zapreminska težina tla (dodatno definirana dodatkom E norme EN 1998-5)

$K$  koeficijent tlaka tla (stati ki + dinami ki)

$k_v$  potresni koeficijent za vertikalni smjer

Pri seizmi kom djelovanju seizmi ki val predaje konstrukciji i tlu iza konstrukcije horizontalno  $k_h$  i vertikalno  $k_v$  ubrzanje. Ovisno o smjeru nailaska seizmi kog vala, vertikalna komponenta ubrzanja može djelovati prema gore ili prema dolje. Pri tome se iza potpornog zida formira aktivni klin pod kutom u odnosu na vertikalnu. Iznos kuta ovisi o smjeru djelovanja horizontalnog i vertikalnog ubrzanja. S promjenom kuta mijenja se i težina aktivnog klina, pa sile na klin sustava djeluju kako je prikazano na slici 1. Kod prora una aktivnog seizmi kog tlaka na potporni zid, potrebno je izvršiti provjeru za slu aj kada vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema dolje i za slu aj kada vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema gore.

Za potporne konstrukcije zidova koji nisu masivni smiju se u inci vertikalnoga ubrzanja zanemariti.



Slika 1. Shema djelovanja seizmi kih sila prema Mononobe i Okabe teoriji

Potresni koeficijenti za horizontalni ( $k_h$ ) i vertikalni ( $k_v$ ) smjer kojima se množe sve mase uzimaju se prema izrazima:

$$k_h = \frac{\alpha \cdot S}{r} \quad (2)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h \quad \text{ako je } a_{vg}/a_g \text{ ve e od 0.6 (spektar TIP 1, } M_s > 5.5) \quad (3)$$

$$k_v = \pm 0.33 \cdot k_h \quad \text{u drugim slu ajevima (spektar TIP 2, } M_s \leq 5.5) \quad (4)$$

$$\alpha_g = \frac{a_g}{g} \quad (5)$$

gdje je:

$\alpha_g$  omjer prora unskog ubrzanja temeljnog tla  $a_{gR}$  za temeljno tlo tipa A i gravitacijskog ubrzanja  $g$

$S$  faktor tla definiran u normi EN 1998-1 (za tipove temeljnog tla od A do E ovisno od spektra odziva, tip 1 ili tip 2)

$r$  faktor za prora un potresnog koeficijenta za horizontalni smjer (parametar dozvoljenog pomaka konstrukcije), koji predstavlja faktor duktilnosti. Što je konstrukcija fleksibilnija (manje kruta i pomi na) faktor  $r$  je ve i i obratno.

$a_{gR}$  poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla za temeljno tlo tipa A (prema EN 1998-1 i nacionalnom dodatku za povratni period od 475 godina), odnosno prora unaska horizontalna akceleracija tla.

$a_g$  prora unsko ubrzanje temeljnog tla na temeljnom tlu tipa A ( $a_g = \beta \cdot a_{gR}$ )

$\beta$  faktor važnosti gravitacije prema EN 1998-1

$a_{vg}$  poredbeno vršno ubrzanje temeljnog tla u vertikalnom smjeru

Parametar  $r$  poprima vrijednosti navedene u tablici 1, sukladno normi EN 1998-5 ovisno o tipu potporne konstrukcije. Parametar  $r$  je ve i za zidove koji mogu podnijeti ve e pomake. Za zasi ena nekoherentna tla faktor ne smije biti ve i od 1.0.

Tablica 1. Vrijednosti faktora  $r$  u prora unu horizontalnog potresnog koeficijenta

Tip potporne konstrukcije	$r$
Slobodni masivni zidovi za koje je prihvatljiv pomak do $d_r = 300 \cdot S$ (mm)	2.0
Slobodni masivni zidovi za koje je prihvatljiv pomak do $d_r = 200 \cdot S$ (mm)	1.5
Savitljivi armiranobetonski zidovi, usidreni ili ukru eni zidovi, armiranobetonski zidovi temeljeni na vertikalnim pilotima, upeti podrumski zidovi i upornjaci mostova	1.0



Koeficijent tlaka tla se prema Mononobeovoj i Okabeovoj formuli izra unava prema niže navedenim izrazima. Za aktivna stanja:

ako je  $\beta < \varphi'_d - \theta_1$

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \varphi'_d - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \theta - \delta_d) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi'_d + \delta_d) \cdot \sin(\varphi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \cdot \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} \quad (6)$$

ako je  $\beta > \varphi'_d - \theta_1$

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \varphi - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \theta - \delta_d)} \quad (7)$$

Za pasivna stanja (nema posmi ne otpornosti izme u tla i zida):

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \varphi'_d - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi + \theta) \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin \varphi'_d \cdot \sin(\varphi'_d + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \beta) \cdot \sin(\psi + \theta)}} \right]^2} \quad (8)$$

gdje je:

$$\varphi'_d = \arctg \left( \frac{\gamma \varphi'}{\gamma_\varphi} \right) \text{ prora unska vrijednost kuta posmi ne otpornosti tla} \quad (9)$$

i kutovi nagiba stražnje plohe zida i površine nasipa prema horizontali prema slici 2.

Veli inu posmi nog naprezanja, koje se može iskoristiti na spojnoj površini zida i tla, treba odrediti s pomo u izraza:

$$\delta_d = \arctg \left( \frac{\gamma \delta}{\gamma_\varphi} \right) \text{ prora unska vrijednost kuta trenja izme u tla i zida} \quad (10)$$

$\delta_d = \varphi$  za zid betoniran na tlu

$\delta_d = \frac{2}{3} \varphi$  za montažni betonski element ili naknadno zasipavanje zida

$\delta_d = \beta$  na virtualnoj pole ini „L“ zida

Kut  $\theta$  se odre uje prema izrazu:

$$\operatorname{tg} \theta_{1,2} = \frac{k_h}{1 \pm k_v} \quad (11)$$

Kod prora una aktivnog seizmi kog tlaka na potporni zid potrebno je izvršiti provjeru za slu aj kada:

Vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema gore:

$$\operatorname{tg} \theta_{1,2} = \frac{k_h}{1 - k_v} \quad (12)$$



Vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema dolje:

$$\operatorname{tg}\theta_{1,2} = \frac{k_h}{1+k_v} \quad (13)$$



Slika 2. Dogovorni smjerovi kutova u izrazima za prora un koeficijenta tlaka zemlje

