

Dimenzioniranje armirano-betonskog obalnog zida T presjeka prema Eurokodu 7

Kekez, Maja

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:139110>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Maja Kekez

**Dimenzioniranje armirano-betonskog obalnog zida T presjeka prema
Eurokodu 7**

Završni rad

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilišni preddiplomski studij

Građevinarstvo

Osnove obalnog inženjerstva

Maja Kekez

JMBAG: 0114033796

**Dimenzioniranje armirano-betonskog obalnog zida T presjeka prema
Eurokodu 7**

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Maja Kekez

U Rijeci, rujan 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru, Ninu Krvavici, na podršci, smjernicama i korisnim savjetima tijekom izrade ovog završnog rada. Njegova pomoć i stručnost bili su od velike važnosti za dovršetak ovog rada. Hvala Vam na svemu.

SAŽETAK

Završni rad detaljno opisuje upotrebu europskih normi za projektiranje građevinskih objekata, odnosno Eurokoda 7 koji se bavi geotehničkim projektiranjem. Glavni je fokus rada usporedba različitih proračunskih pristupa, posebice pristupa 3 koji se rabi u Hrvatskoj. To je prikazano na primjerima potpornoga zida i obalnoga zida, pri čemu su oba zida proračunata na isti način, uzimajući u obzir sva relevantna opterećenja. Provedene su kritične provjere otpornosti na drenirano klizanje, dreniranu nosivost i otpornost na prevrtanje. Ova usporedba pruža uvid u to kako se teorija primjenjuje u stvarnosti te pokazuje značaj razlika u nacionalnim dodacima. Na kraju, rad ističe koliko je važno precizno primjenjivati eurokode i nacionalne dodatke kako bi se osigurala sigurnost i uspješnost građevinskih projekata.

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

ABSTRACT

The thesis provides a detailed explanation of the use of European standards for designing construction projects, specifically Eurocode 7, which deals with geotechnical design. The focus of this thesis is on the comparison of different design approaches, particularly Approach 3 used in Croatia. This is illustrated by examples of a retaining wall and a coastal wall, calculated using the same method and considering all relevant loads. Critical checks were carried out for drained sliding, drained bearing capacity and overturning resistance. This comparison provides an insight into how theory is applied in practice and highlights the importance of the differences in the national annexes. Finally, the thesis emphasizes the importance of accurately applying Eurocodes and national annexes to ensure the safety and success of construction projects.

Keywords: Eurocode 7, design approach, retaining wall, coastal wall, partial factors, geotechnical loads

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA	12
POPIS TABLICA.....	13
UVOD	1
1. EUROKODOVI.....	2
1.1. Program građevinskih eurokodova	2
1.2. Nacionalni dodatak	5
2. PROVJERA ČVRSTOĆE.....	8
2.1. Osnove proračuna	10
2.1.1. Geotehnički proračun.....	13
2.2. Uvođenje pouzdanosti u proračun	14
2.2.1. Djelovanja i učinci djelovanja	15
2.2.2. Svojstva materijala	16
2.2.3. Parcijalni koeficijenti	18
2.3. Proračunski pristupi	19
2.3.1. Proračunski pristup 1	21
2.3.2. Proračunski pristup 2	23
2.3.3. Proračunski pristup 3	24
2.3.4. Izbor proračunskog pristupa u različitim europskim zemljama	26
3. PROVJERA STABILNOSTI	27
3.1. Osnove proračuna	27
3.2. Uvođenje pouzdanosti u proračun	28
4. PRORAČUN GRAVITACIJSKIH ZIDOVA.....	30
4.1. Istraživanje temeljnog tla za gravitacijske zidove.....	30
4.2. Proračunske okolnosti i granična stanja.....	31
4.3. Osnove proračuna	32
4.4. Armiranobetonski zidovi	34
4.4.1. Nosivost	35
4.4.2. Klizanje	37
4.4.3. Pevrtanje	39
4.5. Gravitacijski masivni zidovi	39

4.5.1. Nosivost	42
4.5.2. Klizanje	43
4.5.3. Prevrtanje	43
4.6. Konstrukcijski proračun, nadzor, praćenje i održavanje	44
5. PRIMJER PRORAČUNA GRAVITACIJSKOG ZIDA T OBLIKA.....	45
5.1. Primjer proračuna gravitacijskog zida T oblika – proračunski pristup 3	45
5.2. Primjer proračuna obalnog zida T oblika – proračunski pristup 3	54
5.3. Usporedba rezultata.....	64
ZAKLJUČAK	65
LITERATURA	66

POPIS SLIKA

1. Informacije dane u nacionalnom dodatku EN eurokoda (prema Bond i Harris, 2008)
2. Primjeri djelovanja (prema Bond i Harris, 2008)
3. djelovanja i učinci na jednostavnoj gredi (prema Bond i Harris, 2008)
4. Primjeri graničnih stanja nosivosti gdje se čvrstoća uzima u obzir (Bond i Harris, 2008)
5. Djelovanja (lijevo) i učinci (desno) za gravitacijski potporni zid L-oblika (prema Bond i Harris, 2008)
6. Otpornost na klizanje gravitacijskog potpornog zida L-oblika (prema Bond i Harris, 2008)
7. Relativne veličine djelovanja i učinaka djelovanja kada su parcijalni koeficijenti primijenjeni na djelovanja (lijevo) i na učinke djelovanja (desno) (prema Bond i Harris, 2008)
8. Relativne veličine otpornosti i čvrstoće materijala kada su koeficijenti primijenjeni na otpornost (lijevo) i na čvrstoće materijala (desno) (prema Bond i Harris, 2008)
9. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 1, kombinacija 1 (prema Bond i Harris, 2008)
10. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 1, kombinacija 2 (prema Bond i Harris, 2008)
11. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 2 (prema Bond i Harris, 2008)
12. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 3 (prema Bond i Harris, 2008)
13. Primjeri djelovanja za koje nije jasno definirano jesu li geotehničko ili konstrukcijsko djelovanje (prema Bond i Harris, 2008)
14. Odabir proračunskog pristupa za proračun ostalih konstrukcija po zemljama (prema Bond i Harris, 2008, uredila autorica)
15. Primjeri graničnih stanja nosivosti (prema Bond i Harris, 2008)
16. Odnos relativnih veličina ključnih parametara kod provjere graničnih stanja nosivosti (prema Bond i Harris, 2008)
17. Preporučene dubine točaka istraživanja (prema Bond i Harris, 2008)
18. Preporučene dubine točaka istraživanja (prema Bond i Harris, 2008)
19. Primjeri GSN koja utječu na gravitacijske zidove u obliku L i T (prema Bond i Harris, 2008)

20. Tolerancija kod neplaniranog iskopa (prema Bond i Harris, 2008)
21. Potisci tla koji djeluju na armiranobetonski zid (prema Bond i Harris, 2008)
22. Otpornost armiranobetonskog zida na ekscentrična, nagnuta djelovanja (prema Bond i Harris, 2008)
23. Potisci tla koji djeluju na gravitacijski masivni zid (prema Bond i Harris, 2008)
24. Djelovanja na gravitacijski zid (prema Bond i Harris, 2008)
25. Djelovanja na obalni zid (izradila autorica)

POPIS TABLICA

1. Parcijalni koeficijenti za temelje općenito (prema Bond i Harris, 2008)
2. Parcijalni koeficijenti za pojedini proračunski pristup (prema Bond i Harris, 2008)
3. Glavne varijable za pojedini proračunski pristup (prema Bond i Harris, 2008)
4. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 1 (prema Bond i Harris, 2008)
5. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 2 (prema Bond i Harris, 2008)
6. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 3 (prema Bond i Harris, 2008)
7. Parcijalni koeficijenti za provjeru stabilnosti (prema Bond i Harris, 2008)
8. Usporedba rezultata proračuna (izradila autorica)

UVOD

Potporni zidovi u geotehničkom inženjerstvu služe za zadržavanje tla na mjestima nagiba ili promjene u razini terena te sprječavaju eroziju i klizanje tla. Kada je takav zid postavljen uz obalu mora, rijeke ili jezera, naziva se obalni zid. Uz navedene funkcije potpornog zida, obalni zid dodatno sprječava poplave te štiti obalne građevine i samu obalu od oštećenja.

Da bi se osigurala stabilnost zida, potrebno je uzeti u obzir sva opterećenja koja na njega djeluju, a koja se dijele na geotehnička i konstruktivna. Za proračun ovih opterećenja postoji više metoda, a kako bi se postupak standardizirao unutar Europske Unije, uveden je skup normi za geotehnički proračun poznat kao Eurokod 7. U eurokodovima su definirana tri moguća proračunska pristupa, koja se razlikuju prema načinu uvrštavanja parcijalnih koeficijenata u proračun. U Hrvatskoj je odabran proračunski pristup 3. (EN 1997-1:2012/NA)

Budući da Eurokod 7 za pristup 3 ne definira jasno koja su opterećenja konstruktivna, a koja geotehnička, cilj rada je prikazati razlike koje nastaju ovisno o odabiru vrste opterećenja, odnosno proračunskog pristupa. U radu se žele istražiti razlike proračuna potpornog zida prema pristupu 1 i pristupu 3 (definirajući drugačija geotehnička i konstruktivna djelovanja) te usporediti rezultate i odabrati najkritičniju situaciju prema kojoj se zatim proračunava obalni zid.

1. EUROKODOVI

1.1. Program građevinskih eurokodova

EN eurokodovi su niz od 10 europskih normi koje sadržavaju zajednički pristup za projektiranje zgrada, drugih građevina te građevinskih proizvoda. Primjenjuju se na projekte zgrada i drugih građevinskih radova uključujući geotehničke aspekte, projekt protiv požara, situacije koje uključuju potres, izvedbu i privremene konstrukcije. (<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/about-en-eurocodes>)

Države članice EU-a i EFTE potvrđuju da eurokodovi služe kao referencijski dokumenti za sljedeće svrhe (EN 1997-1):

- kao sredstvo potvrđivanja usklađenosti zgrada i inženjerskih građevina sa zahtjevima Direktive Vijeća 89/106/EEZ, posebno sa zahtjevom mehaničke otpornosti i stabilnosti te sigurnosti u slučaju požara
- kao osnova pri definiranju ugovora za građevine i pripadajuće inženjerske usluge
- kao smjernice za izradu usklađenih tehničkih specifikacija za građevne proizvode (europski propisi, EN i europska tehnička dopuštenja, ETD).

Glavni koncepti obuhvaćeni u eurokodovima jesu osnovni zahtjevi, diferencijacija pouzdanosti, radni vijek konstrukcije, trajnost i osiguranje kvalitete.

Konstrukcija i elementi konstrukcije trebaju biti projektirani, izvedeni i održavani tako da zadovoljavaju sljedeće **osnovne zahtjeve**:

1. Uporabljivost – tijekom namijenjenog vijeka trajanja konstrukcija mora ostati prikladna za uporabu za koju je namijenjena, s odgovarajućim stupnjevima pouzdanosti i na ekonomičan način
2. Sigurnost – konstrukcija mora izdržati sva djelovanja nastala tijekom izgradnje i uporabe
3. Požarnu otpornost – otpornost konstrukcije mora biti adekvatna za zahtijevani vijek trajanja
4. Čvrstoću – konstrukcija mora biti otporna na oštećenja uzrokovana događajima poput eksplozije, udara ili ljudskih pogrešaka.

Različite **razine pouzdanosti** mogu se usvojiti kako za konstrukcijsku otpornost tako i za uporabljivost. Kod odabira razina pouzdanosti za određenu konstrukciju važno je uzeti u obzir različite čimbenike, poput mogućeg uzroka, odnosno načina postizanja graničnog stanja, mogućih posljedica zakazivanja u smislu ozljede, opasnosti za život ili materijalne štete, društvene i okolišne uvjete te troškove i postupke potrebne za smanjenje rizika od zakazivanja. Razine pouzdanosti za pojedinu konstrukciju mogu se odrediti klasificiranjem strukture u cjelini i/ili klasificiranjem njezinih komponenti.

Radni vijek konstrukcije jest pretpostavljeno razdoblje tijekom kojeg se konstrukcija, uz održavanje, rabi prema svojoj predviđenoj namjeni bez potrebe za većim popravcima. Radni vijek konstrukcije važan je za odabir proračunskih djelovanja kao što su vjetar i potres, razmatranje pogoršanja svojstava materijala (zamor, puzanje), procjenu troškova životnog ciklusa te razvoj strategija održavanja.

Trajnost podrazumijeva da je konstrukcija projektirana tako da propadanje ne narušava trajnost i funkcionalnost konstrukcije, uzimajući u obzir predviđenu razinu održavanja.

EN eurokodovi pretpostavljaju da su poduzete odgovarajuće mjere kako bi se osigurala konstrukcija koja zadovoljava zahtjeve i pretpostavke utvrđene u projektu, odnosno mjere koje **osiguravaju kvalitetu** same konstrukcije. Ove mjere obuhvaćaju definiranje zahtjeva za pouzdanost, organizacijske postupke i kontrole tijekom svih faza, od projektiranja do održavanja. (<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/about-en-eurocodes>)

Program građevinskih eurokodova sadržava sljedeće propise koje se općenito sastoje od više dijelova (Bond i Harris, 2008):

EN 1990, Eurokod: Osnove proračuna građevina

EN 1991, Eurokod 1: Djelovanja na građevine

EN 1992, Eurokod 2: Proračun betonskih građevina

EN 1993, Eurokod 3: Proračun čeličnih građevina

EN 1994, Eurokod 4: Proračun spregnutih čelično-betonskih građevina

EN 1995, Eurokod 5: Proračun drvenih građevina

EN 1996, Eurokod 6: Proračun zidanih građevina

EN 1997, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje

EN 1998, Eurokod 8: Proračun građevina na otpor pri potresu

EN 1999, Eurokod 9: Proračun aluminijskih građevina

U ovom radu detaljnije se proučava **Eurokod 7 – Geotehničko projektiranje** koji pokriva geotehničke aspekte projektiranja zgrada i građevinskih konstrukcija. *Eurokod 7* podijeljen je na dva dijela bez odjeljaka. Prvi se dio odnosi na opće odredbe, a drugi dio na istraživanje i ispitivanje tla. Pravila za djelovanja koja nameće tlo, poput tlaka tla i podzemnih voda, dana su u EN 1997, dok su numeričke vrijednosti djelovanja na zgrade i druge građevinske radove, koje treba uzeti u obzir pri projektiranju različitih vrsta konstrukcija, dane u Eurokodu 1.

