

DIMENSIONIRANJE ARMIRANOBETONSKOG POTPORNOG ZIDA I OBALNOG ZIDA T- PRESJEKA PREMA EUROKODU 7

DESIGN OF T-SHAPED REINFORCED CONCRETE RETAINING WALL AND SEAWALL ACCORDING TO EUROCODE 7

Maja Kekez*, Nino Krvavica*

Sažetak

Rad prikazuje primjer dimenzioniranja armiranobetonskog (AB) potpornog zida i obalnog zida T-presjeka prema Eurokodu 7 (EC7). Ciljevi su: a) u okviru Proračunskog pristupa 3 (PP3), koji se primjenjuje u Hrvatskoj, ispitati osjetljivost rezultata provjera stabilnosti pri različitom razgraničenju konstrukcijskih i geotehničkih djelovanja te odgovarajućoj primjeni parcijalnih koeficijenata; i b) usporediti stabilnost potpornog i obalnog zida istih dimenzija. Nakon teorijskog pregleda EC7 i PP3, proveden je proračun AB T-zida za više varijanti definiranja djelovanja i uspoređeni rezultati provjera klizanja, prevrtanja i nosivosti temeljnog tla. Na kraju se uspoređuju dobiveni omjeri iskorištenja za potporni i obalni T-zid kako bi se pokazao utjecaj djelovanja mora (hidrostatskog tlaka i uzgona) na proračun.

Ključne riječi: Eurokod 7, proračunski pristupi, potporni zid, obalni zid, parcijalni koeficijenti, geotehnička djelovanja

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: mkekez@student.uniri.hr; nino.krvavica@uniri.hr

Abstract

This paper presents a practical example for the design of a reinforced-concrete (RC) T-section retaining wall and a T-section seawall in accordance with Eurocode 7 (EC7). The objectives are: a) in the context of Design Approach 3 (DA3), which is applied in Croatia, examine the sensitivity of stability verifications with respect to different classifications of structural and geotechnical actions and to where the corresponding partial factors are applied, and b) to compare the stability of retaining and seawalls of identical geometry. After a brief overview of EC7 and DA3, design calculations are carried out for an RC T-wall under several alternative definitions of actions, and the results of the sliding, overturning, and foundation bearing capacity checks are compared. Finally, the obtained utilization ratios for the retaining and seawall T-walls are compared to highlight the influence of seawater actions (hydrostatic pressure and uplift) on the design.

Key words: Eurocode 7, design approach, retaining wall, seawall, partial factors, geotechnical loads

1. Uvod

Potporni zidovi u geotehničkom inženjerstvu služe za zadržavanje tla na mjestima nagiba ili promjene razine terena te za smanjenje erozije i klizanja tla. Kada je takav zid izveden uz obalu mora, rijeke ili jezera, naziva se obalni zid i, uz funkcije potpornih zidova, dodatno štiti obalu od poplava i oštećenja te preuzima hidrostatska i, po potrebi, hidrodinamička djelovanja valova.

Kako bi se osigurala stabilnost zida, potrebno je odrediti sva djelovanja koja djeluju na njega, svojstva tla, geometriju i krutost konstrukcije, uvjete i drenažu vode. Radi standardizacije proračuna unutar Europske unije uveden je skup normi za geotehničko projektiranje, poznat kao Eurokod 7 (EC7) [1,2]. U Eurokodu 7 definirana su tri proračunska pristupa (PP1 – PP3), koji se razlikuju prema načinu primjene parcijalnih koeficijenata na djelovanja, svojstva materijala i otpornost. U Hrvatskoj je Nacionalnim dodatkom propisan Proračunski pristup 3 (PP3) [3].

Dva su osnovna cilja ovoga rada. Prvo, budući da EC7 ne daje jedinstveno, izričito razgraničenje između konstrukcijskih i geotehničkih djelovanja u sklopu PP3 [3], jedan od ciljeva rada je prikazati razlike u rezultatima proračuna potpornog zida uz različito definirana djelovanja. Drugi cilj vezan je uz identifikaciju razlika između potpornih zidova i obalnih zidova te se stoga provodi usporedba rezultata proračuna potpornog zida i obalnog zida istih dimenzija.

2. Geotehnički proračun prema EC7

2.1 Granična stanja prema Eurokodu 7

Eurokod 7 temelji se na konceptu graničnih stanja, koja dijelimo na granična stanja nosivosti (GSN) i uporabivosti (GSU) [4,5]. U ovome radu razmatraju se samo GSN, tj. stanja koja mogu dovesti do zakazivanja tla ili konstrukcije. U Eurokodu 7 definirano je pet GSN: granično stanje ravnoteže (EQU), granično stanje dijelova građevine (STR), geotehničko granično stanje (GEO), granično stanje izdizanja (UPL) i granično stanje hidrauličkog izdizanja tla (HYD) [4,5].

Kod provjere prema graničnim stanjima provjerava se da relevantna granična stanja nisu prekoračena u određenim proračunskim situacijama. Za EQU kriterij ravnoteže glasi [4]:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} \quad (1)$$

gdje su $E_{dst,d}$ destabilizirajući, a $E_{stb,d}$ stabilizirajući učinci djelovanja.