Ukupna prora unska sila rezultanta je sila statičkih i dinamičkih tlakova tla. Ukupna (statička i dinamička) prora unska sila sastoji se od statičke komponente aktivnog tlaka tla i dinamičke komponente djelovanja:

$$E_d = E_a + E_{pot} \quad (14)$$

pri čemu komponenta  $E_{pot}$  djeluje u polovini visine zida:

$$y_{pot} = \frac{1}{2} H$$

Za slučaj kada ukupna (statička i dinamička) prora unska sila djeluje prema gore:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 - k_v) \cdot K \cdot H^2 + E_{ws} + E_{wd} \quad (15)$$

$$E_{pot, \uparrow} = E_{d \uparrow} - E_{a, h}(P_{a, h}) \quad (16)$$

Za slučaj kada ukupna (statička i dinamička) prora unska sila djeluje prema dolje:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 + k_v) \cdot K \cdot H^2 + E_{ws} + E_{wd} \quad (17)$$

$$E_{pot, \downarrow} = E_{d \downarrow} - E_{a, h}(P_{a, h}) \quad (18)$$

Vertikalna komponenta potresa je obično zanemariva obzirom na mali kut  $\alpha_1$ . Trenje između nasipa i zida se obično usvaja nula radi sigurnosti ali isto nije pravilo. Komponenta sila  $E_{pot}$  djeluje na visini  $H/2$  od dna zida te se dodaje na silu aktivnog tlaka tla u seizmičkoj kombinaciji djelovanja za dokaz sigurnosti na prevrtanje i klizanje te dokaz nosivosti temeljnog tla.

Za slučaj pojave podzemne vode hidrodinamički tlak vode treba dodati hidrostatičkom tlaku. Mjesto djelovanja (hvatište) sile hidrodinamičkog tlaka vode smije se uzeti na dubini ispod zasićenog sloja na 60% visine takvog sloja.

Prema dodatku E, norme EN 1998-5 za krute konstrukcije koje su potpuno upete tako da ne može doći do aktivnog stanja u tlu i za vertikalni zid te horizontalni nasip, dodatna dinamička sila prouzročena tlakom zemlje smije se uzeti prema izrazu:

$$\Delta P_d = \alpha \cdot S \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (19)$$

gdje je  $H$  visina zida.

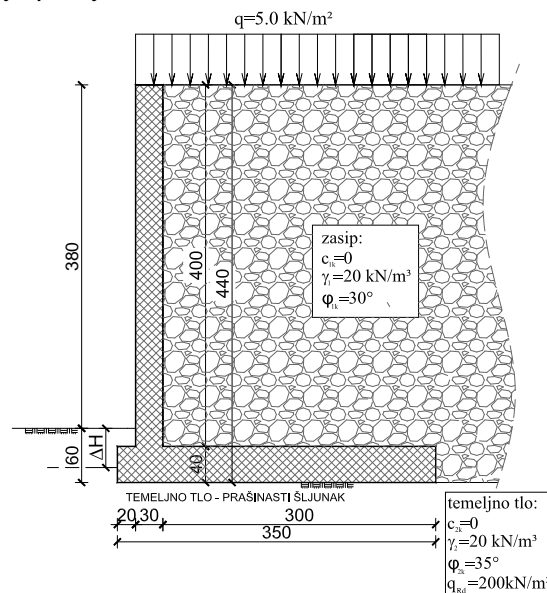
Točnije djelovanja dodatne dinamičke sile se uzima u polovini visine zida.



### 3. PRIMJER 1

#### 3.1 Podaci o potpornom zidu

Na primjeru konzolnog potpornog armiranobetonskog zida za dimenzije i optere enja prema slici 3 izvršen je geotehni ki i seizmi ki prora un kontrole stabilnosti na prevrtanje i klizanje te dokaz nosivosti temeljnog tla prema EN 1997-1. Odabran je projektni pristup 3 (komb. A2 + M2 + R3) prema EN 1997-1. Za potrebe ovog primjere pretpostavljeno je temeljno tlo prašinsti šljunak (GM), te da se zid naknadno zatrpava istim materijalom. Prora un na seizmi ki djelovanje izvršen je prema EN 1998-5 (dodatak E) koriste i pojednostavnjeni pseudostati ki pristup pri emu je koeficijent tlaka tla izra unat prema Mononobe i Okabe izrazima. S obzirom da je zid temeljen na stišljivom materijalu pretpostavka je da se zid može zakretati te da se može ostvariti aktivni tlak iza zida. Sila tlaka od tla i promjenjivog optere enja e se izra unati prema Rankine-ovoj teoriji. Pretpostavlja se da voda iza zida nije prisutna. Pasivni otpor tla se u prora unu zanemaruje s obzirom na malu dubinu ukapanja temelja. Na kraju primjera su dati kratki komentari rezultata prora una.



Slika 3. Geometrija potpornog zida i optere enja

Geometrijski parametri zida:

- neplanirani iskop  $H = \min\left(\frac{1}{10}H\right) = \min\left(\frac{1}{10}3.8\text{m}\right) = 0.38\text{m} \leq 0.5\text{m}$  usv.  $H = D_f = 0.60\text{m}$
- prora unska visina denivelacije  $H_d = H + H = 3.8\text{m} + 0.6\text{m} = 4.40\text{m}$
- ukupna visina zida:  $h = H + D_f = 3.80 + 0.6 = 4.40$  (m)
- širina pete zida:  $b = 3.5 - 0.20 - 0.30 = 3.00$  (m)

Promjenjivo optere enje se usvaja kao jednoliko raspodijeljeno optere enje u iznosu:  
 $q = 5.0 \text{ kN/m}^2$  (prometno djelovanje)

#### 3.2 Prora un potpornog zida na stati ka djelovanja

Parcijalni faktori za provjeru grani nog stanja dijelova gra evine (STR) i geotehni kog (GEO) grani nog stanja e se usvojiti prema tablici 2. Za odabrani projektni pristup 3 i kombinaciju





A2 + M2 + R3 e se izvršiti kontrola grani nog stanja ravnoteže (prevrtanje i klizanje) dokaz nosivosti temeljnog tla.