Za pitanja izvođenja koriste se posebni europski standardi. U Eurokodu 7 izvođenje je obrađeno tek onoliko koliko je potrebno kako bi se uskladio s pretpostavkama pravila projektiranja. Posebni zahtjevi seizmičkog projektiranja nisu pokriveni ovim eurokodom, već su oni dani u Eurokodu 8 koji dopunjuje, odnosno prilagođava pravila ovog standarda. (<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-7-geotechnical-design>)

Uvođenje građevinskih eurokodova diljem Europe tijekom prvog dijela 21. stoljeća imalo je velik značaj za projektiranje. Prvi put su gotovo istodobno promijenjeni standardi projektiranja za sve glavne građevinske materijale (čelik, beton, drvo, aluminij) i zidarstvo. Usto, u nekim disciplinama poput geotehnike i zidarstva, uvođenje eurokodova označava prelazak s projektiranja na temelju tradicionalnijih filozofija (npr. dopušteno naprezanje) na projektiranje temeljeno na graničnim stanjima nosivosti. Neke su od prednosti uvođenja eurokodova u građevinarstvo povećanje internacionalne konkurentnosti europskih tvrtki jer pružaju razumijevanje i zajedničke kriterije projektiranja konstrukcija te zajedničke osnove za istraživanje i razvoj u građevinskom sektoru. Uporaba eurokodova također omogućuje izradu zajedničkih alata i softvera za projektiranje te olakšava razmjenu građevinskih usluga i marketing. (Bond i Harris, 2008)

1.2. Nacionalni dodatak

Svaka zemlja članica ISO-a (Međunarodna organizacija za normizaciju) i CEN-a (Europski odbor za normizaciju) zastupljena je svojim nacionalnim zavodom za norme (NSB). NSB-ovi, organizacije odgovorne za postavljanje normi u svojoj zemlji, imaju ključnu ulogu u provedbi eurokodova.

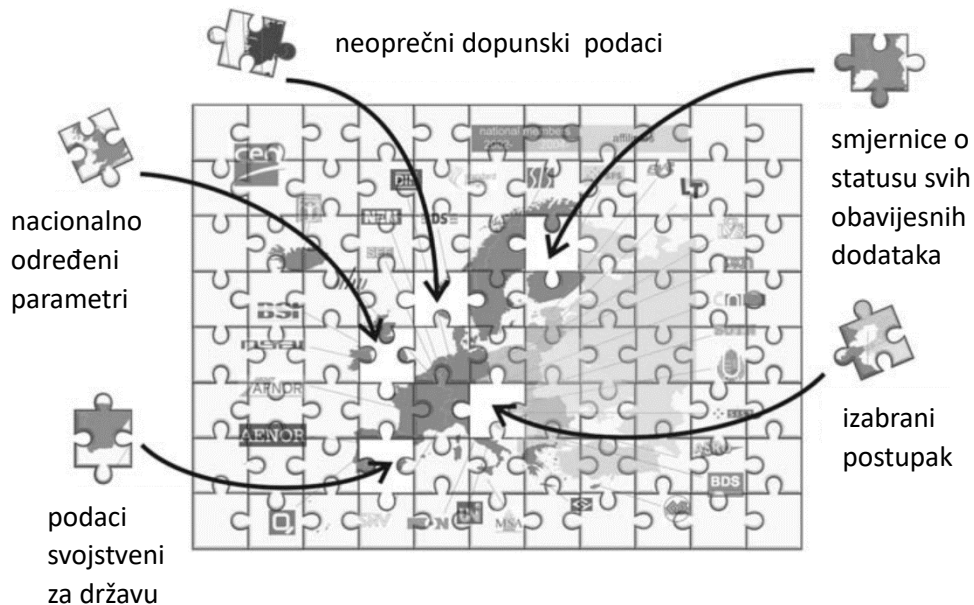
Svako nacionalno tijelo za norme odgovorno je za primjenu europskih normi kao nacionalnih normi s jednakim pravnim statusom. NSB-ovi mogu prevesti europske norme iz službenog teksta CEN-a, ali ne smiju mijenjati ili odstupati od bilo kojeg dijela teksta. (Bond i Harris, 2008)

Eurokodovi uzimaju u obzir raznolikost između država i potvrđuju važnost koju svaka država članica ima u određivanju vrijednosti koje se odnose na sigurnosna pitanja. Te razlike su navedene u nacionalnim dodacima.

Nacionalni propisi kojima se provode eurokodovi sadržavaju cjeloviti tekst eurokodova (pa tako i sve dodatke) kako ih je objavio CEN, a smije mu prethoditi nacionalna naslovna stranica, nacionalni predgovor te nacionalni dodatak (obavijesni).

Nacionalni dodatak smije sadržavati samo podatke o onim mjerilima za koje je u eurokodu ostavljen slobodan odabir na nacionalnoj razini i koji se nazivaju "nacionalno određena mjerila" (NOP), a koriste se pri proračunu zgrada i inženjerskih građevina koje se grade u dotičnoj državi. (EN 1997-1)

Nacionalni dodatak pruža informacije koje nedostaju u eurokodu, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Informacije dane u nacionalnom dodatku EN eurokoda (prema Bond i Harris, 2008)

Nacionalno određeni parametri (NPD-ovi) jesu parametri koji nisu definirani eurokodom nego su prepušteni nacionalnom odabiru. NPD-ovi obuhvaćaju parcijalne koeficijente, koeficijente međuzavisnosti, koeficijente kombinacija, koeficijente obrasca i slično.

Podaci svojstveni za državu odnose se na informacije geografske prirode koje su značajne samo u određenoj zemlji, kao što su, na primjer, karta snijega.

Neki eurokodovi **dopuštaju izbor postupaka** kada se radni odbor nije mogao usuglasiti za jedinstveni postupak. Tako, na primjer, Eurokod 6 nudi mogućnost izbora među šest različitih razreda kontrole izvedbe, a Eurokod 7 omogućuje izbor među trima različitim pristupima projektiranju kod graničnih stanja nosivosti STR i GEO.

Nacionalni dodatak može ponuditi **smjernice o statusu svih obavijesnih dodataka** u odgovarajućem eurokodu. Obavijesni dodaci mogu imati obvezni status, ostati samo informativni ili biti odbačeni kao neprikladni za korištenje u pojedinoj državi.

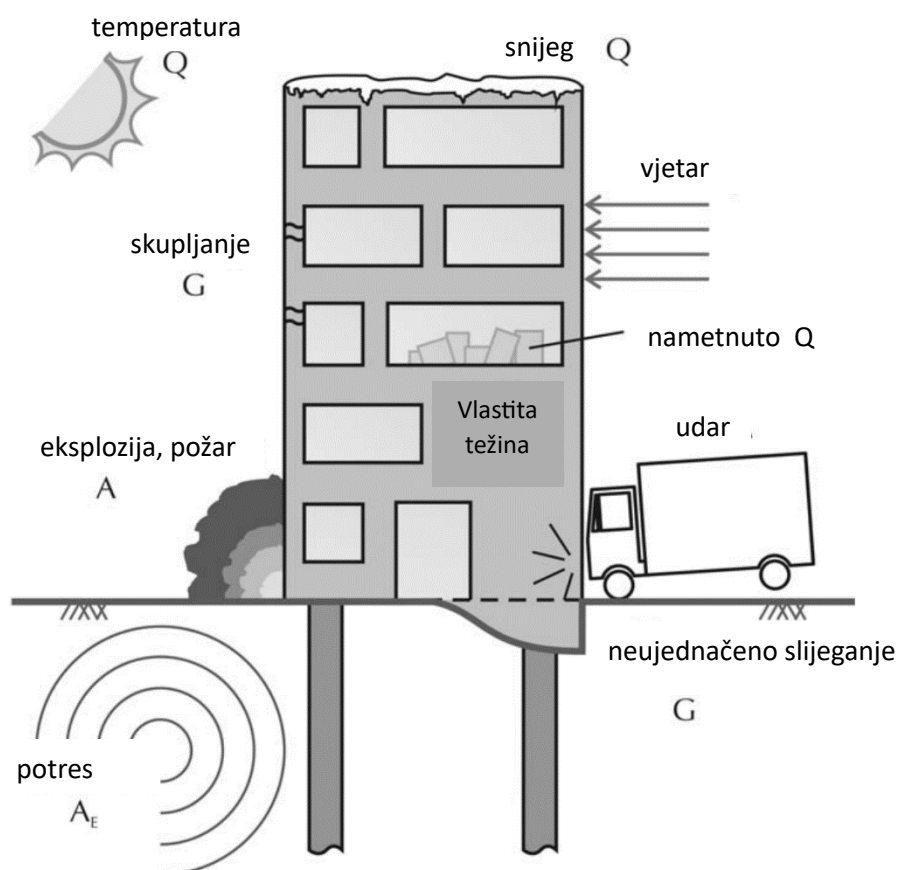
Nacionalni dodatak može sadržavati upućivanja na **neoprečne dopunske podatke (NCCI)**, što su zapravo dodatne smjernice za projektiranje koje prate određeni eurokod bez proturječnosti. Ako dođe do neslaganja, eurokodovi imaju prednost. (Bond i Harris, 2008)

2. PROVJERA ČVRSTOĆE

U eurokodovima se za opisivanje opterećenja koristi riječ **djelovanje**, a za nastale reakcije upotrebljava se riječ **učinak**. (Bond i Harris, 2008)

$$\begin{array}{ccc} \text{djelovanje} & = & \text{uzrok} \\ \downarrow & \searrow & \downarrow \\ \text{reakcija} & = & \text{učinak} \end{array}$$

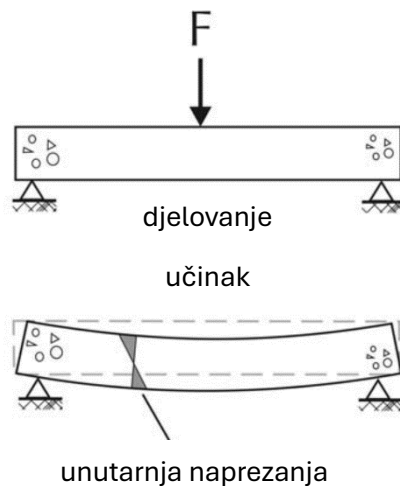
Eurokodovi razlikuju izravna i neizravna djelovanja te se označavaju slovom *F*. **Izravno djelovanje** je skup sila koje djeluju na konstrukciju, dok je **neizravno djelovanje** skup nametnutih deformacija i ubrzanja. Djelovanja klasificiramo ovisno o tome kako se mijenjaju tijekom vremena, pri čemu stalna djelovanja označavamo s *G*, promjenjiva djelovanja s *Q*, prednapinjanje s *P*, a izvanredna djelovanja s *A*. Na slici 2 prikazani su primjeri djelovanja. (Bond i Harris, 2008)



Slika 2. Primjeri djelovanja (prema Bond i Harris, 2008)

U proračunu razlikujemo karakteristične (svojstvene) i proračunske vrijednosti djelovanja. **Karakteristične vrijednosti** djelovanja (F_k) dobivaju se iz rezultata i izvedenih vrijednosti iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja, nadopunjenih dobro uspostavljenim iskustvom. **Proračunske vrijednosti** djelovanja (F_d) dobijemo umnoškom karakterističnih vrijednosti i parcijalnih koeficijenata te predstavljaju najnepovoljnije vrijednosti koje se mogu pojaviti tijekom projektiranog vijeka konstrukcije. (EN 1997-1)

U građevinarstvu, **učinci djelovanja** su funkcija djelovanja na konstrukciju i dimenzija te konstrukcije, no ne i čvrstoće materijala. To je najlakše objašnjeno *slikom 3* na kojoj je prikazana jednostavna betonska greda opterećena koncentriranom silom na sredini raspona. Opterećenje (djelovanje) uzrokuje svijanje grede i nastanak unutarnjeg naprezanja u presjeku grede (učinci djelovanja). (Bond i Harris, 2008)



Slika 3. Djelovanja i učinci na jednostavnoj gredi (prema Bond i Harris, 2008)

Otpornost je u eurokodu definirana kao sposobnost sastavnice ili presjeka sastavnice građevine da podnese djelovanja bez mehaničkoga sloma, npr. otpornost temeljnoga tla, otpornost na savijanje, otpornost na izvijanje te vlačna otpornost (EN 1997-1). U građevinarstvu, otpornost je funkcija čvrstoće materijala i dimenzija konstrukcije, ali ne i djelovanja na nju. (Bond i Harris, 2008)

2.1. Osnove proračuna

Eurokodovi se temelje na principu graničnih stanja koja dijelimo na granična stanja nosivosti (GSN) i uporabivosti (GSU). U ovom radu razmatraju se samo GSN, odnosno granična stanja koja vode do zakazivanja tla ili konstrukcije. Kod proračuna prema graničnim stanjima provjerava se da relevantna granična stanja nisu prekoračena u određenim proračunskim okolnostima. Provjere se provode preko konstrukcijskih modela i modela opterećenja, a varijable u proračunu dijelimo na tri osnovne skupine: djelovanja, materijalna svojstva i geometrijska svojstva. (Bond i Harris, 2008)

U Eurokodu 7 definirano je pet graničnih stanja nosivosti za koja su definirani različiti parcijalni koeficijenti (EN 1997-1):

- EQU – gubitak ravnoteže građevine ili temeljnog tla razmatranog kao kruto tijelo, u kojem čvrstoće materijala i tla neznatno doprinose otpornosti
- STR – unutarnji slom ili prekomjerna deformacija građevine ili njezinih dijelova, (uključujući, npr. temeljne stope, pilote i zidove podruma), za koje čvrstoća materijala bitno doprinosi otpornosti
- GEO – slom ili prekomjerna deformacija temeljnog tla pri kojoj čvrstoća tla ili stijene znatno doprinosi otpornosti
- HYD – hidraulički slom, unutarnja erozija tla i stvaranje erozijskih kanala u temeljnome tlu koje prouzrokuje tečenje u potencijalnom polju
- UPL – gubitak ravnoteže građevine ili temeljnoga tla prouzročen njihovim izdizanjem zbog uzgona vode ili drugih vertikalnih djelovanja.