Za STR i GEO provjera se svodi na odnos između proračunskih učinaka djelovanja i proračunske otpornosti [4]:

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

Pritom se uvodi faktor iskoristivosti [4]:

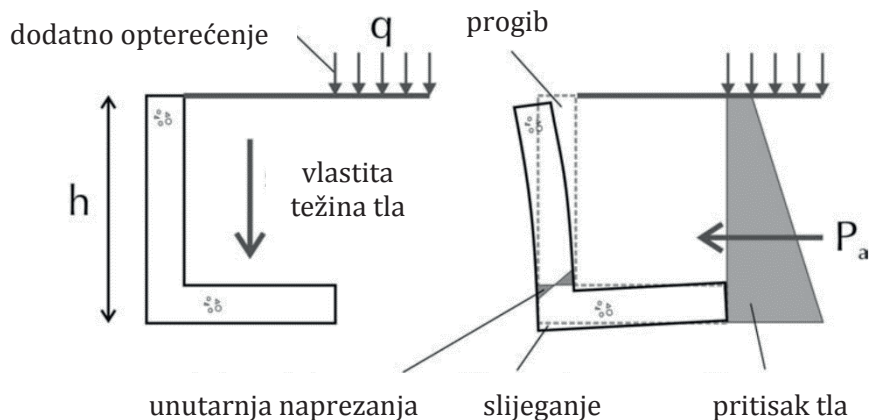
$$\Lambda = \frac{E_d}{R_d} \leq 100\% \quad (3)$$

Alternativno, klasični faktor sigurnost definira se kao [4]:

$$F_s = \frac{R_d}{E_d} \geq 1,00 \quad (4)$$

Geotehničko granično stanje (GEO) često je odlučujuće za dimenzioniranje temeljnih i potpornih konstrukcija (npr. klizanje, prevrtanje, nosivost temeljnog tla), dok STR kontrolira otpornost i konstruktivne detalje nosivih dijelova konstrukcije [4].

Na Slici 1 prikazan je potporni zid opterećen vlastitom težinom nasipa i jednolikim površinskim opterećenjem q . Uslijed bočnog pritiska nasipa na poledinu zida, pri aktivnom stanju razvija se horizontalna sila P_a (učinak djelovanja). Aktivno stanje se postiže kada se zid dovoljno udalji od nasipa; u suprotnom vrijedi stanje mirnog pritiska. Veličina P_a ovisi o geotehničkim parametrima nasipa, trenju na kontaktu zid-tlo, razini podzemne vode te o eventualnom hidrostatskom pritisku.



Slika 1. Djelovanja (lijevo) i učinci (desno) za gravitacijski potporni zid L-presjeka (prema [4])

Iako se djelovanja definiraju neovisno o materijalnim svojstvima, u geotehničkom proračunu otpornosti nužno je uvažiti čvrstoću i težinu tla kroz karakteristične vrijednosti i parcijalne koeficijente prema EC7. Zbog složenosti interakcije tlo-konstrukcija, bočni pritisak i stabilnost mogu se određivati različitim metodama: analitičkim modelima (Rankine/Coulomb), metodama ravnoteže granica ili numeričkim proračunima (npr. FEM), ovisno o traženoj razini točnosti [4].

2.2 Uvođenje pouzdanosti u proračun

U eurokodovima je sigurnost obuhvaćena pojmom pouzdanosti. Pouzdanost se u proračun uvodi parcijalnim koeficijentima ili odstupanjima geometrijske veličine. Ti se koeficijenti ili odstupanja primjenjuju, ovisno o metodi i pristupu, na: a) djelovanja ili učinke djelovanja, b) svojstva materijala i/ili otpornost te c) geometrijske parametre [4].

2.2.1 Djelovanja i učinci djelovanja

Kako bi se dobile proračunske vrijednosti učinaka djelovanja, prati se sljedeći postupak: karakteristične vrijednosti djelovanja $F_k \rightarrow$ reprezentativne vrijednosti djelovanja $F_{rep} \rightarrow$ proračunske vrijednosti djelovanja $F_d \rightarrow$ proračunski učinci djelovanja E_d , pri čemu se reprezentativne vrijednosti i kombinacije djelovanja uzimaju prema EN 1990 i EN 1991.

U EN 1997-1 je dopuštena primjena parcijalnih koeficijenata ili na djelovanja γ_F ili na učinke djelovanja γ_E , ali u pravilu ne na oboje istodobno [4].

2.2.2 Svojstva materijala i otpornost

Kako bi se dobile proračunske vrijednosti otpornosti R_d , prati se sljedeći postupak: karakteristična svojstva materijala $X_k \rightarrow$ proračunska svojstva $X_d \rightarrow$ proračunska otpornost R_d .

U praksi je, ovisno o odabranom proračunskom pristupu, često jedan od parcijalnih koeficijenata γ_M (materijali) ili γ_R (otpornost) jednak 1,0 radi pojednostavnjenja proračuna. Također, geometrijski parametri mogu se uzeti s odstupanjem Δa (npr. manja širina temelja), kako bi se ostalo na strani sigurnosti i obuhvatila odstupanja prilikom izvođenja [4].