Tablica 2. Parcijalni faktori za grani na stanja STR i GEO prema EN 1997-1

(3) Parcijalni faktori djelovanja ( $x_F$ ) i u inka djelovanja ( $x_E$ )					
Djelovanja	simbol	A1	A2		
trajna nepovoljna	$X_{G,dst}$	1.35	1.0		
povoljna	$X_{G,stab}$	1.0	1.0		
promjenjiva nepovoljna	$X_{Q,dst}$	1.5	1.3		
povoljna	$X_{Q,stab}$	0	0		
(2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) ( $x_M$ )					
Svojstvo	simbol	M1	M2		
tangens efektivnog kuta trenja	$X_{\tan\phi'}$	1.0	1.25		
efektivna kohezija	$X_{c'}$	1.0	1.25		
težinska gusto a	$X_{\gamma}$	1.0	1.0		
(3) Parcijalni faktori otpora ( $x_R$ )					
Otpornost	simbol	R1	R2	R3	R4
Potporne konstrukcije nosivost	$X_{R;v}$	1.0	1.4	1.0	-
klizanje	$X_{R;h}$	1.0	1.1	1.0	-
otpor tla	$X_{R;e}$	1.0	1.4	1.0	-
prevrtanje	$X_R$	1.0	1.0	1.0	-

Projektne parametri  $c_d$  i  $\phi_d$ :

$$c_{1d} = \frac{c_{1k}}{c'} = \frac{0}{1.25} = 0 \text{ (kPa)}$$

$$\phi_{1d} = \arctan\left(\frac{\tan 30^\circ}{1.25}\right) = 24.79^\circ - \text{zasip}$$

$$c_{2d} = \frac{c_{2k}}{c'} = \frac{0}{1.25} = 0 \text{ (kPa)}$$

$$\phi_{2d} = \arctan\left(\frac{\tan 35^\circ}{1.25}\right) = 29.25^\circ - \text{temeljno tlo}$$

Za primjenu vertikalne virtualne ravnine zida širina pete zida mora zadovoljiti sljede i uvjet:

$$b \geq b_{\min} = H \cdot \tan\left(45^\circ - \phi_{1k}/2\right) = 4.40 \cdot \tan\left(45^\circ - 24.79^\circ/2\right) = 2.54 \text{ (m)} \Rightarrow \text{zadovoljava !}$$

$$3.0\text{m} > b_{\min} = 2.81\text{m}$$

Koeficijent aktivnog tlaka prema Rankine-u za projektne vrijednosti parametara posmi ne vrsto e:  $K_A = \tan^2\left(45^\circ - \phi_{1d}/2\right) = \tan^2\left(45^\circ - 24.79^\circ/2\right) = 0.409$

Napomena:  $K_A$  je izra unat sa prora unskom vrijednoš u kuta trenja tla iza zida.

Na slici 4 je prikazana prora unska shema i raspodjela optere enja na zid za stati ka djelovanja.

Horizontalna sila aktivnog tlaka od tla:

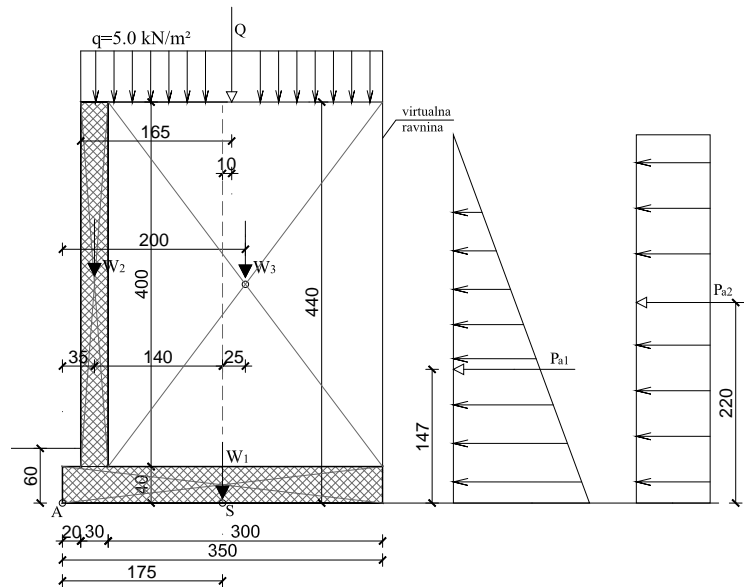
$$P_{a1} = \gamma_1 \cdot h \cdot K_A \cdot h \cdot 0.5 = 20.0 \cdot 4.40^2 \cdot 0.409 \cdot 0.5 = 79.20 \text{ (kN/m')}$$

Horizontalna sila aktivnog tlaka od promjenjivog djelovanja:

$$P_{a2} = q \cdot h \cdot K_A = 5.0 \cdot 4.40 \cdot 0.409 = 9.0 \text{ (kN/m')}$$

Vertikalna sila od dodatnog (promjenjivog) optere enja:

$$Q = q \cdot (B - x) = 5.0 \cdot (3.5 - 0.20) = 16.5 \text{ (kN/m')}$$



Slika 4. Shema optere enja na potporni zid za stati ka djelovanja

Težina zida podijeljenog na elemente ( $\gamma_{bet} = 25 \text{ kN/m}^3$ ) i zasipa iza zida ( $\gamma_1 = 20 \text{ kN/m}^3$ ):

$$W_1 = 3.5 \cdot 0.4 \cdot 25 = 35.0 \text{ (kN/m)}$$

$$W_2 = 4.0 \cdot 0.30 \cdot 25 = 30.0 \text{ (kN/m)}$$

$$W_3 = 3.0 \cdot 4.0 \cdot 20 = 240.0 \text{ (kN/m)}$$

### Prora un stabilnosti na prevrtanje oko to ke A (GEO/STR)-PP3, komb. A2 + M2 + R3

Faktor sigurnosti na prevrtanje se definira kao odnos momenata svih sila oko to ke A koje zadržavaju zid da se ne prevrne, prema momentu svih sila koje prevr u konstrukciju.