Do **graničnog stanja EQU** dolazi ako su destabilizirajući učinci djelovanja ($E_{dst,d}$) veći od stabilizirajućih učinaka djelovanja ($E_{stb,d}$). Odnosno, da ne dođe do graničnog stanja EQU, treba vrijediti izraz (Bond i Harris, 2008):

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

U proračunu se to zapisuje i kao odnos destabilizirajućih i stabilizirajućih učinaka djelovanja te naziva faktorom sigurnosti (Λ_{EQU}). Kako bi zahtjevi proračuna bili zadovoljeni, faktor sigurnosti mora biti manji ili jednak 100%. Ako je faktor sigurnosti veći od 100%, konstrukcija ne zadovoljava uvjete sigurnosti određene Eurokodom, no nije nužno i nestabilna (Bond i Harris, 2008).

$$\Lambda_{EQU} = \frac{E_{dst,d}}{E_{stb,d}} \leq 100\% \quad (2)$$

Granična stanja STR i GEO postižu se kad je proračunska otpornost (R_d) manja od proračunskih učinaka djelovanja (E_d). Odnosno, kako bi čvrstoća konstrukcije bila zadovoljavajuća, proračunski učinci djelovanja ne smiju biti veći od odgovarajuće proračunske otpornosti. U Eurokodu 7 dan je izraz (Bond i Harris, 2008):

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

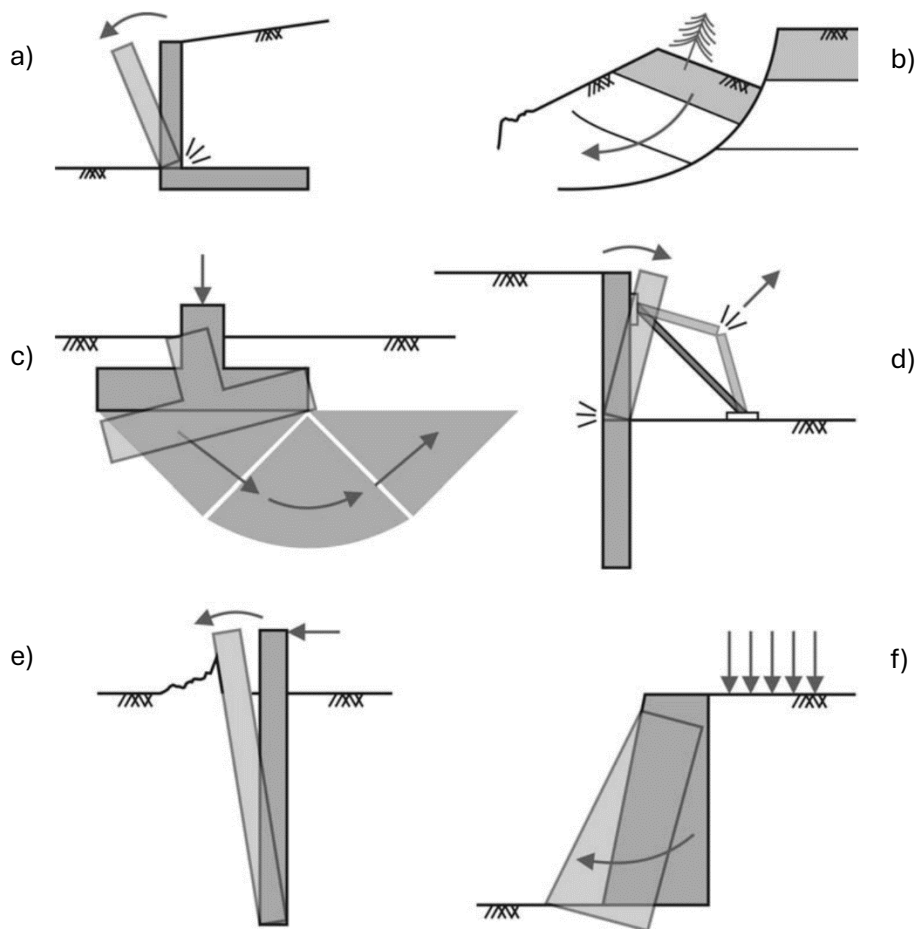
Faktor sigurnosti dan je izrazom (Bond i Harris, 2008):

$$\Lambda = \frac{E_d}{R_d} \leq 100\% \quad (4)$$

Granično stanje GEO često je kritično za dimenzioniranje nosivih dijelova temelja ili potpornih građevina, a ponekad i za čvrstoću nosivih dijelova (EN 1997-1).

Na slici 4 prikazani su primjeri situacija gdje se čvrstoća uzima u obzir (Bond i Harris, 2008).

- a) Konzolni zid mora izdržati sile od tla iza lica zida (STR).
- b) Kosina mora biti dovoljne čvrstoće da izdrži vlastitu težinu i druga djelovanja (GEO).
- c) Temeljna stopa mora biti dovoljne čvrstoće da izdrži opterećenja koja djeluju na zid (GEO).
- d) Zagatna stijena mora biti dovoljne čvrstoće da izdrži otpor tla na cijeloj svojoj visini (STR).
- e) Tlo koje pridržava pilot na koji djeluju horizontalna opterećenja, mora biti dovoljne čvrstoće da spriječi prekomjerne horizontalne pomake (GEO).
- f) Tlo ispod masivnoga betonskog potpornog zida mora biti dovoljne čvrstoće da izdrži težinu samog zida i opterećenja na njega (GEO).



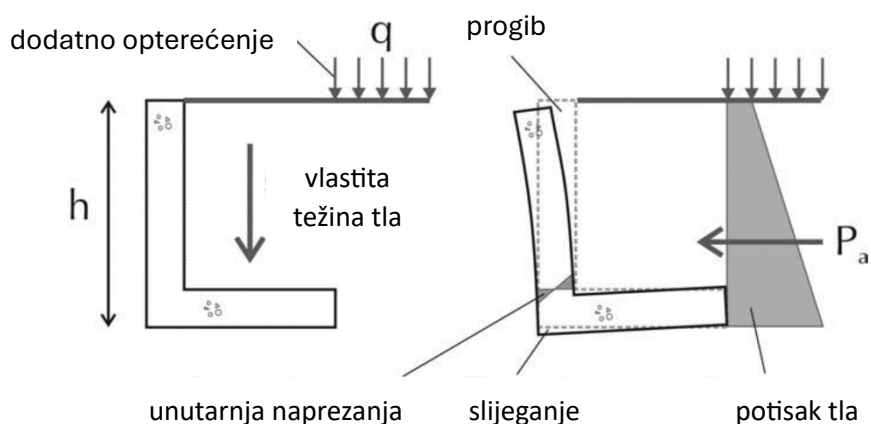
Slika 4. Primjeri graničnih stanja nosivosti gdje se čvrstoća uzima u obzir (Bond i Harris, 2008)

2.1.1. Geotehnički proračun

Učincima djelovanja općenito nazivamo unutarnje sile, momente, naprezanja i deformacije u dijelovima građevine te progib i rotaciju cijele građevine.

U većini proračuna, kod provjere graničnog stanja STR koriste se učinci djelovanja koji ne ovise o čvrstoći materijala, no u mnogim geotehničkim proračunima, kod provjere graničnih stanja STR i GEO koriste se učinci djelovanja koji ovise o čvrstoći tla.

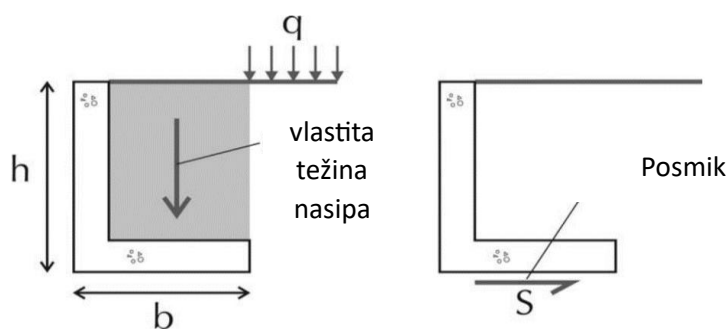
Na primjeru sa *slike 5* prikazan je potporni zid opterećen vlastitom težinom tla i kontinuiranim opterećenjem. Zbog aktivnog potiska tla koji djeluje na lice zida nastaje horizontalna klizna sila (učinak djelovanja). To je razlog zašto, iako se u eurokodovima ne uzimaju u obzir svojstva materijala, kod geotehničkog proračuna mora uzeti u obzir i čvrstoća tla. Zbog složenosti proračuna koji uključuju geotehnička djelovanja, odnosno svojstva materijala, dolazi do uporabe različitih metoda proračuna. (Bond i Harris, 2008)



Slika 5. Djelovanja (lijevo) i učinci (desno) za gravitacijski potporni zid L-oblika (prema Bond i Harris, 2008)

Također, u većini proračuna, kod provjere graničnog stanja STR, u obzir su uzete **otpornosti** koje ne ovise o djelovanjima. Međutim, u mnogim geotehničkim proračunima provjera graničnih stanja STR i GEO uključuje otpornosti ovisne o djelovanjima.

Na primjeru sa *slike 6* prikazana je otpornost na klizanje potpornog zida iz prethodnog primjera. Otpornost ovisi o dimenzijama zida, vlastitoj težini tla te čvrstoći na spojnoj površini konstrukcije i temeljnog tla. To je samo još jedan primjer zašto, za razliku od izraza danog u Eurokodovima, izraz za geotehnički proračun mora uzimati u obzir i svojstva materijala. (Bond i Harris, 2008)



Slika 6. Otpornost na klizanje gravitacijskog potpornog zida L-oblika (prema Bond i Harris, 2008)

2.2. Uvođenje pouzdanosti u proračun

U eurokodovima je sigurnost obuhvaćena u pojmu pouzdanosti. **Pouzdanost** se u proračun može uvesti na više načina, primjenom parcijalnih koeficijenata ili tolerancija. Ti parcijalni koeficijenti ili tolerancije mogu se uvesti u različitim dijelovima proračuna (ovisno o metodi i pristupu) i to na jednu ili više varijabli (Bond i Harris, 2008):

- djelovanja ili učinke djelovanja
- svojstva materijala i/ili otpornosti
- geometrijske parametre.

1.2.1. Djelovanja i učinci djelovanja

Kako bi se dobile proračunske vrijednosti učinaka djelovanja, mora se pratiti sljedeći postupak:

Karakteristična djelovanja → značajna djelovanja → proračunska djelovanja
→ proračunski učinci djelovanja

Karakteristična (svojstvena) djelovanja (F_k) računaju se u skladu s Eurokodom 1, množenjem karakteristične zapremninske težine i nazivnih dimenzija.

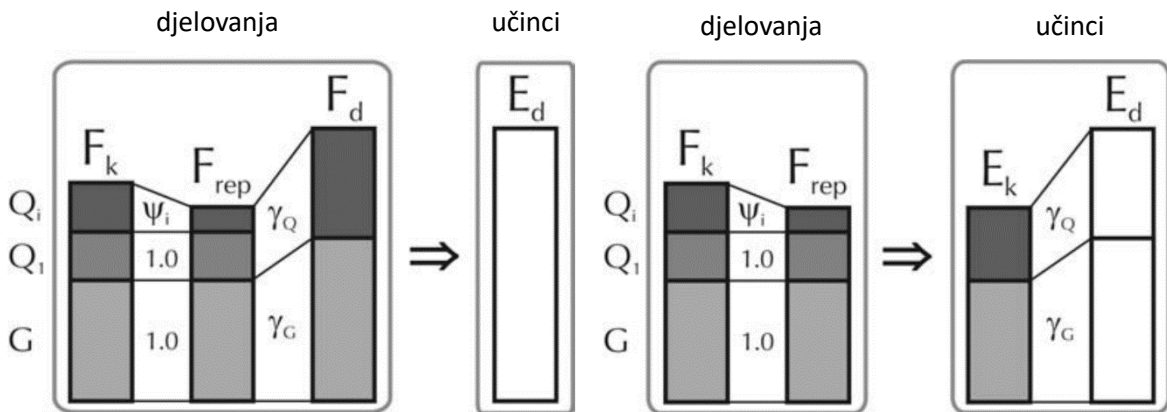
Značajna djelovanja (F_{rep}) dobivaju se množenjem karakterističnih djelovanja s koeficijentima međuzavisnosti ($\psi \leq 1$).

Ukupna proračunska djelovanja (F_d) dobivaju se množenjem sume svih značajnih djelovanja s odgovarajućih parcijalnih koeficijenata ($\gamma_F \geq 1$).

Kako bi se dobile vrijednosti **proračunskih učinaka djelovanja (E_d)**, koriste se proračunska djelovanja.

Eurokodom 7 dopuštena je primjena parcijalnih koeficijenata (γ_F) na djelovanja ili na učinke djelovanja, ali obično **ne na oboje**.

Na *slici 7* grafički su prikazane relativne veličine djelovanja, odnosno učinaka djelovanja, kada su na njih primijenjeni odgovarajući parcijalni koeficijenti (γ_G ili γ_Q) i koeficijenti kombinacija (1 ili ψ). Na dijagramima su pretpostavljene proizvoljne vrijednosti za stalna i promjenjiva djelovanja (G , Q_1 i Q_i), a strelica označuje kada se proračunske vrijednosti djelovanja uvrštavaju u proračunski model. (Bond i Harris, 2008)



Slika 7. Relativne veličine djelovanja i učinaka djelovanja kada su parcijalni koeficijenti primijenjeni na djelovanja (lijevo) i na učinke djelovanja (desno) (prema Bond i Harris, 2008)

Ako je proračunski model linearan, dobiveni učinci djelovanja bit će jednaki u oba primjera. Ako je proračunski model nelinearan, što je neizbježno u geotehničkom inženjerstvu, dobiveni učinci djelovanja bit će drukčiji. (Bond i Harris, 2008)

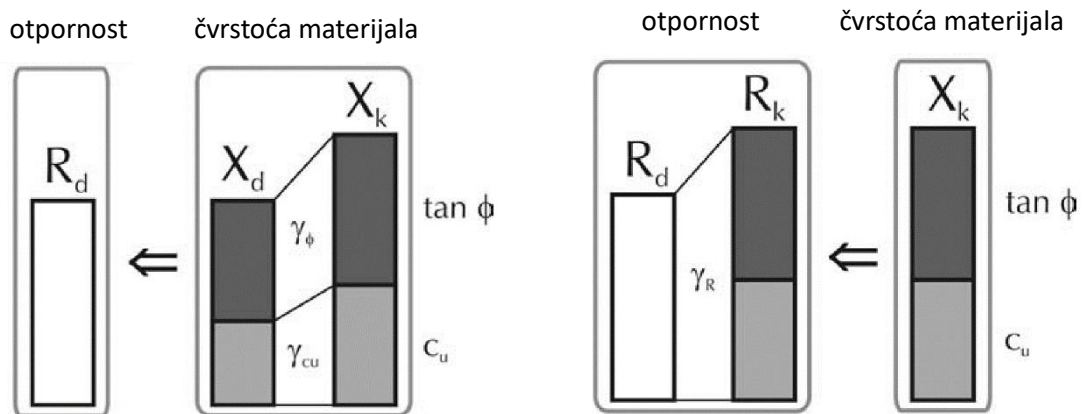
2.2.2. Svojstva materijala

Kako bi se dobile proračunske vrijednosti otpornosti, mora se pratiti sljedeći postupak:

karakteristične čvrstoće materijala \rightarrow proračunske čvrstoće \rightarrow proračunska otpornost.