2.2.3 Parcijalni koeficijenti

Tablica 1. Parcijalni koeficijenti za granično stanje GEO (prema [3])

Parametar			Djelovanja ili učinci		Svojstva materijala		Otpornost			
			A1	A2	M1	M2	R1	R2	R3	
Stalna djelovanja (G)	Nepovoljna	γ_G	1,35	1,0						
	Povoljna	$\gamma_{G,fav}$	1,0	1,0						
Promjenjiva djelovanja (Q)	Nepovoljna	γ_Q	1,5	1,3						
	Povoljna	$\gamma_{Q,fav}$	0	0						
Koeficijent kuta unutarnjeg trenja ($\tan \rho$)		γ_ρ			1,0	1,25				
Efektivna kohezija (c')		$\gamma_{c'}$			1,0	1,25				
Nedrenirana posmična čvrstoća (c_u)		γ_{cu}			1,0	1,4				
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)		γ_{qu}			1,0	1,4				
Zapremninska težina (γ)		γ_γ			1,0	1,0				
Nosivost (R_v)		γ_{Rv}						1,0	1,4	1,0
Otpornost klizanju (R_h)		γ_{Rh}						1,0	1,1	1,0
Otpornost tla (R_e) ...potporne konstrukcije ...kosine		γ_{Re}						1,0		1,0
									1,4	
									1,1	

U Tablici 1 dani su parcijalni koeficijenti prema EN 1997-1 za geotehničke konstrukcije (npr. kosine, temeljne nožice, potporne zidove). Koeficijenti su grupirani kao A1 – A2 (za djelovanja ili učinke djelovanja), M1 – M2 (za svojstva materijala, odnosno parametre tla) i R1 – R3 (za otpornost). Nacionalni dodatak definira primjenu proračunskog pristupa [3,4].

2.3 Proračunski pristupi

Tijekom izrade Eurokoda 7 nije postignut jedinstven odabir proračunskih pristupa na razini EU, a koji se odnose na STR i GEO, pa je odlučeno da svaka država u Nacionalnom dodatku odredi koji će od tri pristupa primjenjivati [4,5].

Tablica 2. Proračunski pristupi prema Eurokodu 7 (prema [4])

Konstrukcija	Glavne varijable za pojedini proračunski pristup			
	1		2	3
	kombinacija 1	kombinacija 2		
Općenito	Djelovanja	Svojstva materijala	Djelovanja (ili učinci) i otpornost	Konstrukcijska djelovanja (ili učinci) i svojstva materijala
Kosine			Učinci djelovanja i otpornost	Konstrukcijski učinci djelovanja i svojstva materijala
Piloti i sidra		Otpornost	Djelovanja (ili učinci) i otpornost	Konstrukcijska djelovanja (ili učinci) i svojstva materijala

Proračunski pristup 1 (PP1): Pouzdanost se provjerava kroz dvije odvojene kombinacije parcijalnih koeficijenata (Kombinacija 1 i Kombinacija 2). Proračun je zadovoljen tek kada su obje kombinacije ispunjene. U prvoj se kombinaciji parcijalni koeficijenti primjenjuju na djelovanja/učinke i „blaže” na svojstva materijala, dok se u drugoj kombinaciji primjenjuju „stroži” koeficijenti na djelovanja/učinke i na svojstva materijala (vidi Tablicu 2) [4].

Proračunski pristup 2 (PP2): Provodi se jedan proračun u kojem se parcijalni koeficijenti primjenjuju na djelovanja/učinke i na otpornost, dok se svojstva materijala uzimaju s „blažim” skupom koeficijenata (vidi Tablicu 2) [4].

Proračunski pristup 3 (PP3): Također se provodi jedan proračun, ali se razlikuje tretman konstrukcijskih i geotehničkih djelovanja: parcijalni koeficijenti za konstrukcijska djelovanja primjenjuju se prema jednome skupu, a za geotehnička djelovanja i svojstva tla prema drugome; otpornost se obično uzima s neutralnim ili propisanim skupom koeficijenata (vidi Tablicu 2) [4].

U Hrvatskoj je Nacionalnim dodatkom propisana primjena proračunskog pristupa 3 za predmetne proračune [3].

2.3.2 Proračunski pristup 3

Kod Proračunskog pristupa 3 (PP3) nužno je razlikovati konstrukcijska i geotehnička djelovanja jer se na njih primjenjuju različiti skupovi parcijalnih koeficijenata. U Hrvatskoj vrijedi [3]: konstrukcijska djelovanja → A1, geotehnička djelovanja → A2, svojstva tla → M2, otpornosti → R3 (vidi Tablicu 3).