$$E_d \leq R_d$$

$$E_d = (1.0 \cdot P_{a1}) \cdot \frac{1}{3} \cdot h + (1.3 \cdot P_{a2}) \cdot h/2 = (1.0 \cdot 79.20) \cdot \frac{1}{3} \cdot 4.40 + 1.3 \cdot 9.0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.40 = 136.75 \text{ kNm/m}$$

$$R_d = 1.0 \cdot \sum W_i \cdot e_i = 1.0 \cdot (35 \cdot 1.75 + 30.0 \cdot 0.35 + 240.0 \cdot 2.0) = 551.75 \text{ kNm/m}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 (\%) = \frac{136.75}{551.75} \cdot 100 = 24.78\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava! ili } F_{Sp} = \frac{551.75}{136.75} = 4.04 \geq 1.0$$

### Dokaz nosivosti temeljnog tla (GEO-PP3)

Prora unske sile  $V_d$ ,  $H_d$  i moment  $M_d$  oko to ke S (to ka u sredini temeljne stope):

$$V_d = \gamma_{G,dst} \cdot \sum W_i + \gamma_{Q,dst} \cdot Q = 1.0 \cdot (35.0 + 30.0 + 240.0) = 305.0 \text{ (kN/m')}$$

$$H_d = \gamma_{G,dst} \cdot P_{a1} + \gamma_{Q,dst} \cdot P_{a2} = 1.0 \cdot 79.20 + 1.3 \cdot 9.0 = 90.90 \text{ (kN/m')}$$

$$M_{d,S} = 1.0 \cdot 79.20 \cdot 1/3 \cdot 4.40 + 1.3 \cdot 9.0 \cdot 1/2 \cdot 4.40 + 1.0 \cdot 30.0 \cdot 1.4 - 1.0 \cdot 240.0 \cdot 0.25 = 183.90 - 60.0 = 123.9 \text{ kNm/m}$$



Ekscentricitet sile  $V_d$ :

$$e_B = \frac{M_{d,S}}{V_d} = \frac{123.9}{305} = 0.406 \text{ (m)} < \frac{B}{3} = \frac{3.5}{3} = 1.17 \text{ (m)}$$

$$B' = B - 2 \cdot e_B = 3.5 - 2 \cdot 0.406 = 2.688 \text{ (m)}$$

Traka ( $L' = \infty$ ),  $A' = B' \cdot 1m' = 2.688 \text{ (m}^2\text{)}$ ;  $q_{Rd} = 200.0 \text{ (kPa)}$  (za potrebe primjera)

Kontrola otpornosti temeljnog tla:

$$E_d \leq R_d; V_d \leq q_{Rd} \cdot A'; 305.0 < 537.6 \Rightarrow \text{zadovoljava}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 \text{ (%) } = \frac{305.0}{537.6} \cdot 100 = 56.73\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

### Prora un stabilnosti na klizanje (GEO-PP3)

Prora unske sile  $V_d$ ,  $H_d$ :

$$V_d = 305.0 \text{ (kN/m')}, H_d = 90.9 \text{ (kN/m')}$$

Kontrola stabilnosti na klizanje:

$$E_d \leq R_d, H_d \leq V_d \cdot \text{tg}\delta \cdot \frac{1}{\gamma_{Rh}}$$

$$\delta = k \cdot \varphi_{2d}$$

$k=2/3$  – za prefabricirane elemente (pre-cast)

$k=1$  – betoniranje in-situ (cast-in-place)

$$\delta = 1 \cdot 29.25^\circ = 29.25^\circ$$

$$90.9 \leq 305.0 \cdot \text{tg}29.25^\circ \cdot \frac{1}{1.0} \Rightarrow 90.9 < 305.0 \cdot 0.56 = 170.81 \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 \text{ (%) } = \frac{90.9}{170.81} \cdot 100 = 53.22\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

Faktor sigurnosti:

$$F_{S_k} = \frac{T_{moguće}}{T_{potrebno}} = \frac{V_d \cdot \text{tg}\delta \cdot 1/\gamma_{Rh}}{H_d} = \frac{170.81}{90.9} = 1.88 > 1.0 \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

### **3.3 Prora un potpornog zida na seizmi ka djelovanja**

Prora un potpornog zida na seizmi ko djelovanje e se provesti prema odredbama EN 1998-5, dodatak E. Vrijednosti parcijalnih faktora za izvanredne okolnosti (u koje se može svrstati i potresno djelovanje) prema EN 1997-1 iznose 1.0. Samo se kod prora una otpora (nosivost tla ispod temelja) upotrebljava prora unski pristup 3 gdje su parcijalni faktori svojstva materijala ve i. U tablici 3 su dati parcijalni faktori za seizmi ko djelovanje, a u tablici 4 parcijalni faktori kod prora una nosivosti tla ispod temelja gdje se upotrebljava PP3 sukladno usvojenom prora unskom pristupu u sklopu ovog primjera.



Tablica 3. Parcijalni faktori za seizmi ko djelovanje prema EN 1997-1

(1) Parcijalni faktori djelovanja ( $x_F$ ) i u inka djelovanja ( $x_E$ )		
Djelovanja	simbol	A
trajna nepovoljna	$X_{G,dst}$	1.0
povoljna	$X_{G,stb}$	1.0
promjenjiva nepovoljna	$X_{Q,dst}$	1.0
povoljna	$X_{Q,stb}$	0
(2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) ( $x_M$ )		
Svojstvo	simbol	M
tangens efektivnog kuta trenja	$X_{\tan\phi'}$	1.0
efektivna kohezija	$X_{c'}$	1.0
težinska gusto a	$X_{\gamma}$	1.0
(3) Parcijalni faktori otpora ( $x_R$ )		
Otpornost	simbol	R
Potporne konstrukcije nosivost	$X_{R,v}$	1.0
klizanje	$X_{R,h}$	1.0
otpor tla	$X_{R,e}$	1.0
prevrtanje	$X_R$	1.0

Tablica 4. Parcijalni faktori za dokaz nosivosti tla ispod temelja prema EN 1997-1

(2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) ( $x_M$ )		
Svojstvo	simbol	M
tangens efektivnog kuta trenja	$X_{\tan\phi'}$	1.25
efektivna kohezija	$X_{c'}$	1.25
težinska gusto a	$X_{\gamma}$	1.0

Karakteristike zasipnog materijala iza konstrukcije:

- $\gamma_1 = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>) - jedini na težina tla
- $\phi_{1k} = 30^\circ$  - karakteristi na vrijednost kuta unutarnjeg trenja
- $c_{1k} = 0$  (kPa) - karakteristi na vrijednost kohezije
- $\beta = 0^\circ$  - nagib terena iza zida
- $\theta = 0^\circ$  - kut nagiba stražnje plohe zida
- $\delta_{1k} = 2/3\phi_{1k} = 0^\circ$  - kut trenja izme u zida i tla se usvaja nula

Karakteristike temeljnog tla:

- $\gamma_2 = 20.0$  (kN/m<sup>3</sup>) - jedini na težina tla
- $\phi_{2k} = 35^\circ$  - karakteristi na vrijednost kuta unutarnjeg trenja
- $c_{2k} = 0$  (kPa) - karakteristi na vrijednost kohezije
- $q_{Rd} = 200.0$  (kN/m<sup>2</sup>) - prora unska nosivost temeljnog tla (za potrebe primjera)

Projektni parametri  $c_d$  i  $\phi_d$ :

$$c_{1d} = \frac{c_{1k}}{c'} = \frac{0}{1.0} = 0 \text{ (kPa)}$$

$$\phi_{1d} = \arctan\left(\frac{\tan 30^\circ}{1.0}\right) = 30.0^\circ - \text{zasip}$$

$$c_{2d} = \frac{c_{2k}}{c'} = \frac{0}{1.25} = 0 \text{ (kPa)}$$

$$\phi_{2d} = \arctan\left(\frac{\tan 35^\circ}{1.25}\right) = 29.25^\circ - \text{temeljno tlo}$$

Koeficijent aktivnog tlaka prema Rankine-u za projektne vrijednosti parametara posmi ne vrsto e:  $K_A = \tan^2\left(45^\circ - \phi_{1d}/2\right) = \tan^2\left(45^\circ - 30.0^\circ/2\right) = 0.333$

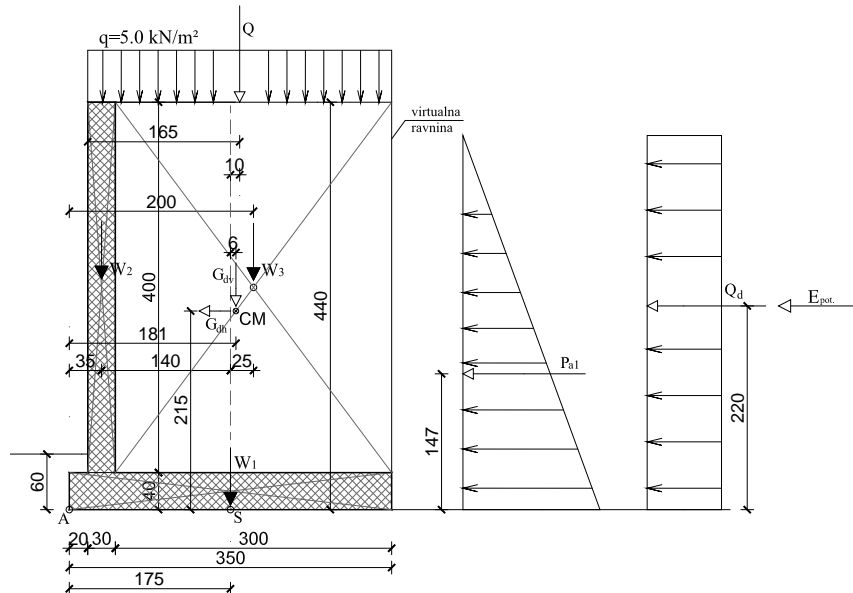
Napomena:  $K_A$  je zapravo izra unat sa karakteristi nom vrijednoš u kuta trenja tla iza zida pošto je parcijalni faktor 1.0.



Horizontalna sila aktivnog tlaka od tla:

$$P_{a1} = \gamma_1 \cdot h \cdot K_A \cdot h \cdot 0.5 = 20.0 \cdot 4.40^2 \cdot 0.333 \cdot 0.5 = 64.50 \text{ (kN/m')}$$

Na slici 5 je prikazana prora unska shema zida i raspodjela optere enja na zid za stati ka i seizmi ka djelovanja.



Slika 5. Shema optere enja na potporni zid za stati ka i seizmi ka optere enja

### Stalno djelovanje:

Vlastita težina potpornog zida

$$G_u = 35 + 30 + 240 = 305.0 \text{ (kN/m')} - \text{ ukupna težina betona i zasipa}$$

Težište mase betona i nasipa (u odnosu na to ku A):

$$x_{G_u} = \frac{\sum x_i \cdot W_i}{G_u} = \frac{(35.0 \cdot 1.75 + 30.0 \cdot 0.35 + 240.0 \cdot 2.0)}{305.0} = \frac{551.75}{305.0} = 1.809\text{m}$$

$$y_{G_u} = \frac{\sum y_i \cdot W_i}{G_u} = \frac{(35.0 \cdot 0.20 + 30.0 \cdot 2.40 + 240.0 \cdot 2.40)}{305.0} = \frac{655.0}{305.0} = 2.148\text{m}$$

CM(1.809m; 2.148m) - centar mase zida i zasipa u odnosu na to ku A

### Horizontalno ubrzanje podloge:

$$\alpha_g = \frac{a_g}{g} = 0.20 \text{ za povratni period 475 god., temeljno tlo tip C prema EN 1998-1, dio 3.}$$

$a_g$  - prora unsko ubrzanje

$$k_h = \frac{\alpha \cdot S}{r} = \frac{0.20 \cdot 1.15}{2} = 0.115; \quad k_v = 0.5 \cdot k_h = 0.5 \cdot 0.10 = 0.058$$

Seizmi ka inercijalna sila (djelovanje na masu betonskog zida i zasipa  $W_1$ - $W_3$ ):

$$G_{dh} = k_h \cdot G_u = 0.115 \cdot 305.0 = 35.08 \text{ (kN/m')}$$

$$G_{dv} = k_v \cdot G_u = 0.058 \cdot 305.0 = 17.70 \text{ (kN/m')}$$



Aktivni seizmi ki tlak tla na potporni zid:

Ukupna prora unska sila koja djeluje na potpornu konstrukciju na strani terena  $E_d$  dana je izrazom prema EN 1998-5, dodatak E.3:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot K \cdot H^2 + E_{ws} + E_{wd}$$

$$E_{ws} = 0$$

$$E_{wd} = 0$$

Koeficijent tlaka tla zemlje se može prora unati iz Mononobeove i Okabeove formule (prema EN 1998-5, dodatak E, dio E.4).

$$\text{tg}\theta_{1,2} = \frac{k_h}{1 \pm k_v} = \frac{0.115}{1 \pm 0.058}$$

$$\text{tg}\theta_{1,2} = 0.109/0.122$$

$$\theta_{1,2} = 6.22^\circ / 6.96^\circ$$

$\psi = 90^\circ$  - kut nagiba površine zida u odnosu na horizontalu – zid je vertikaln !

$$\text{a) } \text{tg}\theta_1 = 0.109$$

Vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema dolje !

$$\theta_1 = 6.22^\circ; \delta = 0$$

$(\beta = 0) \leq (\varphi'_d - \theta_1 = 30^\circ - 6.22^\circ = 23.78^\circ) \rightarrow$  koeficijent tlaka tla iznosi:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \varphi'_d - \theta_1)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \theta_1 - \delta_d) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi'_d + \delta_d) \cdot \sin(\varphi'_d - \beta - \theta_1)}{\sin(\psi - \theta_1 - \delta_d) \cdot \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} = 0.402$$

$$\text{b) } \text{tg}\theta_2 = 0.122$$

Vertikalno ubrzanje  $k_v$  djeluje prema gore !

$$\theta_2 = 6.96^\circ; \delta = 0$$

$(\beta = 0) \leq (\varphi'_d - \theta_2 = 30^\circ - 6.96^\circ = 23.04^\circ) \rightarrow$  koeficijent tlaka tla iznosi:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \varphi'_d - \theta_2)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi - \theta_2 - \delta_d) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi'_d + \delta_d) \cdot \sin(\varphi'_d - \beta - \theta_2)}{\sin(\psi - \theta_2 - \delta_d) \cdot \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} = 0.412$$

Slu aj A) Ukupna (stati ka i dinami ka) prora unska sila PREMA DOLJE iznosi:

$$\theta_1 = 6.22^\circ; K = 0.402; H = 4.40\text{m}; k_v = 0.058$$

$$E_{d\downarrow} = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot (1 + 0.058) \cdot 0.402 \cdot 4.40^2 = 82.34 \text{ (kN/m')}$$

$$E_{d,h\downarrow} = E_{d\downarrow} \cdot \cos \theta_1 = 82.34 \cdot \cos 6.22^\circ = 82.34 \cdot 0.994 = 81.84 \text{ (kN/m')}$$

$$E_{d,v\downarrow} = E_{d\downarrow} \cdot \sin \theta_1 = 82.34 \cdot \sin 6.22^\circ = 82.34 \cdot 0.108 = 8.89 \text{ (kN/m')}$$

Radi jednostavnosti prora una vertikalna komponenta potresa je zanemarena s obzirom na mali kut  $\theta_1$ .



Ukupna (stati ka i dinami ka) prora unska sila sastoji se od stati ke komponente aktivnog tlaka tla (za  $K_A=0.333$ ) i dinami ke komponente djelovanja:

$$E_d = E_a + E_{pot}$$

Dinami ka sila iznosi:  $E_{pot,h,\downarrow} = E_{d,h\downarrow} - P_{a1} = 81.84 - 64.50 = 17.34 \text{ (kN/m')}$

Dinami ka sila djeluje na visini  $H/2$  od dna zida.

$$y_{pot} = \frac{1}{2} h = \frac{1}{2} \cdot 4.04 \text{ m} = 2.02 \text{ m}$$

Slu aj B) Ukupna (stati ka i dinami ka) prora unska sila PREMA GORE iznosi:

$$\theta_2 = 6.96^\circ; K = 0.412; H = 4.40 \text{ m}; k_v = 0.058$$

$$E_{d\uparrow} = \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot (1 - 0.058) \cdot 0.412 \cdot 4.40^2 = 75.14 \text{ (kN/m')}$$

$$E_{d,h\uparrow} = E_{d\uparrow} \cdot \cos \theta_2 = 75.14 \cdot \cos 6.96^\circ = 75.14 \cdot 0.993 = 74.61 \text{ (kN/m')}$$

$$E_{d,v\uparrow} = E_{d\uparrow} \cdot \sin \theta_2 = 75.14 \cdot \sin 6.96^\circ = 75.14 \cdot 0.121 = 9.09 \text{ (kN/m')}$$

Radi jednostavnosti prora una vertikalna komponenta potresa je zanemarena s obzirom na mali kut  $\theta_2$ .

Dinami ka sila iznosi:

$$E_{pot,h\uparrow} = E_{d,h\uparrow} - P_{a1} = 74.61 - 64.50 = 10.11 \text{ (kN/m')}$$

Dinami ka sila djeluje na visini  $H/2$  od dna zida.

$$y_{pot} = \frac{1}{2} h = \frac{1}{2} \cdot 4.04 \text{ m} = 2.02 \text{ m}$$

Aktivni seizmi ki tlak tla uslijed djelovanja promjenjivog optere enja na površini nasipa iza potpornog zida

Za potrebe ovog primjera pretpostavlja se da je prometno optere enje, postotak optere enja se uzima prema normi EN 1990 ovisno od karaktera promjenjivog djelovanja. U seizmi koj kombinaciji se uzima 30% veli ine promjenjivog djelovanja  $q=5.0 \text{ kN/m}^2$  za potresnu masu. Radi jednostavnosti prora una s obzirom na mali kut  $\theta_2$ , seizmi ka sila od promjenjivog djelovanja se ne e razlu ivati na horizontalnu i vertikalnu komponentu. Za daljnji prora un e se izra unate sile usvojiti kao horizontalne.