Proračunska svojstva materijala (X_d) dobiju se dijeljenjem karakterističnih svojstava materijala (X_k) parcijalnim koeficijentima ($\gamma_M \geq 1$). **Proračunska otpornost** također se dobije dijeljenjem parcijalnim koeficijentom ($\gamma_R \geq 1$). Uobičajeno je da je jedan od koeficijenata γ_M ili γ_R jednak 1, što pojednostavljuje proračun.

Na dijagramima sa *slike 8* jesu pretpostavljene proizvoljne vrijednosti doprinosa otpornosti od krupnozrnatog tla karakterističnog efektivnog kuta unutarnjeg trenja (ϕ_k) i sitnozrnatog tla karakteristične nedrenirane posmične čvrstoće c_{uk} . Strelica označuje kada se proračunske vrijednosti čvrstoće materijala uvrštavaju u proračunski model. (Bond i Harris, 2008)



Slika 8. Relativne veličine otpornosti i čvrstoće materijala kada su koeficijenti primijenjeni na otpornost (lijevo) i na čvrstoće materijala (desno) (Bond i Harris, 2008)

Na *slici 8 (lijevo)* grafički je prikazan odnos relativnih veličina čvrstoća materijala i otpornosti kada su odgovarajući parcijalni koeficijenti (γ_ϕ ili γ_{cu}) primijenjeni samo na materijalna svojstva, a na *slici 8 (desno)* kada su odgovarajući koeficijenti (γ_R) primijenjeni samo na otpornost. Kad se dijagrami usporede, vidljivo je da su dobivene vrijednosti računске otpornosti drugačije ovisno o tome gdje smo u proračunu uveli koeficijente sigurnosti.

Još je jedan od važnih parametara i **geometrija**. Kako bi se ostalo na strani sigurnosti, mogu se uvesti određene **tolerancije ($\Delta\alpha$)** koje se dodaju na nominalne dimenzije te se s dobivenim vrijednostima ulazi u proračun.

Međutim, budući da bi bilo nepraktično primijeniti tolerancije na sve dimenzije koje ulaze u proračun, Eurokod dopušta upotrebu nominalnih dimenzija kao proračunskih, odnosno tolerancije mogu biti jednake nuli ($\Delta a = 0$). Ta nesigurnost obuhvaćena je u vrijednostima parcijalnih koeficijenata za djelovanja (γ_F) i svojstva materijala (γ_M). Upotreba $\Delta a \geq 0$ rezervirana je za proračunske situacije gdje je poznato da mala odstupanja u geometriji imaju velik utjecaj na učinke djelovanja i/ili otpornost. (Bond i Harris, 2008)

2.2.3. Parcijalni koeficijenti

Parcijalni koeficijenti za provjeru čvrstoće u stalnim i privremenim proračunskim situacijama dani su u Eurokodu EN 1997-1 u tablicama A.3 (za djelovanja i učinke), A.4 (za parametre tla) i A.5-8 i A.12-14 (za otpornost). Neke vrijednosti izmijenjene su u hrvatskome nacionalnom dodatku.

Parcijalni koeficijenti za djelovanja (i učinke) u izvanrednim proračunskim situacijama obično se uzimaju kao vrijednost 1, a parcijalni koeficijenti za otpornost (i parcijalni koeficijenti za svojstva materijala) određuju se ovisno o specifičnim okolnostima izvanredne situacije. (Bond i Harris, 2008)

U *Tablici 1* navedeni su parcijalni koeficijenti dani u EN 1997-1 za temelje općenito (npr. kosine, temeljne stope i zidove). Eurokod koeficijente prikazuje u skupinama. Skupine A1 i A2 odnose se na djelovanja, M1 i M2 na svojstva materijala, a R1 i R3 na otpornost.

Tablica 1. Parcijalni koeficijenti za temelje općenito (prema Bond i Harris, 2008)

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_{c_u}			1,0	1,4			
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)		γ_{q_u}			1,0	1,4			
Zapremninska težina (γ)		γ_γ			1,0	1,0			
Nosivost (R_v)		γ_{R_v}					1,0	1,4	1,0
Otpornost klizanju (R_h)		γ_{R_h}					1,0	1,1	1,0
Otpornost tla (R_e) ...potporne konstrukcije ...kosine		γ_{R_e}					1,0		1,0
								1,4	
								1,1	
Prednapeti sidreni sustavi (a)		γ_a					1,1	1,1	1,0

2.3. Proračunski pristupi

Tijekom izrade Eurokoda 7 nije postignut dogovor među zemljama o odabiru jednog proračunskog pristupa, pa je odlučeno da svaka zemlja, u nacionalnom dodatku, ima pravo birati koji će od tri pristupa koristiti.

Na *tablici 2* tablično je prikazano koje se skupine parcijalnih koeficijenata koriste u pojedinome proračunskom pristupu, ovisno o kojem se tipu konstrukcije radi. U pristupu 1 moraju se provjeriti obje kombinacije. (Bond i Harris, 2008)

Tablica 2. Parcijalni koeficijenti za pojedini proračunski pristup (prema Bond i Harris, 2008)

Konstrukcija	Setovi parcijalnih koeficijenata koji se koriste u Proračunskim pristupima			
	1		2	3
	kombinacija 1	kombinacija 2		
Općenito	<u>A1</u>	<u>M2</u>	<u>A1 & R2</u>	<u>A1 & M2</u>
	& M1 & R1	& <u>A2</u>	& M1	& <u>A2</u>
		& R1		& R3
Kosine			<u>E1 & R2</u>	<u>M2</u>
			& M1	& E2 & R3
Piloti i sidra	<u>A1</u>	<u>R4</u>	<u>A1 & R2</u>	<u>A1 & M2</u>
	& R1	& <u>A2</u>	& <u>R2</u>	& <u>A2 & R3</u>
	& M1	& M1	& M1	

Dvostruko su podcrtane skupine u kojima su parcijalni koeficijenti znatno veći od 1, odnosno uvode pouzdanost u proračun. Jednostruko su podcrtane skupine u kojima je samo jedan koeficijent veći od jedan ili su koeficijenti relativno mali. Skupine u kojima su svi faktori jednaki 1 nisu podcrtane.

U biti, u proračunskom **pristupu 1** pouzdanost se osigurava primjenom parcijalnih koeficijenata na dvije varijable u **dva odvojena proračuna** (kombinacije 1 i 2), dok pristupi **2 i 3** primjenjuju parcijalne koeficijente **istodobno na dvije varijable** što je prikazano u *tablici 3*. (Bond i Harris, 2008)

Tablica 3. Glavne varijable za pojedini proračunski pristup (prema Bond i Harris, 2008)

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

2.3.1. Proračunski pristup 1

U Proračunskom pristupu 1 pouzdanost konstrukcije provjerava se u dvjema fazama. Prvo se parcijalni koeficijenti primjenjuju samo na **djelovanja**, odnosno primjenjuju se parcijalni koeficijenti za kombinaciju 1 (A1, M1 i R1).

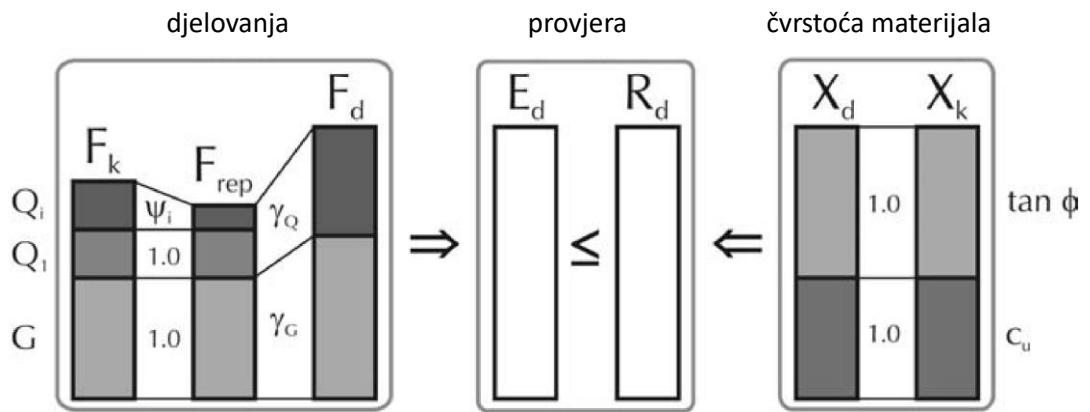
Zatim se proračun ponavlja, ali se parcijalni koeficijenti primjenjuju samo na **čvrstoću tla** i **promjenjiva djelovanja**. Tu se primjenjuju koeficijenti za kombinaciju 2 (A2, M2 i R1).

U proračunskom pristupu 1 koeficijenti se rano uvode u proračun, a njihove vrijednosti dane su u *tablici 4*. (Bond i Harris, 2008)

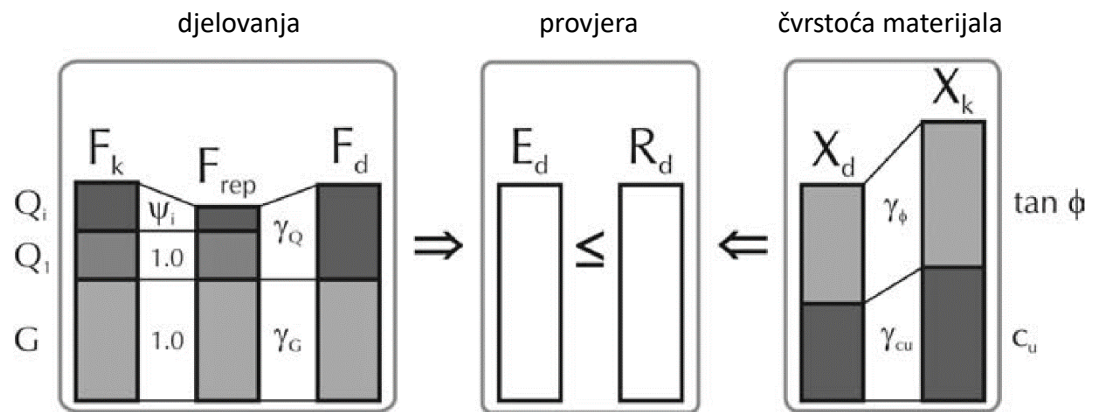
Tablica 4. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 1 (prema Bond i Harris, 2008)

Proračunski pristup 1			Kombinacija 1			Kombinacija 2		
			A1	M1	R1	A2	M2	R1
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_{c_u}		1,0			1,4	
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)		γ_{q_u}		1,0			1,4	
Zapremninska težina (γ)		γ_V		1,0			1,0	
Otpornost (R)		γ_R			1,0			1,0

Na *slikama 9 i 10* grafički su prikazani odnosi relativnih veličina ključnih parametara za kombinacije 1 i 2. Kad se dijagrami usporede, vidljivo je da su dobivene vrijednosti računске otpornosti i učinaka djelovanja drukčije ovisno o tome gdje smo u proračunu uveli parcijalne koeficijente. (Bond i Harris, 2008)



Slika 9. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 1, kombinacija 1 (prema Bond i Harris, 2008)



Slika 10. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 1, kombinacija 2 (prema Bond i Harris, 2008)

2.3.2. Proračunski pristup 2

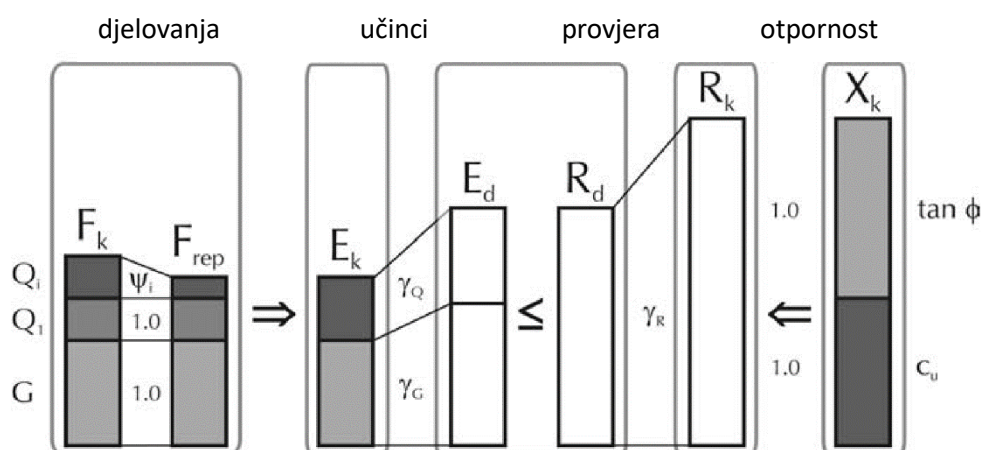
U Proračunskom pristupu 2 pouzdanost konstrukcije provjerava se tako da se parcijalni koeficijenti (A1, M1 i R2) istodobno primijene na **djelovanja, učinke djelovanja i otpornost**, dok se čvrstoća tla ne mijenja.

U proračunskom pristupu 2 koeficijenti se u proračun uvode čim kasnije, a njihove vrijednosti dane su u *tablici 5*. (Bond i Harris, 2008)

Tablica 5. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 2 (prema Bond i Harris, 2008)

Proračunski pristup 2			A1	M1	R2
Stalna djelovanja (G)	Nepovoljna	γ_G	1,35		
	Povoljna	$\gamma_{G,fav}$	1,0		
Promjenjiva djelovanja (Q)	Nepovoljna	γ_Q	1,5		
	Povoljna	$\gamma_{Q,fav}$	0		
Svojstva materijala (X)		γ_M		1,0	
Nosivost (R_v)		γ_{Rv}			1,4
Otpornost na klizanje (R_n)		γ_{Rn}			1,1
otpor tla na potporne građevine ...kosine		γ_{Re}			1,4
					1,1

Na *slici 11* grafički je prikazan odnos relativnih veličina ključnih parametara u proračunu po proračunskom pristupu 2. (Bond i Harris, 2008)



Slika 11. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 2 (prema Bond i Harris, 2008)

2.3.3. Proračunski pristup 3

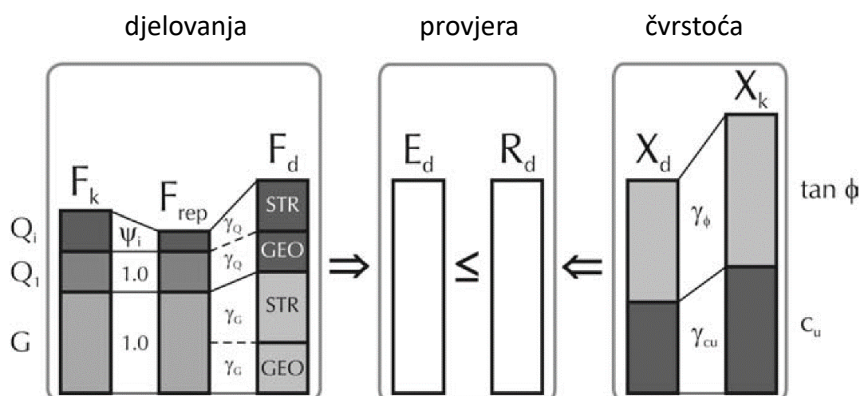
U Proračunskom pristupu 3 pouzdanost konstrukcije provjerava se tako da se parcijalni koeficijenti (A1/A2, M2 i R3) istodobno primijene na **konstrukcijska djelovanja** i **svojstva materijala**, dok su geotehnička djelovanja i otpornosti uglavnom nepromijenjene.