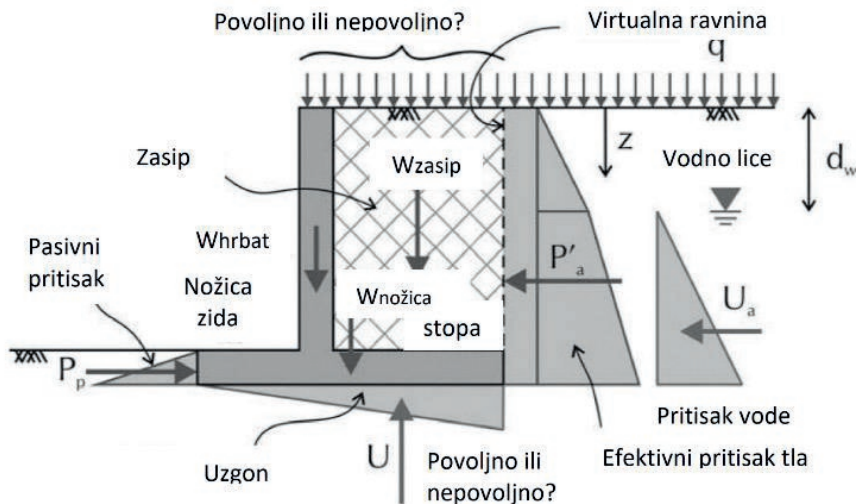
Geotehničko djelovanje u smislu Eurokoda 7 jest djelovanje preneseno na konstrukciju s temeljnog tla, nasipa, otvorene vode ili podzemne vode. Konstrukcijska djelovanja su preostala djelovanja koja proizlaze iz konstrukcije ili se na nju primjenjuju izravno (npr. vlastita težina, korisna opterećenja, oprema), tj. sve što nije geotehničko djelovanje [4]. Ova klasifikacija određuje koji se parcijalni koeficijenti primjenjuju u proračunu, pa je ključno biti dosljedan kroz sve provjere.

Tablica 3. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 3 (prema [4]).

Proračunski pristup 3			A1	A2	M2	R3
Stalna djelovanja (G)	Nepovoljna	γ_G	1,35	1,0		
	Povoljna	$\gamma_{G,fav}$	1,0	1,0		
Promjenjiva djelovanja (Q)	Nepovoljna	γ_Q	1,5	1,3		
	Povoljna	$\gamma_{Q,fav}$	0	0		
Koeficijent kuta unutarnjeg trenja ($\tan \rho$)		γ_ρ			1,25	
Efektivna kohezija (c')		$\gamma_{c'}$			1,25	
Nedrenirana posmična čvrstoća (c_u)		γ_{c_u}			1,4	
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)		γ_{q_u}			1,4	
Zapremninska težina (γ)		γ_γ			1,0	
Otpornost (R) (osim vlačnih pilota)		γ_R				1,0
Vlačni piloti		$\gamma_{R,st}$				1,1

3. Dimenzioniranje armiranobetonskih zidova prema EC7

Slika 2 prikazuje tipični raspored djelovanja na AB potporni/obalni zid (vlastita težina, nasip + jednoliko površinsko opterećenje q , pasivni pritisak P_p , aktivni pritisak P'_a , hidrostatski pritisak U_a i uzgon U).



Slika 2. Djelovanja na armiranobetonski zid (prema [4]).

Armiranobetonski zidovi izloženi su djelovanjima tla i vode; ključne su provjere nosivosti temeljnog tla, klizanja i prevrtanja. Za AB zidove pretpostavlja se jednoliko površinsko opterećenje q na kruni nasipa te položaj razine podzemne vode d_w . Pretpostavlja se da je nožica zida dovoljno široka da se u zasipu može formirati Rankineova zona. Ukupni horizontalni pritisak tla σ_a uključuje efektivni pritisak i porni pritisak, a može se izračunati pomoću izraza koji uključuje koeficijent aktivnog pritiska tla K_a , zapreminsku težinu tla γ , koheziju c' , kut trenja φ te nagib površine zasipa β .

3.1. Nosivost tla

U provjeri nosivosti gleda se hoće li kombinacija vertikalnih učinaka djelovanja V_d dovesti do prekoračenja nosivosti temeljnog tla R_d ispod nožice [4]:

$$V_d \leq R_d \quad (6)$$

Gornji izraz se može napisati i u općenitoj formi [4]:

$$q_{Ed} \leq q_{Rd} \quad (7)$$

gdje je q_{Ed} proračunski učinak djelovanja na temeljno tlo, a q_{Rd} proračunska nosivost temeljnog tla.

Vlastita težina zida te težina tla iznad nožice djeluju povoljno jer povećavaju efektivnu vertikalnu silu i stabiliziraju kontakt tlo–temelj; vode se kao stalna, povoljna djelovanja. Nasuprot tome, aktivni pritisak tla na poledini i hidrostatski pritisak vode smatraju se nepovoljnima jer povećavaju ekscentričnost rezultante, čime se smanjuje djelotvorna širina oslonca i raspoloživa nosivost. Uzgonski pritisak ispod temelja također je nepovoljan jer umanjuje efektivnu vertikalnu silu. Površinsko opterećenje na kruni nasipa ima potencijalno dvostruki učinak: povoljno je za nosivost jer povećava vertikalnu, ali je istodobno nepovoljno jer povećava bočni pritisak. Stoga se u praksi provjeravaju scenariji sa i bez tog opterećenja, a prihvaća se nepovoljniji ishod. Pasivnom otporu ispred nožice se u provjeri nosivosti u pravilu ne pripisuje stabilizirajuća uloga kako se ne bi dvaput uračunavao isti izvor otpornosti. Kroz cijelu provjeru potrebno je paziti da se djelovanja i otpornosti ne zbrajaju dvostruko i da se dosljedno primijene parcijalni koeficijenti prema odabranom proračunskom pristupu.