Za slu aj A)  $K=0.402$  – DJELOVANJE PREMA DOLJE

$$Q_d = Q_{dh\downarrow} = \psi \cdot q \cdot h \cdot (1 + k_v) \cdot K = 0.3 \cdot 5.0 \cdot 4.40 \cdot (1 + 0.058) \cdot 0.402 = 2.81 \text{ (kN/m')}$$

Za slu aj B)  $K=0.412$  – DJELOVANJE PREMA GORE

$$Q_d = Q_{dh\uparrow} = \psi \cdot q \cdot h \cdot (1 - k_v) \cdot K = 0.3 \cdot 5.0 \cdot 4.40 \cdot (1 - 0.058) \cdot 0.412 = 2.56 \text{ (kN/m')}$$

Sila od promjenjivog optere enja djeluje na polovici visine zida ( $h/2$ ).

Seizmi ka prora unska kombinacija za prora un potpornog zida

$$S_{sd} = \sum_i G_{k,i} + \sum_i (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) + \gamma_i \cdot A_d + P_k$$

$$\psi_2 = 0.3 \text{ promjenjivo djelovanje (prometno)}$$

$$\gamma_i = 1.0 \text{ (faktor važnosti gra evine, prema EN 1998-1)}$$



Napomene:

\* vertikalna i horizontalna sila od stalnog djelovanja i aktivnog tlaka od tla se množe sa faktorom 1.0 (za povoljno i nepovoljno djelovanje).

\* vertikalna sila od promjenjivog djelovanja povoljno djeluje pa se u daljnjim prora unima uzima sa nula, dok se horizontalna komponenta množi sa faktorom 1.0 obzirom da djeluje nepovoljno.

\* horizontalna i vertikalna sila od seizmi kog djelovanja se množe sa faktorom 1.0 ako djeluju nepovoljno, odnosno sa nula ako djeluju povoljno.

### Kontrola stabilnosti na prevrtanje oko to ke A (SEIZMI KA KOMBINACIJA –slu aj A)

$$E_d \leq R_d$$

$$E_d = (1.0 \cdot G_{dh}) \cdot y_{Gu} + (1.0 \cdot P_{a1}) \cdot \frac{1}{3} \cdot h + (1.0 \cdot E_{pot.,h\downarrow}) \cdot \frac{1}{2} \cdot h + (1.0 \cdot Q_{dh\downarrow}) \cdot h/2$$

$$E_d = (1.0 \cdot 35.08) \cdot 2.148 + (1.0 \cdot 64.5) \cdot \frac{1}{3} \cdot 4.40 + (1.0 \cdot 17.34) \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.40 + (1.0 \cdot 2.81) \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.40 = 214.11 \text{ kNm/m}$$

$$R_d = \sum W_i \cdot e_i + (1.0 \cdot G_{dv}) \cdot x_{Gu} = 1.0 \cdot (35 \cdot 1.75 + 30.0 \cdot 0.35 + 240.0 \cdot 2.0) + 1.0 \cdot 17.7 \cdot 1.809 = 583.77 \text{ kNm/m}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 (\%) = \frac{214.11}{583.77} \cdot 100 = 36.68\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava! ili } F_{Sp} = \frac{583.77}{214.11} = 2.72 > 1.0$$

### Dokaz nosivosti temeljnog tla (SEIZMI KA KOMBINACIJA -slu aj A)

Prora unske sile  $V_d$ ,  $H_d$  i moment  $M_d$  oko to ke S (to ka u sredini temeljne stope):

$$V_d = \gamma_{G,dst} \cdot \sum W + \gamma_{G,dst} \cdot G_{dv} = 35.0 + 30.0 + 240.0 + 17.70 = 322.70 \text{ (kN/m')}$$

$$H_d = \gamma_{G,dst} \cdot P_{a1} + \gamma_{Q,dst} \cdot E_{pot.,h\downarrow} + \gamma_{Q,dst} \cdot G_{dh} + \gamma_{Q,dst} \cdot Q_{dh\downarrow} = 1.0 \cdot 64.50 + 1.0 \cdot 17.34 + 1.0 \cdot 35.08 + 1.0 \cdot 2.81 = 119.73 \text{ (kN/m')}$$

$$M_{d,S} = 1.0 \cdot 64.5 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4.40 + 1.0 \cdot 17.34 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.40 + 1.0 \cdot 35.08 \cdot 2.148 + 1.0 \cdot 2.81 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.40 - 17.17 \cdot 0.06 - 1.0 \cdot (35.0 \cdot 0 + 30.0 \cdot 1.4 + 240.0 \cdot 0.25) = 111.25 \text{ kNm/m'}$$

Ekscentricitet sile  $V_d$ :

$$e_B = \frac{M_{d,S}}{V_d} = \frac{111.25}{322.70} = 0.345 \text{ (m)} < \frac{B}{3} = \frac{3.5}{3} = 1.17 \text{ (m)} \quad 19.73 \text{ (kN)}$$

$$B' = B - 2 \cdot e_B = 3.5 - 2 \cdot 0.345 = 2.81 \text{ (m)}$$

Traka ( $L' = \infty$ ),  $A' = B' \cdot 1 \text{ m}' = 2.81 \text{ (m}^2\text{)}$ ,  $q_{Rd} = 200.0 \text{ (kPa)}$

Kontrola za nosivost tla:

$$E_d \leq R_d, V_d \leq q_{Rd} \cdot A', 322.70 < 562.0 \Rightarrow \text{zadovoljava}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 (\%) = \frac{322.7}{562.0} \cdot 100 = 57.42\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

### Prora un stabilnosti na klizanje (SEIZMI KA KOMBINACIJA-slu aj A)

Prora unske sile  $V_d$ ,  $H_d$ :

$$V_d = 322.70 \text{ (kN/m')}, H_d = 119.73 \text{ (kN/m')}$$

Kontrola stabilnosti na klizanje (K1):





$$E_d \leq R_d, H_d \leq V_d \cdot \text{tg}\delta \cdot \frac{1}{\gamma_{Rh}} \Rightarrow 119.73 \leq 322.70 \cdot \text{tg}29.25^\circ \cdot \frac{1}{1.0} \Rightarrow 119.73 < 180.72 \Rightarrow \text{zadovoljava}$$

Iz uvjeta stabilnosti može se izraziti i stupanj iskorištenosti kao:

$$U = \frac{E_d}{R_d} \cdot 100 (\%) = \frac{119.73}{180.72} \cdot 100 = 66.25\% < 100\% \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

$$\text{Faktor sigurnosti: } F_{S_k} = \frac{T_{\text{moguće}}}{T_{\text{potrebno}}} = \frac{V_d \cdot \text{tg}\delta \cdot 1/\gamma_{Rh}}{H_d} = \frac{180.72}{119.73} = 1.51 > 1.0 \Rightarrow \text{zadovoljava!}$$

Kontrola stabilnosti na prevrtanje oko to ke A, dokaz otpornosti temeljnog tla, prora un stabilnosti na klizanje – slu aj B)

Djelovanje potresa PREMA GORE – slu aj B u sklopu ovog primjera se ne e analizirati radi opsežnosti prora una. Vrijednost seizmi ke horizontalne komponente sile  $E_{\text{pot,h}}$  ima manju vrijednost od slu aja A. Ina e za slu ajeve u praksi treba sprovesti i dokaz za djelovanje potresa prema gore. Osobito može imati utjecaja na sigurnost na klizanje.