U proračunskom pristupu 3 koeficijenti se rano uvode u proračun, a njihove vrijednosti dane su u *tablici 6*. (Bond i Harris, 2008)

Tablica 6. Vrijednosti parcijalnih koeficijenata za proračunski pristup 3 (prema Bond i Harris, 2008)

Proračunski pristup 3			A1	A2	M2	R1
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

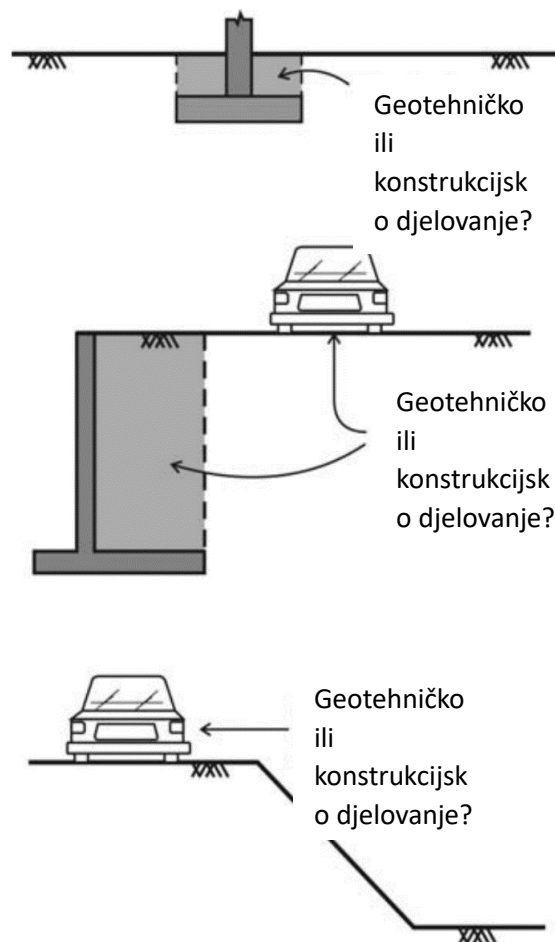
Na *slici 12* grafički je prikazan odnos relativnih veličina ključnih parametara u proračunu po proračunskom pristupu 3. (Bond i Harris, 2008)



Slika 12. Odnosi relativnih veličina ključnih parametara za proračunski pristup 3 (prema Bond i Harris, 2008)

Kod proračunskog pristupa 3 važno je razlikovati konstrukcijska i geotehnička djelovanja jer se ovisno o tome primjenjuju drukčiji koeficijenti (Bond i Harris, 2008). U Eurokodu je dana definicija **geotehničkog djelovanja** kao djelovanja prenesenog na građevinu s temeljnog tla, nasipa, otvorene vode stajaće ili podzemne vode (EN 1997-1). **Konstrukcijsko djelovanje** nije jasno definirano, no implicirano je da je to djelovanje koje nije geotehničko.

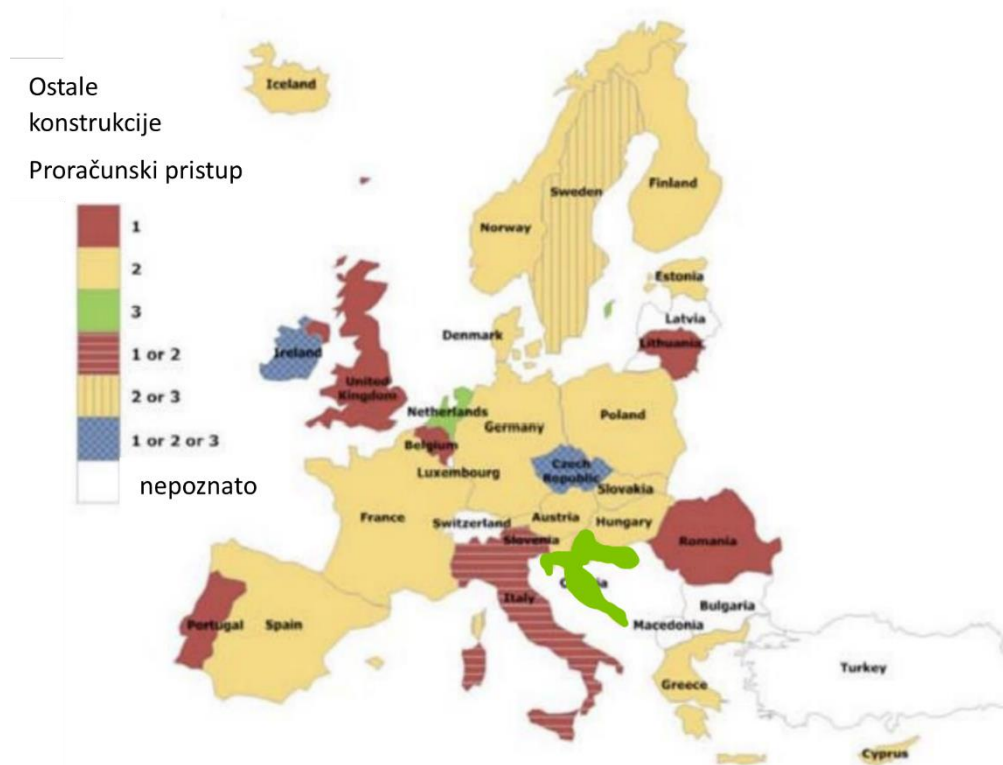
Na slici 13 dani su primjeri djelovanja za koje nije jasno definirano jesu li geotehničko ili konstrukcijsko djelovanje. Na primjer, ako se strogo drži definicije za geotehnička djelovanja, dolazi se do zaključka da je prometno djelovanje primijenjeno na gravitacijski zid geotehničko djelovanje. Iako to može predstavljati problem, on je većinom akademske prirode jer se pristup 3 gotovo isključivo koristi za proračun kosina, gdje se na sva djelovanja gleda kao geotehnička. (Bond i Harris, 2008)



Slika 13. Primjeri djelovanja za koje nije jasno definirano jesu li geotehničko ili konstrukcijsko djelovanje (prema Bond i Harris, 2008)

2.3.4. Izbor proračunskog pristupa u različitim europskim zemljama

Kao što je već spomenuto, svaka zemlja članica CEN-a ima pravo u svojem nacionalnom dodatku odabrati koji se proračunski pristup mora koristiti unutar njezine nadležnosti. Odabir proračunskog pristupa u pojedinoj zemlji odražava tradicije i inženjerske prakse te zemlje, a ne ocjenu filozofskih i inženjerskih vrijednosti proračunskog pristupa. Na slici 14 prikazano je koji pristup je izabrala pojedina zemlja članica. (Bond i Harris, 2008)



Slika 14. Odabir proračunskog pristupa za proračun ostalih konstrukcija po zemljama (prema Bond i Harris, 2008, uredila autorica)

Na slici 14 vidimo da je za proračun ostalih konstrukcija (osim kosina) najviše zemalja odabralo pristup 2, zatim pristup 1, a samo tri zemlje odabrale su proračunski pristup 3. Irska i Češka dopuštaju sva tri pristupa. (Bond i Harris, 2008) U Hrvatskoj se koristi proračunski pristup 3.

3. PROVJERA STABILNOSTI

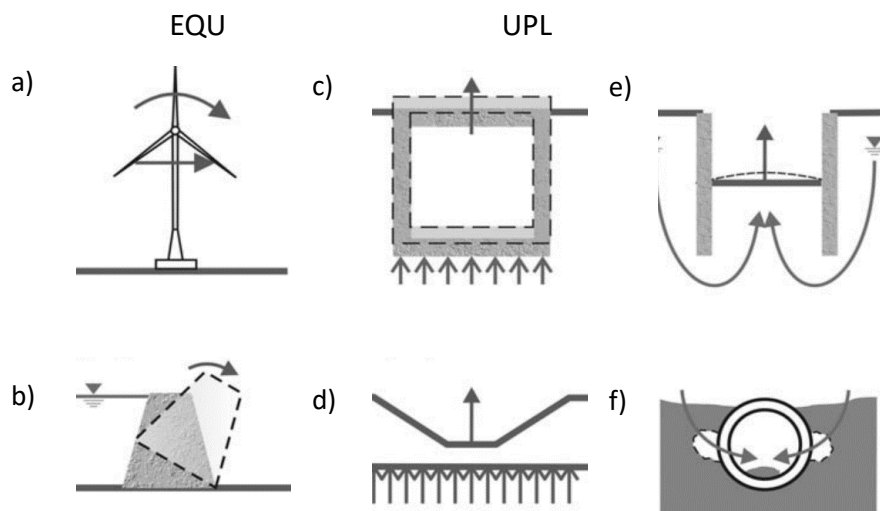
3.1. Osnove proračuna

Provjera stabilnosti obuhvaća provjeru da proračunski destabilizirajući učinci djelovanja ($E_{dst,d}$) ne premašuju zbroj odgovarajućih proračunskih stabilizirajućih učinaka ($E_{stb,d}$) i proračunske otpornosti (R_d) koja djeluje stabilizirajuće. U Eurokodu 7 to je zapisano u obliku jednakosti (Bond i Harris, 2008):

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + R_d \quad (5)$$

Taj se zahtjev primjenjuje na granična stanja nosivosti EQU, UPL i HYD. Na *slici 15* vidimo primjere gdje je važno provjeriti stabilnost konstrukcije za svako od tih stanja. (Bond i Harris, 2008)

- a) Momenti prevrtanja na vjetrenjači ne smiju biti veći od momenata nastalih zbog temelja (EQU).
- b) Momenti prevrtanja na vodonepropusnom kesonu ne smiju biti veći od momenata uzrokovanih njegovom težinom (EQU).
- c) Uzgonske sile u podrumu nastale zbog efektivnoga povratnog naprezanja ne smiju biti veće od težine konstrukcije zbrojene s posmikom na zidovima (UPL).
- d) Uzgon uzrokovan pornim tlakom ispod dna usjeka ne smije biti veći od težine tla u usjeku (UPL).
- e) Hidrauličko izdizanje tla uzrokovano dotokom vode zbog različitih razina vode oko zagatne stijene mora biti prihvatljivo (HYD).
- f) Erozija tla uzrokovana velikim hidrauličkim gradijentima mora se izbjegavati (HYD).



Slika 15. Primjeri graničnih stanja nosivosti (prema Bond i Harris, 2008)

3.2. Uvođenje pouzdanosti u proračun

Pouzdanost konstrukcije protiv gubitka stabilnosti u proračun se uvodi primjenom parcijalnih koeficijenata (ili tolerancija) na:

- destabilizirajuća djelovanja (F_{dst})
- stabilizirajuća djelovanja (F_{stb})
- svojstva materijala (X) ili otpornosti (R)
- geometrijske parametre (a).

Proračunska stabilizirajuća ($F_{d,stb}$) i destabilizirajuća djelovanja ($F_{d,dst}$) dobivaju se **množenjem** karakterističnih djelovanja ($F_{k,stb}$; $F_{k,dst}$), prvo kombinacijskim koeficijentom ψ (gdje je potrebno) i onda parcijalnim koeficijentima $\gamma_{F,stb} = 0-0.9$, odnosno $\gamma_{F,dst} = 1.1-1.5$.

Proračunska svojstva materijala (X_d) i otpornosti (R_d) dobivaju se **dijeljenjem** karakterističnih vrijednosti (X_k ; R_k) parcijalnim koeficijentima $\gamma_M = 1.0-1.4$, odnosno $\gamma_R = 1.0-1.4$.

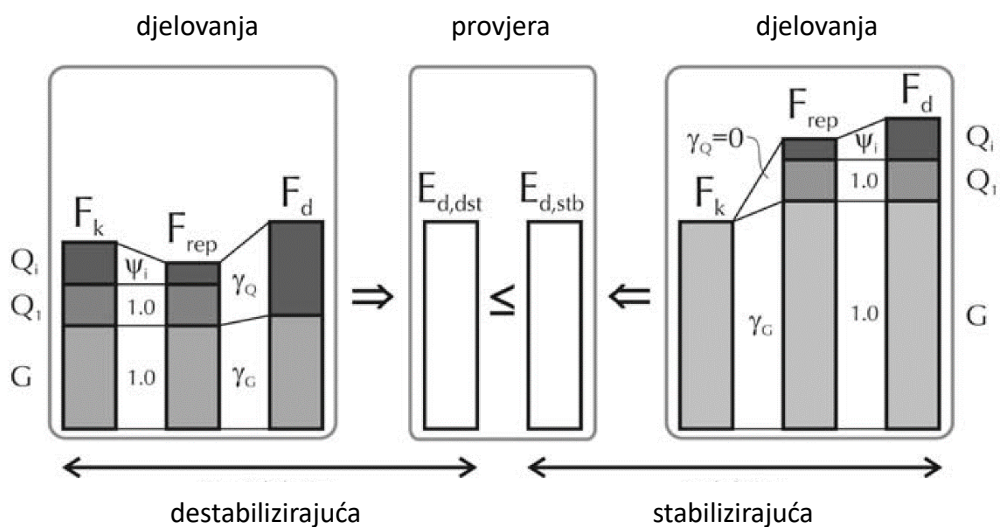
Proračunske vrijednosti dimenzija (a_d) dobivaju se **dodavanjem** ili **oduzimanjem** tolerancija (Δa) od nazivnih dimenzija. (Bond i Harris, 2008)

Parcijalni koeficijenti za provjeru stabilnosti po graničnim stanjima ispisani su u *tablici 7*.