3.2. Klizanje

Kod klizanja, proračunsko horizontalno djelovanje H_d , koje djeluje na virtualnoj ravni, mora biti manje ili jednako sumi proračunske otpornosti R_d od tla ispod temelja i bilo kakvih proračunskih otpornosti R_{pd} na prednjoj strani zida [4]:

$$H_d \leq R_d + R_{pd} \quad (8)$$

gdje je H_d proračunski učinak horizontalnog djelovanja, R_d proračunska otpornost na klizanje, a R_{pd} proračunski pasivni otpor tla. Proračunski učinak horizontalnog djelovanja H_d uključuje efektivni pritisak tla i vode. Otpornost na klizanje R_d uključuje vlastitu težinu zida umanjenu za uzgon, kut trenja na kontaktu konstrukcije i tla δ te parcijalne koeficijente za djelovanja i otpornost.

U ovom se izrazu na vlastitu težinu zida gleda kao na povoljno djelovanje jer povećanje težine dovodi do povećanja otpornosti na klizanje. Uzgon se gleda kao nepovoljno djelovanje jer povećanje uzgona dovodi do smanjenja otpornosti na klizanje. Zato vrijedi da je parcijalni koeficijent za W_{Gk} veći od parcijalnog koeficijenta za U_{Gk} , odnosno $\gamma_G > \gamma_{G, fav}$. Još jedan razlog zašto se na uzgon gleda kao na nepovoljno djelovanje jest da on nastaje iz istog izvora kao i horizontalni hidrostatski pritisak U_a , koji je nepovoljno djelovanje, a zbog dosljednosti bi se za djelovanja nastala iz istog izvora trebali koristiti isti koeficijenti [4]. Ista logika mogla bi se

primijeniti na vlastitu težinu zasipa jer ona doprinosi i pritisku tla P'_a i težini zida. Međutim, nije sigurno hoće li tlo u zasipu ispred virtualne ravnine biti jednako zbijeno kao i tlo iza ravnine, pa se zato preporučuje na pritisak tla i vlastitu težinu zasipa gledati kao zasebna djelovanja. Težina dodatnog površinskog opterećenja q često se zanemaruje kod računanja proračunske otpornosti jer se radi uglavnom o promjenjivom djelovanju i kritičnija situacija nastaje ako ga nema [4,5].

3.3. *Prevrtanje*

U provjeri prevrtanja uspoređuju se momenti koji potencijalno mogu prevrnuti zid $M_{Ed,dst}$ s onima koji ga stabiliziraju $M_{Ed,stab}$, najčešće oko nožice [4]:

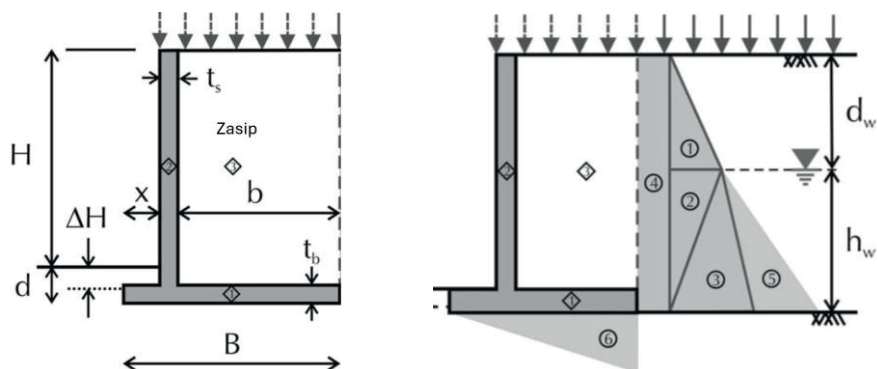
$$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stab} \quad (9)$$

Aktivni pritisak tla i hidrostatski pritisak vode računaju se kao nepovoljni jer stvaraju momente prevrtanja, a uzgon dodatno smanjuje stabilizirajući učinak vlastite težine. Stabilizaciju osigurava vlastita težina hrbata i nožice te težina tla iznad nožice, koje generiraju momente suprotne prevrtanju; ti se doprinosi vode kao povoljna, stalna djelovanja. Površinsko opterećenje iznad nasipa najčešće se zanemaruje u ovoj provjeri budući da je scenarij bez njega u pravilu nepovoljniji. Pasivni otpor ispred nožice mogao bi doprinijeti stabilizaciji, ali se obično ne računa ili se uzima vrlo ograničeno zbog nesigurnosti njegove mobilizacije tijekom vijeka konstrukcije.