## 5. ZAKLJU CI

Na temelju prikazane teorijske podloge te primjera prora una potpornog zida prema Europskim propisima mogu se izvesti slijede i zaklju ci:

- Potporni zidovi su dosta este konstrukcije u praksi i prakti no nema projektanta konstrukcija koji se nije susreo s njima u nekom obliku.
- Prora un potpornih zidova prema Europskim propisima zahtijeva primjenu više normi vezanih za geotehniku, potresno inženjerstvo i nosive konstrukcije što ukazuje na složenost problematike projektiranja istih.
- Za ispravan prora un potpornih konstrukcija u geotehni kom smislu nužni su adekvatni parametri tla, a geotehni ki istražni radovi trebaju biti sukladni zahtjevima normi po kojima se vrši prora un.
- Odabir projektnog pristupa tako er utje e na faktore sigurnosti konstrukcije. Oni se razlikuju u na inu na koji raspodjeljuju parcijalne faktore na djelovanja, u inke djelovanja, svojstva gradiva i otpornosti. To je djelomi no radi razli itih pristupa na inu na koji se u obzir uzimaju nesigurnosti u oblikovanju u inaka djelovanja i otpornosti. Svaka država svojim nacionalnim dodatkom definira primjenu prora unskog pristupa.
- Primjena Europskih normi uvodi i prora un potpornih zidova na seizmi ka djelovanja. Na prakti nim primjerima u sklopu ovog rada prikazani su seizmi ki prora uni prema Europskoj normi EN 1998-5 i to prema pojednostavnjenom postupku. Prora unom je vidljivo da seizmi ke sile nisu zanemarive te ih treba uzeti u obzir.
- Za adekvatnu primjenu EN 1998-5 prvenstveno je potrebna karta seizmi kih ubrzanja kao ulazni podatak za optere enja koji svaka država treba donijeti na nacionalnoj razini.
- Europska norma je definirala pojednostavljene pristupe prora unu seizmi kih sila. Izrazi Mononobe i Okabe za fleksibilne konstrukcije te poseban izraz za krute konstrukcije su dva krajnja slu aja koje definira norma EN 1998-5, dodatak E. Me utim norma isto tako omogu ava i to nije prora une sila od potresa, kao što je prava dinami ka analiza. To nost takvih prora una ponajviše ovisi od to nosti ulaznih podataka, pa recimo za definirati seizmi ko optere enje potrebno je više realnih zapisa ubrzanja podloge uslijed potresa. To je obi no na našim podru jima nedostupno, a ako se uzme u obzir da su za isto potrebni i složeni numeri ki



prora uni te visok nivo poznavanja materije (geotehnika, konstrukcije, numeri ke metode modeliranja materijala i konstrukcija te poznavanje mogu nosti alata/software) o igledno je da sve podosta usložnjava primjenu u praksi.

- Ovisno da li se zid može zakretati ili ne, razli iti su pristupi odre ivanja seizmi kih sila. Sile koje daju ti izrazi imaju znatne razlike u veli inama sila što direktno utje e na faktor sigurnosti potporne konstrukcije.
- Prilikom projektiranja u praksi i tuma enju EN 1997-1 itekako treba biti oprezan iza vida procjene da li se iza potpornog zida može ostvariti aktivni tlak tla ili ne. Razlike u silama, ukoliko se primjeni koeficijent tlaka mirovanja su znatno ve e.
- Prema EN 1997-1 prora un nosivosti temeljnog tla se vrši prema teoriji grani nih stanja uvode i parcijalne faktore ovisno od odabranog prora unskog pristupa (1,2,3). Prora un naprezanja se ne provodi, ve se na temelju ekscentriciteta izra una reducirana površina temelja (u tlaku) i uspore uje se sa prora unskom nosivoš u temeljnog tla. Pri tome se prora unaska nosivost temeljnog tla odre uje za svaki slu aj zasebno, a ne generalno na razini cijelog projekta kao što je esta projektantska praksa.
- Prora un potpornih zidova od armiranog betona podrazumijeva i dimenzioniranje presjeka zida i temelja za krajnje grani no stanje (nosivost) i grani no stanje uporabljivosti (pomaci, pukotine).
- Imaju i u vidu dosadašnja iskustva primjene Europskih normi na konkretnim projektima u drugim državama (primjerice u Hrvatskoj) pokazalo je da su se dimenzije potpornih zidova pove ale u odnosu na zahtjeve bivših JUS propisa.
- Po etkom stupanja na snagu Europskih normi u Bosni i Hercegovini projektanti e imati obavezu primjenjivati sve zahtjeve normi što e u slu aju potpornih zidova imati znatan utjecaj na pove anje opsega prora una potpornih zidova, a tako er i pove anja dimenzija potpornih zidova, odnosno poskupljenja izrade istih.

## 6. LITERATURA

- [1] Eurocode 7: Geotehni ko projektiranje – 1. dio: Op a pravila (EN 1997-1:2004).
- [2] Eurocode 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 5. dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehni ka pitanja (EN 1998-5:2004).
- [3] Eurocode 8:Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Op a pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004).
- [4] Okabe S. General theory on earth pressure and seismic stability of retaining walls and dams. J Jpn Soc Civil Eng 1924;10(6):1277–323.
- [5] Mylonakis G., Kloukinas P., Papantonopoulos C., An alternative to the Mononobe – Okabe equations for seismic earth pressures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27 (2007) 957–969.