Tablica 7. Parcijalni koeficijenti za provjeru stabilnosti (prema Bond i Harris, 2008)

Parametar			Granično stanje nosivosti		
			EQU	UPL	HYD
Stalna djelovanja (G)	Destabilizirajuća	$\gamma_{G,dst}$	1,1	1,0	1,35
	Stabilizirajuća	$\gamma_{G,stab}$	0,9	0,9	0,9
Promjenjiva djelovanja (Q)	Destabilizirajuća	$\gamma_{Q,dst}$	1,5	1,5	1,5
	Stabilizirajuća	$\gamma_{Q,stab}$	0	0	0
Koeficijent kuta unutarnjeg trenja (tan ρ)		γ_p	1,25	1,25	-
Efektivna kohezija (c')		$\gamma_{c'}$	1,25	1,25	
Nedrenirana posmična čvrstoća (c_u)		γ_{c_u}	1,4	1,4	
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)		γ_{q_u}	1,4	1,4	
Zapremninska težina (γ)		γ_γ	1,0	1,0	
Otpornost tlačnih pilota (R_{st})		γ_{st}		1,4	-
Otpornost klizanju (R_a)		γ_a		1,4	

Na slici 16 prikazan je odnos relativnih veličina ključnih parametara kod provjere graničnih stanja EQU, UPL i HYD. Jasno je vidljivo da se vrijednosti stabilizirajućih djelovanja pomoću parcijalnih koeficijenata smanjuju, dok se vrijednosti destabilizirajućih djelovanja povećavaju. (Bond i Harris, 2008)



Slika 16. Odnos relativnih veličina ključnih parametara kod provjere graničnih stanja nosivosti (prema Bond i Harris, 2008)

4. PRORAČUN GRAVITACIJSKIH ZIDOVA

Poglavlje 9 u Eurokodu posvećeno je proračunu potpornih građevina. Navedene su tri glavne vrste: gravitacijski zidovi, zagatne stijene i složene potporne građevine.

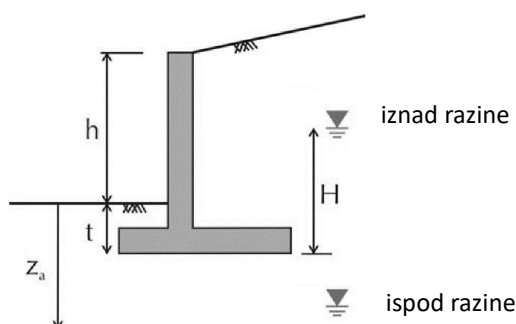
Gravitacijski zidovi definirani su kao zidovi kod kojih težina samoga zida (uključujući stabilizirajuće mase tla, stijene ili zasipa) ima znatnu ulogu u pridržavanju gradiva. Obično su to zidovi od kamena, opeke, nearmiranog ili armiranog betona, koji na nožici mogu, ali ne moraju imati petu, prednju istaku ili kontrafor.

Zagatne stijene jesu zidovi kod kojih nosivost na savijanje ima znatnu ulogu u pridržanju gradiva, dok je uloga njihove težine beznačajna. To su razmjerno tanki zidovi od čelika, armiranog betona ili drva, pridržani sidrima, razuporama i/ili pasivnim otporom tla.

Složene potporne građevine zidovi su sačinjeni od dijelova gornjih dviju vrsta zidova. Postoji velika raznolikost takvih zidova, a primjeri uključuju zagate s dvostrukim žmurjem, zemljane građevine ojačane zategama, geotekstilima ili injektiranjem te građevine s višestrukim redovima geotehničkih sidara ili čavlanim tlom. (EN 1997-1)

4.1. Istraživanje temeljnog tla za gravitacijske zidove

U Eurokodu su dane osnovne smjernice za odabir dubine točaka istraživanja za potporne građevine. Na *slici 17* prikazane su osnovne dubine potrebne za proračun. (Bond i Harris, 2008)



Slika 17. Preporučene dubine točaka istraživanja (prema Bond i Harris, 2008)

Preporučena minimalna dubina istraživanja (z_a) za iskope gdje je razina podzemne vode ispod razine tla vrijedi (Bond i Harris, 2008):

$$z_a = \max \begin{cases} z_a \geq 0.4h \\ z_a \geq (t + 2m) \end{cases}$$

Kada je razina podzemne vode iznad razine tla, vrijedi (Bond i Harris, 2008):

$$z_a = \max \begin{cases} z_a \geq (H + 2m) \\ z_a \geq (t + 2m) \end{cases}$$

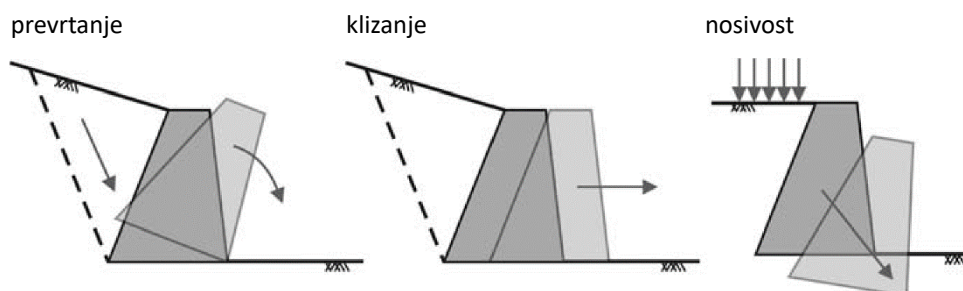
Ako su svi slojevi tla nepropusni, dubina istraživanja također treba zadovoljavati i (Bond i Harris, 2008):

$$z_a \geq (t + 5m)$$

Dubina z_a može biti smanjena na 2m ako se zid gradi na kompetentnim slojevima poznate geologije. Ako je geologija tla nepoznata, barem jedna bušotina treba biti dubine 5m. Ako se naiđe na čvrstu stijenu, ona postaje referentna razina za z_a . Također, kada se radi o vrlo velikim ili iznimno složenim projektima ili pak o nepovoljnim geološkim uvjetima, potrebne su veće dubine istraživanja. (Bond i Harris, 2008)

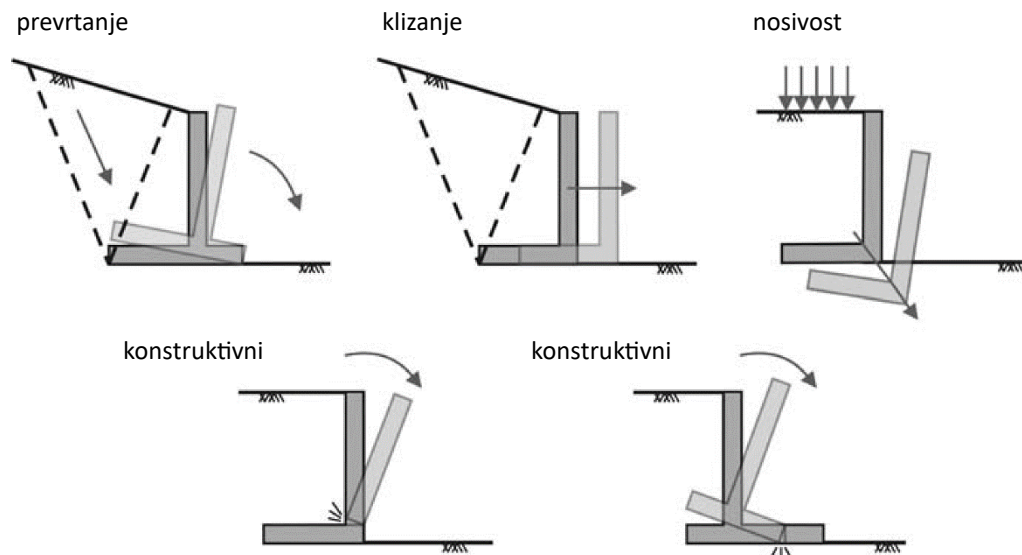
4.2. Proračunske okolnosti i granična stanja

U Eurokodu 7 prikazan je niz graničnih oblika za gravitacijske zidove, uključujući cjelokupnu stabilnost, slom temelja i slom građe. Na slici 18 dani su primjeri graničnih stanja nosivosti koja mogu utjecati na masivni gravitacijski zid. To su slom prevrtanjem, klizanjem i prekoračenjem nosivosti. (Bond i Harris, 2008)



Slika 18. Preporučene dubine točaka istraživanja (prema Bond i Harris, 2008)

Na *slici 19* prikazani su primjeri GSN koja utječu na gravitacijske zidove u obliku L i T. To su prevrtanje, klizanje, prekoračenje nosivosti, konstruktivni slom trupa i nožice zida. (Bond i Harris, 2008)



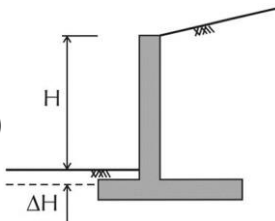
Slika 19. Primjeri GSN koja utječu na gravitacijske zidove u obliku L i T (prema Bond i Harris, 2008)

4.3. Osnove proračuna

Prema pravilima danim u Eurokodu, gravitacijski zidovi moraju biti projektirani tako da ne dođe do sloma temelja, odnosno do sloma klizanjem ili prekoračenjem nosivosti. Također, ne smije doći do sloma zbog gubitka opće stabilnosti tla u kojem su građeni. Eurokod 7 ne daje mnogo smjernica za proračun gravitacijskih potpornih zidova, ali navodi potrebnu razinu pouzdanosti neovisno o metodi projektiranja. Potrebna pouzdanost je osigurana kombiniranjem parcijalnih koeficijenata za parametre, tolerancija za dimenzije i odabirom odgovarajućih razina vode.

Kod proračuna gravitacijskih zidova mora se uzeti u obzir mogućnost **neplaniranog iskopa** i smanjenja razine tla kod potpornog dijela zida. Kod uobičajene razine kontrole gradilišta, provjera GSN pretpostavlja povećanje visine ΔH (*slika 20*). Ako je razina površine posebno nesigurna, koriste se veće vrijednosti ΔH . Sukladno tome, mogu se koristiti i manje vrijednosti ΔH (uključujući $\Delta H=0$) kada se tijekom izvođenja provode

mjere za pouzdano kontroliranje razine tla. Te se mjere odnose samo na proračun GSN, ne i GSU. Predviđeni iskopi ispred zida računaju se zasebno jer po definiciji nisu neplanirani. (Bond i Harris, 2008)

$$\Delta H = \frac{H}{10} \leq 0.5m \quad (6)$$


The diagram shows a cross-section of a retaining wall. The wall has a vertical stem of height H and a base. To the left of the wall, there is an excavation of depth ΔH. A dashed horizontal line indicates the original ground level, and a solid horizontal line indicates the new ground level after excavation. The wall is shown in grey.

Slika 20. Tolerancija kod neplaniranog iskopa (Bond i Harris, 2008)

Pravila dana u Eurokodu projektantu daju znatnu slobodu kod rješavanja rizika prekomjernog iskopa. Kako bi postigla veća ekonomičnost, može se usvojiti $\Delta H=0$. Taj se rizik tada mora kontrolirati tijekom gradnje, no to zahtijeva nadzor koji se specificira u izvještaju o geotehničkom projektu.

Proračunski kut **trenja zida** δ_d može se izraziti kao:

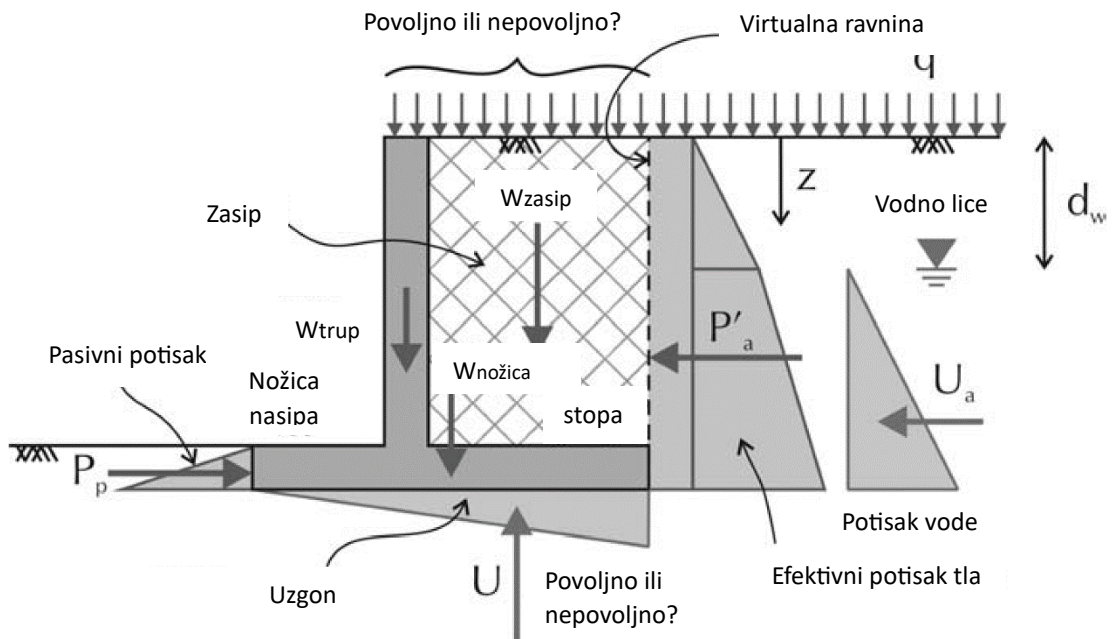
$$\delta_d = k \cdot \phi_{cv,d} \quad (7)$$

Gdje je $\phi_{cv,d}$ proračunska vrijednost kuta unutarnjeg trenja pri kritičnom stanju. Za zidove od predgotovljenih betonskih elemenata koji zadržavaju pijesak ili šljunak $k=2/3$, a za in-situ betonske zidove $k=1$.

Kod proračuna gravitacijskih zidova javlja se pitanje **pasivnog otpora tla**, odnosno je li to povoljno djelovanje ili otpornost. Ako je pasivni pritisak tla povoljno djelovanje, on se množi parcijalnim koeficijentom, a ako je otpornost, dijeli se. Ako pogledamo tablicu koeficijenata, vidimo da je samo parcijalni koeficijent za otpornost u proračunskom pristupu 2 različit od 1, odnosno samo tada utječe na rezultat. Stoga se u većini proračuna prisutnost pasivnog potiska tla zanemaruje. (Bond i Harris, 2008)

4.4. Armiranobetonski zidovi

Na slici 21 prikazan je gravitacijski T zid i djelovanja na njega. Pretpostavljeno je dodatno opterećenje q na površini temeljnog tla i vodno lice iznad razine tla. Također je pretpostavljeno da je stopa zida dovoljno široka za formiranje Rankinove zone u zasipu iznad stope. (Bond i Harris, 2008)



Slika 21. Potisci tla koji djeluju na armiranobetonski zid (prema Bond i Harris, 2008)

Ukupni horizontalni tlak tla σ_a koji djeluje na virtualnoj ravnini na dubini z ispod površine temeljnog tla dan je izrazom (adhezija je zanemarena jer djeluje povoljno) (Bond i Harris, 2008):

$$\sigma_a = \sigma'_a + u = K_a \left(\int_0^z \gamma dz + q - u \right) - 2c'\sqrt{K_a} + u \quad (8)$$

Gdje je: σ'_a horizontalni efektivni tlak tla
 u porni tlak u tlu na dubini z
 K_a koeficijent aktivnog potiska tla
 γ zapremninska težina tla
 c' efektivna kohezija tla
 q dodatno opterećenje na površini temeljnog tla iza virtualne ravnine.