4. **Primjer proračuna potpornog i obalnog AB zida T-presjeka prema EC7**

4.1 *Primjer proračuna potpornog AB zida T-presjeka*

Na Slici 3 prikazana su djelovanja koja utječu na potporni AB zid T-presjeka [4]. Djelovanja (vrijednosti u kružnici) se mogu podijeliti na aktivni pritisak tla (1-3), aktivni pritisak tla uslijed dodatnog površinskog opterećenja q (4), hidrostatski pritisak (5) i uzgon (6), dok se vlastite težine (vrijednosti unutar pravokutnika) mogu podijeliti na težinu nožice zida (1), težinu hrbata zida (2) i težinu zasipa (3).



Slika 3. Dimenzije i djelovanja na AB potporni zid T-presjeka [4].

Za primjer su odabrane sljedeće dimenzije AB zida: $H = 3,0$ m; $d = 0,5$ m; $\Delta H = 0,3$ m; $x = 0,5$ m; $t_s = 0,25$ m; $B = 2,9$ m; $b = 2,15$ m; $t_b = 0,30$ m. Razina podzemne vode je $d_w = 1,0$ m. Zapreminske težine betona, zasipa i vode su $\gamma_c = 25,0$ kN/m³, $\gamma_k = 18,0$ kN/m³ i $\gamma_v = 9,8$ kN/m³. Površinsko kontinuirano opterećenje iznosi $q = 10,0$ kN/m². Za zasip se pretpostavlja kameni nabačaj s karakterističnim kutom unutarnjeg trenja $\varphi_k = 38^\circ$, a za temeljno tlo kamenomet izveden od šljunka sljedećih karakteristika: karakteristični kut efektivnog unutarnjeg trenja temeljnog tla $\varphi_{k,fdn} = 38^\circ$ i karakteristični kut trenja u kritičnom stanju temeljnog tla $\varphi_{cv,k,fdn} = 33^\circ$.

Proračun graničnog stanja GEO, odnosno provjera na nosivost, klizanje i prevrtanje, provedena je prema PP3, pri čemu su definirane četiri različite pretpostavke (kombinacije) koja djelovanja (površinsko kontinuirano opterećenje q i ispuna) su geotehnička, a koja konstruktivna:

- Pretpostavka 1 (Pr. 1): Ispuna i površinsko opterećenje q su konstruktivna djelovanja
- Pretpostavka 2 (Pr. 2): Ispuna i površinsko opterećenje q su geotehnička djelovanja
- Pretpostavka 3 (Pr. 3): Ispuna je konstruktivno, a površinsko opterećenje q geotehničko djelovanje
- Pretpostavka 4 (Pr. 4): Ispuna je geotehničko, a površinsko opterećenje q konstruktivno djelovanje.

Proračun prati postupak detaljno definiran u [4], a sastoji se od sljedećih koraka:

- Određivanje stalnih i promjenjivih djelovanja te pripadnih momenata
- Definiranje karakterističnih i proračunskih svojstava tla i materijala konstrukcije

- Računanje proračunskih učinaka djelovanja (sile, momenti i položaj rezultante u nožici)
- Provjera otpornosti na klizanje na dodirnoj plohi temelj-tlo
- Provjera nosivosti temeljnog tla
- Provjera na prevrtanje usporedbom destabilizirajućih i stabilizirajućih momenata.

U Tablici 4 prikazani su konačni proračunski učinci djelovanja i otpornosti te pripadni omjeri iskorištenosti potpornog AB zida za GEO prema PP3 i četiri različite pretpostavke vrste djelovanja; detaljni među-koraci nisu prikazani radi sažetosti.

Tablica 4. Rezultati provjere stabilnosti potpornog AB zida T-presjeka za GEO prema PP3 i četiri pretpostavke djelovanja.

Provjera	Veličina	jed.	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 4
drenirano klizanje	H_{Ed}	kN/m	79,77	69,06	77,62	71,21
	H_{Rd}	kN/m	81,29	81,29	81,29	81,29
	$\Lambda_{GEO,1}$	%	98,1 %	85,0 %	95,5 %	87,6 %
drenirana nosivost	q'_{Ed}	kPa	96,30	82,20	93,80	84,76
	q'_{Rd}	kPa	147,28	118,65	149,03	117,57
	$\Lambda_{GEO,2}$	%	65,4 %	69,3 %	62,9 %	72,1 %
prevrtanje	$M_{Ed,dst}$	kNm/m	165,18	150,33	161,42	154,10
	$M_{Ed,stab}$	kNm/m	425,76	338,50	417,60	346,66
	$\Lambda_{GEO,3}$	%	38,8 %	44,4 %	38,7 %	44,5 %

Širina nožice odabrana je upravo da sve provjere budu unutar dopuštenih vrijednosti, ali se može primijetiti osjetljivost proračuna na pretpostavke djelovanja (Pr. 1 do Pr. 4). Ove razlike nastaju prvenstveno zbog različitih parcijalnih koeficijenata primijenjenih na djelovanja od aktivnog potiska tla i površinskog opterećenja, što prema PP3 izravno mijenja proračunske učinke.

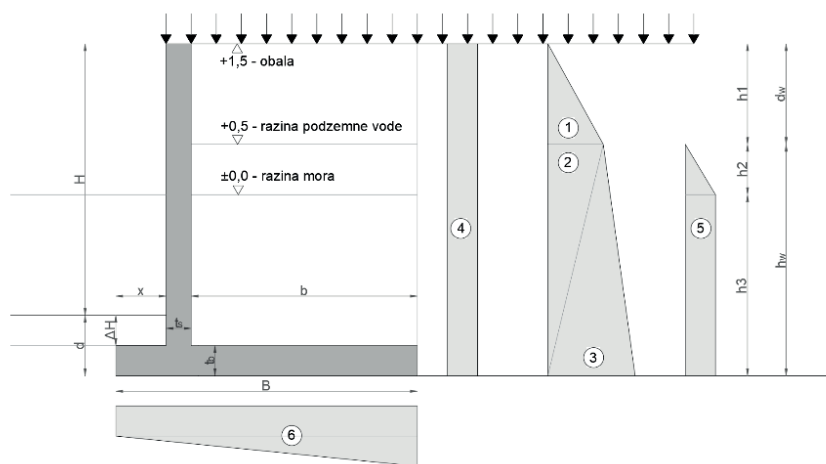
Klizanje je kritična provjera, učinak djelovanja H_{Ed} varira od ~69 do ~80 kN/m, dok je otpornost H_{Rd} praktično jednaka u svim pretpostavkama, što je u skladu s PP3 (povoljna stalna djelovanja se ne mijenjaju). Pretpostavka 1 daje najveći omjer iskoristivosti ($\Lambda_{GEO,1} \approx 98 \%$), tj. granično stanje klizanja je najkritičnije u toj pretpostavci. U ostalim pretpostavkama sigurnosna rezerva je veća.

Nosivost temeljnog tla također pokazuje značajne razlike među pristupima i za učinke djelovanje i za otpornost. Pretpostavka 4 daje najveći omjer iskoristivosti ($\Lambda_{\text{GEO},2} \approx 72 \%$), dok ostali pristupi daju nešto niže vrijednosti.

Prevrtanje isto tako daje primjetne razlike među pristupima i za destabilizirajuće i stabilizirajuće učinke djelovanja (momente). Kao i kod nosivosti temeljnog tla, pretpostavka 4 daje najveći omjer iskoristivosti ($\Lambda_{\text{GEO},3} \approx 44,5 \%$), vrlo slično kao i pretpostavka 2, dok ostale dvije pretpostavke daju nešto niže vrijednosti.

4.2 Primjer proračuna obalnog AB zida T-presjeka

Na Slici 4 prikazana su djelovanja koja utječu na obalni AB zid T-presjeka. Sva vlastita djelovanja i opterećenja su označena na jednak način kao i kod potpornog zida (Slika 3), jedino je razlika u njihovom obliku kod hidrostatskog pritiska i uzgona uslijed različite razine vode ispred zida. Naime, za proračun obalnog zida pretpostavljena je srednja razina mora ispred zida i razina podzemne vode 0,5 m iznad srednje razine mora iza zida. Umjesto slatke vode, u ovom slučaju se pretpostavlja morska voda zapremine težine $\gamma_c = 10,1 \text{ kN/m}^3$. S obzirom na to da se kod proračuna potpornog zida pretpostavka 1 pokazala kritična, ista je usvojena i u analizi obalnog zida radi direktne usporedbe.



Slika 4. Dimenzije i djelovanja na obalni AB zid T-presjeka.

U Tablici 5 prikazani su konačni proračunski učinci djelovanja i otpornosti te pripadni omjeri iskorištenosti obalnog AB zida za GEO prema PP3 i kritičnom pretpostavkom djelovanja (pretpostavka 1) te usporedba s rezultatima proračuna potpornog AB zida.

Za razliku od potpornog zida, obalni zid istih dimenzija ne zadovoljava provjeru na klizanje ($\Lambda_{\text{GEO},1} \approx 113 \%$ u odnosu na $\Lambda_{\text{GEO},1} \approx 98 \%$). Iako je učinak djelovanja nešto niži kod obalnog zida, otpornost je znatno niža zbog hidrostatskih djelovanja (primarno znatno većeg uzgona koju umanjuju vlastitu težinu zida).

Provjera nosivosti temeljnog tla zadovoljava s nižim omjerom iskoristivosti u usporedbi s potpornim zidom ($\Lambda_{\text{GEO},2} \approx 56 \%$ u odnosu na $\Lambda_{\text{GEO},2} \approx 65 \%$) zbog manjih horizontalnih sila (obostrano djelovanje hidrostatskog pritiska) i većih sila uzgona.

Također i provjera na prevrtanje zadovoljava, iako je omjer iskoristivosti nešto viši u usporedbi s potpornim zidom ($\Lambda_{\text{GEO},3} \approx 45 \%$ u odnosu na $\Lambda_{\text{GEO},3} \approx 39 \%$) jer hidrostatski pritisak (primarno, uzgon) povećava destabilizirajući moment.