Porni tlak dan je izrazom:

$$u = \gamma_w \cdot (z - d_w) \quad (9)$$

gdje je γ_w zapremninska težina vode, a d_w dubina vodnog lica ispod vrha zida. Ako je porni tlak jednak nuli (zasip je iznad vodnog lica), jednadžba za σ_a se pojednostavljuje.

Pomoću tih jednadžbi i sljedećeg izraza moguće je izračunati efektivni aktivni pritisak tla i vode (P_a i U_a):

$$P'_a = \int_0^H \sigma'_a dz \quad (10)$$

$$U_a = \int_0^H u dz \quad (11)$$

gdje je H visina virtualne ravnine iznad stope zida. Oba djelovanja nepovoljna su za nosivost, klizanje i prevrtanje zida. (Bond i Harris, 2008)

4.4.1. Nosivost

Prema Eurokodu, proračunsko vertikalno djelovanje V_d koje djeluje na temelj zida mora biti manje ili jednako proračunskoj nosivosti (R_d) tla ispod njega:

$$V_d \leq R_d \quad (12)$$

što se može zapisati i kao:

$$q_{Ed} = \frac{\gamma_G W_{Gk} + \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_i V_{Qk,i}}{A'} = \gamma_G \left(\frac{W_{Gk}}{A'} \right) + \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_i q_{Qk,i} \quad (13)$$

Gdje su: W_{Gk} stalna karakteristična vlastita težina zida (uključujući zasip)

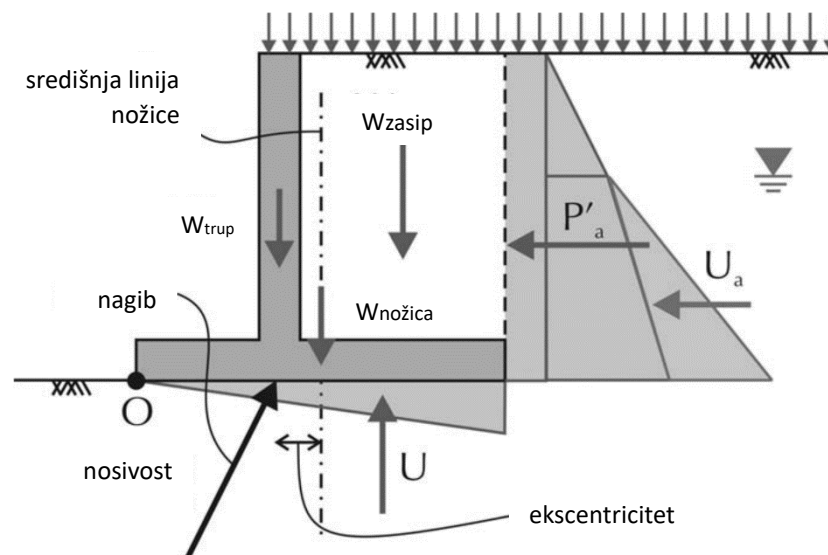
V_{Qk} promjenjiva karakteristična vertikalna djelovanja na zid (lijevo od virtualne ravnine)

A' efektivna površina nožice

γ_G, γ_Q parcijalni koeficijenti stalnih i promjenjivih djelovanja

ψ_i koeficijent kombinacije.

Vlastita težina zida je zbroj težina trupa zida, nožice zida i zasipa (W_{trup} , $W_{nožica}$, W_{zasip} na slici 22). Budući da su to u proračunu nosivosti nepovoljna djelovanja, za karakteristične zapremninske težine uzimaju se gornje vrijednosti. (Bond i Harris, 2008)



Slika 22. Otpornost armiranobetonskog zida na ekscentrična, nagnuta djelovanja (prema Bond i Harris, 2008)

Većina temelja izložena je jednostavnim vertikalnim djelovanjima, no temelji armiranobetonskog zida izloženi su ekscentričnim, nagnutim djelovanjima zbog kombinacije vlastite težine zida i horizontalnih sila na vertikalnoj ravnini (P'_a i U_a na slici 23). Ti čimbenici značajno smanjuju nosivost tla i znatno kompliciraju proračun. (Bond i Harris, 2008)

4.4.2. Klizanje

Prema Eurokodu, proračunsko horizontalno djelovanje H_d koje djeluje na virtualnoj ravnini mora biti manje ili jednako sumi proračunske otpornosti (R_d) od tla ispod temelja i bilo kakvih proračunskih otpornosti R_{pd} na bočnoj strani zida (slika 22). To se može zapisati kao:

$$H_d \leq R_d + R_{pd} \quad (14)$$

Ili kao:

$$H_{Ed} \leq H_{Rd} \quad (15)$$

gdje je H_{Ed} proračunski horizontalni učinak djelovanja, a H_{Rd} odgovarajuća ukupna proračunska horizontalna otpornost.

H_{Ed} je dan izrazom:

$$H_{Ed} = H_d = P'_{ad} + U_{ad} \quad (16)$$

gdje su P'_{ad} i U_{ad} proračunske vrijednosti P'_a i U_a (slika 22). Kod **dreniranih uvjeta**, otpornost R_d je dana izrazom:

$$R_d = \frac{(W_{Gd} - U_{Gd}) \cdot \tan \delta_d}{\gamma_{Rh}} = \left(\frac{\gamma_{G, fav} W_{Gk} - \gamma_G U_{Gk}}{\gamma_{Rh}} \right) \cdot \left(\frac{\tan \delta_k}{\gamma_\varphi} \right) \quad (17)$$

gdje su:	W_{Gk}	stalna karakteristična vlastita težina zida (uključujući zasip)
	U_{Gk}	stalan karakterističan uzgon ispod nožice
	δ_k	karakteristični kut trenja na spojnoj površini konstrukcije i temeljnoga tla
	$\gamma_{G, fav}, \gamma_G$	parcijalni koeficijenti za povoljna i nepovoljna djelovanja
	γ_{Rh}	parcijalni koeficijent za otpornost na klizanje
	γ_φ	parcijalni koeficijent za nosivost.

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 nastaje iz istog razloga kao i U_a (slika 23) koji je nepovoljno djelovanje, a zbog dosljednosti bi se za djelovanja nastala iz istog razloga trebali koristiti isti koeficijenti. Ista logika mogla bi se primijeniti na 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, zato se preporučuje na pritisak tla i vlastitu težinu zasipa gledati kao zasebna djelovanja.

Težina dodatnog opterećenja (q) zanemaruje se kod računanja proračunske otpornosti jer je to obično promjenjivo djelovanje i kritičnija situacija nastaje ako ga nema. (Bond i Harris, 2008)

4.4.3. Prevrtnje

Kod provjere otpornosti na prevrtanje proračunski destabilizirajući moment ($M_{Ed,dst}$) koji djeluje u točki „O“ na slici 23. mora biti manji ili jednak odgovarajućem stabilizirajućem momentu ($M_{Ed,stab}$) u istoj točki.

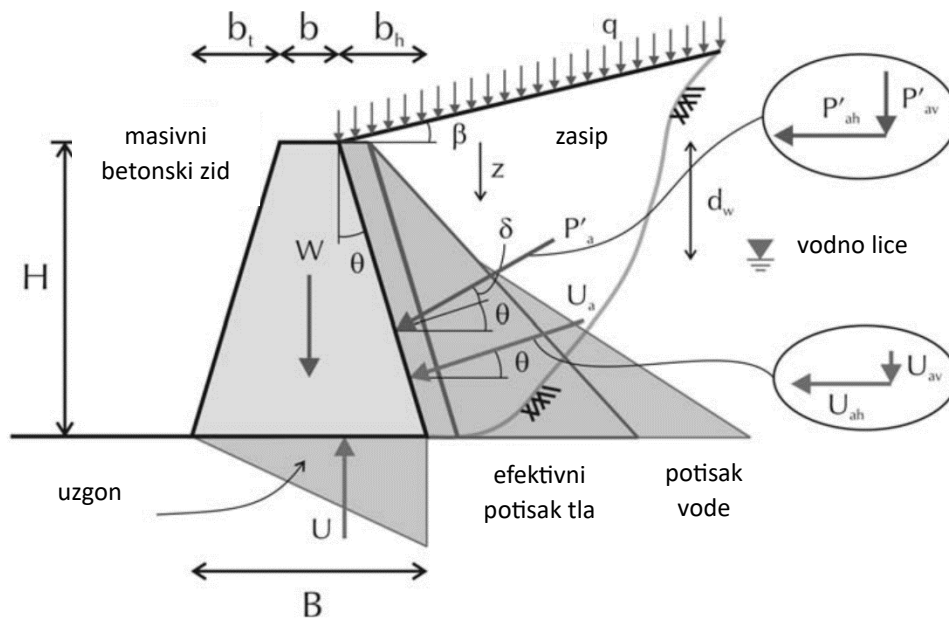
$$M_{Ed,dst} \leq M_{Ed,stab} \quad (18)$$

Sile koje doprinose **destabilizirajućem** momentu jesu efektivni aktivni pritisak tla (P'_a) i pritisak vode (U_a) iza virtualne ravnine te uzgon (U) kao što je prikazano na slici 23. Efektivni pritisak tla trebao bi uključivati i doprinos od dodatnog opterećenja na površini temeljnog tla iza virtualne ravnine.

Sile koje doprinose **stabilizirajućem** momentu jesu vlastite težine trupa zida, nožice i zasipa (W_{trup} , $W_{nožica}$, W_{zasip} na slici 23). Težina dodatnog opterećenja (q) se zanemaruje jer kritičnija situacija nastaje ako ga nema. (Bond i Harris, 2008)

4.5. Gravitacijski masivni zidovi

Na slici 23 prikazan je gravitacijski masivni zid i djelovanja na njega. Pretpostavljeno je dodatno opterećenje q na površini temeljnog tla i vodno lice iznad razine tla. Također je pretpostavljeno da je stražnje lice zida nagnuto za kut θ od vertikale, zbog čega su i efektivni pritisci tla koji djeluju na zid nagnuti. Pojednostavljenje koje je vrijedilo za AB zidove, koje omogućava pojavu Rankinove zone u zasipu iznad stope, ovdje ne vrijedi. (Bond i Harris, 2008)



Slika 23. Potisci tla koji djeluju na gravitacijski masivni zid (prema Bond i Harris, 2008)

Horizontalna komponenta (σ'_{ah}) tlaka tla (σ_a) koji djeluje na stražnjem licu zida na dubini z ispod površine temeljnog tla dana je izrazom (adhezija je zanemarena jer djeluje povoljno):

$$\sigma'_{ah} = K_{ay} \left(\int_0^z \gamma dz - u \right) + K_{aq}q - K_{ac}c' \quad (19)$$

gdje je: K_{ay}, K_{aq}, K_{ac} koeficijenti aktivnih potisaka tla za težinu tla, dodatno opterećenje i efektivnu koheziju

γ zapremninska težina tla

c' efektivna kohezija tla

q dodatno opterećenje na površini temeljnog tla iza stražnjeg lica zida.

lica

Porni tlak koji djeluje na stražnjem licu zida na dubini z ispod površine temeljnog tla dan je izrazom:

$$u = \gamma_w \cdot (z - d_w) \geq 0 \quad (20)$$

gdje je γ_w zapremninska težina vode, a d_w dubina vodnog lica ispod vrha zida.

Horizontalna komponenta (σ_{ah}) ukupnog tlaka tla (σ_a) koji djeluje na stražnjem licu zida na dubini z ispod površine temeljnog tla dana je izrazom:

$$\sigma_{ah} = \sigma'_{ah} + u \quad (21)$$

U dodatku C Eurokoda dani su postupci proračuna koeficijenata aktivnih potisaka tla K_{ay} , K_{aq} , K_{ac} dobivenih iz sljedećih izraza:

$$K_{ay} = K_n \cdot \cos \beta \cdot \cos(\beta - \theta) \quad (22)$$

$$K_{aq} = K_n \cdot \cos^2 \beta \quad (23)$$

$$K_{ac} = (K_n - 1) \cdot \cot \varphi \quad (24)$$

gdje je pomoćni koeficijent K_n funkcija kuta unutarnjeg trenja tla (φ), kuta posmične otpornosti između temeljnoga tla i zida (δ), kuta nagiba temeljnoga tla iza zida (β) te kuta otklona zida od uspravne ravnine (θ).

Pomoću tih jednadžbi dolazimo do izraza za horizontalne komponente (P'_{ah} i U_{ah}) aktivnih efektivnih potisaka tla i vode (P'_a i U_a). H u izrazu predstavlja visinu zida iznad razine tla. Oba djelovanja djeluju nepovoljno za nosivost i klizanje te destabilizirajuće za prevrtanje (slika 24):

$$P'_{ah} = \int_0^H \sigma'_{ah} dz \quad \rightarrow \quad P'_{av} = P'_{ah} \cdot \tan(\theta + \delta) \quad (25)$$

$$U_{ah} = \int_0^H u dz \quad \rightarrow \quad U_{av} = U_{ah} \cdot \tan(\theta + \delta) \quad (26)$$

Vertikalne komponente (P'_{av} i U_{av}) aktivnih efektivnih potisaka tla i vode (P'_a i U_a) određuju se iz horizontalnih komponenata pomoću gore navedenih jednadžbi. Ta djelovanja djeluju nepovoljno za nosivost, povoljno za klizanje i stabilizirajuće za prevrtanje zida. Međutim, ako se držimo principa da se sva djelovanja nastala iz istog izvora faktoriraju jednako, onda na sva djelovanja gledamo kao nepovoljna u sve tri provjere.