Tablica 5. Rezultati provjere stabilnosti obalnog AB zida T-presjeka za GEO prema PP3 i kritičnoj pretpostavci djelovanja te usporedba s potpornim zidom (pretpostavka 1).

Provjera	Veličina	jed.	Potporni zid	Obalni zid
drenirano klizanje	H_{Ed}	kN/m	79,77	70,58
	H_{Rd}	kN/m	81,29	62,37
	$\Lambda_{\text{GEO},1}$	%	98,1 %	113,2 %
drenirana nosivost	q'_{Ed}	kPa	96,30	80,00
	q'_{Rd}	kPa	147,28	143,95
	$\Lambda_{\text{GEO},2}$	%	65,4 %	55,6 %
prevrtanje	$M_{\text{Ed,dst}}$	kNm/m	165,18	191,15
	$M_{\text{Ed,stb}}$	kNm/m	425,76	425,76
	$\Lambda_{\text{GEO},3}$	%	38,8 %	44,9 %

5. Zaključak

U ovome radu prikazan je primjer dimenzioniranja armiranobetonskog potpornog i obalnog zida T-presjeka prema Eurokodu 7, s fokusom na Proračunski pristup 3, koji se primjenjuje u Hrvatskoj. Pokazano je da rezultati provjera značajno ovise o odabiru konstrukcijskih i geotehničkih djelovanja te o primjeni parcijalnih koeficijenata; u praksi to znači A1 za konstrukcijska, A2 za geotehnička djelovanja, M2 za tlo i R3 za otpornosti.

Analiza varijanti djelovanja za odabrani primjer pokazala je da je kritična situacija ona kada su površinsko opterećenje i ispunja promatrani kao konstruktivno djelovanje koje djeluje direktno na armiranobetonski zid. U tom je slučaju klizanje kritična provjera (Λ do ≈ 98 %), dok nosivost temeljnog tla i prevrtanje imaju nešto viši faktor sigurnosti. Pri usporedbi potpornog i obalnog zida istih geometrija, obalni zid postaje kritičan zbog djelovanja mora (hidrostatski pritisak i uzgon): u referentnoj pretpostavci klizanje ne zadovoljava ($\Lambda \approx 113$ %), dok nosivost i prevrtanje ostaju unutar dopuštenih vrijednosti. Time je potvrđeno da rezultate nije moguće preslikati s potpornog na obalni zid bez uvažavanja utjecaja djelovanja mora.

Iz provedenih analiza proizlazi da je pri dimenzioniranju armiranobetonskih zidova prema EC7 presudno identificirati koja djelovanja djeluju povoljno, a koja nepovoljno te u kontekstu PP3 dosljedno odrediti koja se djelovanja klasificiraju kao geotehnička, a koja kao konstrukcijska, pa sukladno tome primijeniti parcijalne koeficijente.

Ograničenja rada odnose se na usvojene idealizacije: korišten je analitički model aktivnog pritiska tla i ravninski model; analiza je bila fokusirana na granično stanje GEO, dok se u praksi moraju provesti i provjere graničnog stanja EQU (osobito važno za obalne zidove), kao i provjere za potresno djelovanje, što nadilazi obuhvat ovoga rada.

S obzirom na oskudnost sličnih objavljenih primjera u domaćoj i stranoj literaturi te na iskustva iz prakse koja upućuju da se EC7 još uvijek nedovoljno sustavno primjenjuje kod obalnih konstrukcija, nužno je: a) razviti i objaviti nacionalno usklađene upute s razgraničenjem djelovanja u PP3 i primjerima proračuna korak-po-korak; b) potaknuti edukaciju projekatanta kroz stručna usavršavanja i ogledne radne primjere; c) u praksi standardizirati predloške i kontrolne liste (klasifikacija djelovanja, izbor skupova A1/A2–M2–R3, scenariji razina voda, tretman pasivnog otpora); te d) proširiti istraživanja numeričkim modeliranjem interakcije tlo–konstrukcija. Takvi koraci povećat će pouzdanost i transparentnost projekata te olakšati širu i konzistentniju primjenu EC7 u obalnim i geotehničkim konstrukcijama u složenim uvjetima.

Literatura

- [1] Hrvatska norma HRN EN 1997-1:2012, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004 + AC:2009)
- [2] Hrvatska norme HRN EN 1997-1:2012/A1:2014, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004/A1:2013) - Amandman
- [3] Hrvatska norma HRN EN 1997-1:2012/NA:2016, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak
- [4] Bond Andrew, Harris Andrew, Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis, e-Library, 2008.
- [5] Bond, A.J., Schuppener, B., Scarpelli, G. and Orr, T.L.L., 2013. *Eurocode 7: Geotechnical Design—Worked examples*. JRC Scientific and Policy Reports. European Commission, Joint Research Centre. Edited by S. Dimova, B. Nikolova and A.V. Pinto.
- [6] Ivandić, K., Bandić, M. and Soldo, B., 2010. Embedded Retaining Wall Limit State Analysis according to Eurocode 7. *Tehnički vjesnik*, 17(3), pp.263-271.