Provjere za otpornost na nosivost, klizanje i prevrtanje za gravitacijski masivni zid slične su provjerama za armiranobetonski zid, no vlastita težina gravitacijskoga masivnog zida ne uključuje težinu zasipa. Sve su vertikalne sile nastale od zasipa uračunate u vertikalnu komponentu (P'_{av}) aktivnog potiska tla (P'_a). (Bond i Harris, 2008)

4.5.1. Nosivost

Provjera nosivosti za gravitacijski masivni zid slična je provjeri za armiranobetonski zid. Ukupna proračunska nosivost (q_{Ed}) ispod baze zida dana je izrazom:

$$q_{Ed} = \gamma_G \left(\frac{W_{Gk} + P'_{av,Gk} + U_{av,Gk}}{A'} \right) + \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_i q_{Qk,i} \quad (27)$$

Gdje su: W_{Gk} stalna karakteristična vlastita težina zida

$P'_{av,Gk}$ vertikalna komponenta stalnog karakterističnog aktivnog efektivnog potiska tla

$U_{av,Gk}$ vertikalna komponenta stalnog karakterističnog uzgona

q_{Qk} promjenjivo karakteristično vertikalno dodatno opterećenje na površini temeljnog tla iza zida

A' efektivna površina nožice

γ_G, γ_Q parcijalni koeficijenti stalnih i promjenjivih djelovanja

ψ_i koeficijent kombinacije.

Budući da su vlastite težine zida i zasipa u proračunu nosivosti nepovoljna djelovanja, za karakteristične zapremninske težine uzimaju se gornje vrijednosti.

Efektivna proračunska nosivost (q'_{Ed}) ispod baze zida dana je izrazom:

$$q'_{Ed} = q_{Ed} - \gamma_G \left(\frac{U_{Gk}}{A'} \right) \quad (28)$$

gdje je U_{Gk} stalan karakterističan uzgon ispod baze zida. U tom izrazu uzgon je nepovoljno djelovanje (pomnožen je s γ_G , a ne $\gamma_{G, fav}$). To je zato što dolazi iz istog izvora kao U_{ah} i U_{av} , koja su nepovoljna djelovanja. (Bond i Harris, 2008)

4.5.2. Klizanje

Provjera otpornosti na klizanje za gravitacijski masivni zid slična je provjeri za armiranobetonski zid. Efektivni aktivni potisak tla (P'_a) djeluje nepovoljno kod klizanja, stoga su i njegove komponente (vertikalna $P'_{a,v}$ i horizontalna $P'_{a,h}$) nepovoljna djelovanja, odnosno množe se parcijalnim faktorom γ_G .

Uzgon (U_a) također je nepovoljno djelovanje pa su i njegove komponente (vertikalna $U_{a,v}$ i horizontalna $U_{a,h}$) nepovoljna djelovanja, odnosno množe se parcijalnim faktorom γ_G .

Uzgon ispod zida (U_v) također je nepovoljno djelovanje jer dolazi iz istog izvora. (Bond i Harris, 2008)

4.5.3. Prevrtnje

Provjera otpornosti na prevrtanje za gravitacijski masivni zid je slična provjeri za armiranobetonski zid. (Bond i Harris, 2008)

4.6. Konstrukcijski proračun, nadzor, praćenje i održavanje

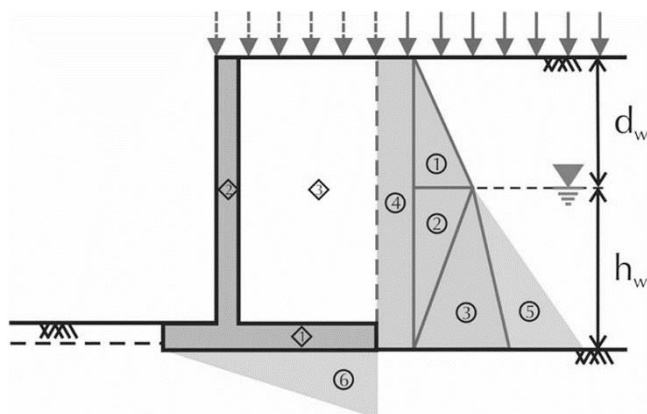
Prema odredbama Eurokoda 2 i 6 mora se provesti provjera za slom građevine kada su u pitanju gravitacijski zidovi. Za detaljne upute o daljnjem proračunu treba se poslužiti nacionalnim normama.

U Eurokodu nisu dane smjernice vezane za nadzor, praćenje i održavanje gravitacijskih zidova. Ne postoje ni izvršne norme koje pokrivaju tu temu, stoga bi praksa i dalje trebala biti temeljena na postojećim nacionalnim normama. (Bond i Harris, 2008)

5. PRIMJER PRORAČUNA GRAVITACIJSKOG ZIDA T OBLIKA

5.1. Primjer proračuna gravitacijskog zida T oblika – proračunski pristup 3

Na primjeru sa *slike 24* prikazana su djelovanja koja utječu na gravitacijski zid.



Slika 24. Djelovanja na gravitacijski zid (Bond i Harris, 2008)

Ispuna i dodatno opterećenje su konstruktivna djelovanja.

Geometrijski parametri

$$\text{Neplanirani iskop} \quad \Delta H = \min(10\% H, 0,5) = \min\left(\frac{3}{10}, 0,5\right) = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Proračunska visina} \quad H_d = H + \Delta H = 3 + 0,3 = 3,3 \text{ m}$$

$$\text{Širina nožice} \quad b = B - t_s - x = 4,3 - 0,25 - 0,5 = 3,55 \text{ m}$$

Djelovanja

Karakteristične vrijednosti djelovanja i momenata nastalih zbog vlastite težine

Baza: $W_{Gk_1} = \gamma_{ck} \cdot B \cdot t_b = 25 \cdot 4,3 \cdot 0,3 = 32,25 \text{ kN/m}$

$$M_{k_1} = W_{Gk_1} \cdot \frac{B}{2} = 32,25 \cdot \frac{4,3}{2} = 69,34 \text{ kNm/m}$$

Trup: $W_{Gk_2} = \gamma_{ck} \cdot t_s \cdot (H + d - t_b) = 25 \cdot 0,25 \cdot (3 + 0,5 - 0,3) = 20 \text{ kN/m}$

$$M_{k_2} = W_{Gk_2} \cdot \left(x + \frac{t_s}{2}\right) = 20 \cdot \left(0,5 + \frac{0,25}{2}\right) = 12,5 \text{ kNm/m}$$

Ispuna: $W_{Gk_3} = \gamma_k \cdot b \cdot (H + d - t_b) = 18 \cdot 3,55 \cdot (3 + 0,5 - 0,3) = 204,48 \text{ kN/m}$

$$M_3 = W_{Gk_3} \cdot \left(x + t_s + \frac{b}{2}\right) = 204,48 \cdot \left(0,5 + 0,25 + \frac{3,55}{2}\right) = 516,31 \text{ kNm/m}$$

Ukupna vlastita težina: $W_{Gk} = \sum W_{Gk} = 32,25 + 20 + 204,48 = 256,73 \text{ kN/m}$

Ukupni stabilizirajući moment: $M_{Ek, stb} = \sum M_k = 69,34 + 12,5 + 516,31 = 598,15 \text{ kNm/m}$

Promjenjivo opterećenje: $Q_{Qk} = q_{Qk} \cdot (B - x) = 10 \cdot (4,3 - 0,5) = 38 \text{ kNm}$

Naprezanja tla na dubini vodnog lica duž virtualne ravnine zida

Ukupna vertikalna naprezanja: $\sigma_{vk,w} = \gamma_k \cdot d_w = 18 \cdot 1,5 = 27 \text{ kN/m}^2$

Porni tlak: $U_w = 0 \text{ kN/m}^2$

Vertikalna efektivna naprezanja: $\sigma'_{vk,w} = \sigma_{vk,w} - U_w = 27 - 0 = 27 \text{ kN/m}^2$

Naprezanja tla na dubini nožice

Ukupna vertikalna naprezanja: $\sigma_{vk,h} = \gamma_k \cdot (H + d) = 18 \cdot (3 + 0,5) = 63 \text{ kN/m}^2$

Visina vodnog lica: $h_w = H + d - d_w = 3 + 0,5 - 1,5 = 2 \text{ m}$

Porni tlak: $U_h = \gamma_w \cdot h_w = 9,8 \cdot 2 = 19,6 \text{ kN/m}^2$

Vertikalna efektivna naprezanja: $\sigma'_{vk,h} = \sigma_{vk,h} - U_h = 63 - 19,6 = 43,4 \text{ kN/m}^2$

Učinci djelovanja

Parcijalni koef,: $\begin{pmatrix} A1 \\ A2 \end{pmatrix} \quad \gamma_G = \begin{pmatrix} 1,35 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \gamma_{G,fav} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \gamma_Q = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 1,3 \end{pmatrix}$

Proračunska vertikalna djelovanja (nepovoljna)

$$\text{Ukupno} \quad V_d = \gamma_G \cdot W_{Gk} + \gamma_Q \cdot Q_{Qk} = 1,35 \cdot 256,73 + 1,5 \cdot 38 = 403,59 \text{ kN/m}$$

$$\text{Uzgon} \quad U_d = \gamma_G \cdot \frac{U_h}{2} \cdot B = 1 \cdot \frac{19,6}{2} \cdot 4,3 = 42,14 \text{ kN/m}$$

$$\text{Efektivno} \quad V'_d = V_d - U_d = 403,59 - 42,14 = 361,45 \text{ kN/m}$$

Proračunska vertikalna djelovanja (povoljna)

$$\text{Ukupno} \quad V_{d, fav} = \gamma_{G, fav} \cdot W_{Gk} = 1 \cdot 256,73 = 256,73 \text{ kN/m}$$

$$\text{Uzgon} \quad U_{d, fav} = \gamma_{G, fav} \cdot \frac{U_h}{2} \cdot B = 1 \cdot \frac{19,6}{2} \cdot 4,3 = 42,14 \text{ kN/m}$$

$$\text{Efektivno} \quad V'_{d, fav} = V_{d, fav} - U_{d, fav} = 256,73 - 42,14 = 214,59 \text{ kN/m}$$

Koeficijent aktivnog potiska tla

$$\gamma_\rho = 1,25 \quad \rho_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\rho_k)}{\gamma_\rho} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(36)}{1,25} \right) = 30,17^\circ$$

$$K_a = \frac{1 - \sin(\rho_d)}{1 + \sin(\rho_d)} = \frac{1 - \sin(30,17)}{1 + \sin(30,17)} = 0,33$$

Proračunsko trenje na virtualnoj ravnini zida i destabilizirajući momenti (oko nožice nasipa)

$$\text{Nesaturirano tlo nasipa} \quad P_{ad_1} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot d_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,33 \cdot 27 \cdot 1,5}{2}\right)} = 9,02 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_1} = P_{ad_1} \cdot \left(h_w + \frac{d_w}{3}\right) = 9,02 \cdot \left(2 + \frac{1,5}{3}\right) = 22,55 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Saturirano tlo nasipa} \quad P_{ad_2} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot h_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,33 \cdot 27 \cdot 2}{2}\right)} = 12,03 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_2} = P_{ad_2} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_w}{3}\right) = 12,03 \cdot \left(\frac{2 \cdot 2}{3}\right) = 16,04 \text{ kNm/m}$$

$$P_{ad_3} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot h_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,33 \cdot 43,4 \cdot 2}{2}\right)} = 19,33 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_3} = P_{ad_3} \cdot \left(\frac{h_w}{3}\right) = 19,33 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 12,89 \text{ kNm/m}$$

$$\text{Opterećenje} \quad P_{ad_4} = \overline{\left[\gamma_Q \cdot K_a \cdot q_{Qk} \cdot (H + d)\right]} = \overline{\left[1,5 \cdot 0,33 \cdot 10 \cdot (3 + 0,5)\right]} = 17,33 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_4} = P_{ad_4} \cdot \left(\frac{H+d}{2}\right) = 17,33 \cdot \left(\frac{3+0,5}{2}\right) = 30,33 \text{ kNm/m}$$

Uzgon

$$U_{ad} = \frac{\gamma_G \cdot U_h \cdot h_w}{2} = \frac{1 \cdot 19,6 \cdot 2}{2} = 19,6 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_5} = U_{ad} \cdot \left(\frac{h_w}{3}\right) = 19,6 \cdot \left(\frac{2}{3}\right) = 13,07 \text{ kNm/m}$$

$$M_{d_6} = U_d \cdot \left(\frac{2}{3}B\right) = 42,14 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 4,3\right) = 120,8 \text{ kNm/m}$$

Ukupno proračunsko horizontalno trenje $H_{Ed} = \left(\sum_{i=1}^4 \overrightarrow{P_{ad_i}}\right) + U_{ad} = 9,02 + 12,03 + 19,33 + 17,33 + 19,6 = 77,31 \text{ kN/m}$

Ukupni proračunski destabilizirajući moment $M_{Ed,dst} = \left(\sum_{i=1}^6 \overrightarrow{M_{d_i}}\right) = 22,55 + 16,04 + 12,89 + 30,33 + 13,07 + 120,8 = 215,68 \text{ kNm/m}$

Otpornost na klizanje

Parcijalni koef,: R3 $\gamma_{Rh} = 1$ $\gamma_{Rv} = 1$

Proračunska drenirana otpornost na klizanje

$$\varphi_{d,fdn} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\varphi_{k,fdn})}{\gamma_\varphi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(26)}{1,25} \right) = 21,32^\circ$$

$$\varphi_{cv,d,fdn} = \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi_d \\ \varphi_{cv,k,fdn} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 30,17^\circ \\ 20^\circ \end{array} \right. = 20^\circ$$

$$\delta_{d,fdn} = k \cdot \varphi_{cv,d,fdn} = 1 \cdot 20^\circ = 20^\circ$$

$$H_{Rd} = \left[\frac{\overline{(V_{d,fdn} - U_d) \cdot \tan(\delta_{d,fdn})}}{\gamma_{Rh}} \right] = \left[\frac{(256,73 - 42,14) \cdot \tan(20^\circ)}{1} \right] = 78,10 \text{ kN/m}$$

Ekscentricitet

Proračunski stabilizirajući moment

$$M_{Ed,stab} = \gamma_G \cdot M_{Ek,stab} + \gamma_Q \cdot Q_{Qk} \cdot \frac{B+x}{2} = 1,35 \cdot 598,15 + 1,5 \cdot 38 \cdot \frac{4,3+0,5}{2} = 944,3 \text{ kNm/m}$$

$$e_b = \left| \left(\frac{B}{2} - \frac{M_{Ed,stab} - M_{Ed,dst}}{V_d - U_d} \right) \right| = \left| \left(\frac{4,3}{2} - \frac{944,3 - 215,68}{403,59 - 42,14} \right) \right| = 0,13 \text{ m}$$

$$e_b \leq \frac{B}{6} = 0,72$$

$$B' = B - 2e_b = 4,3 - 2 \cdot 0,13 = 4,04$$

$$A' = B'$$

Koeficijenti nosivosti - drenirani

$$N_q = \left[e^{(\pi \tan(\varphi_{d,fdn}))} \left(\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_{d,fdn}}{2} \right) \right)^2 \right] = \left[e^{(\pi \tan 21,32^\circ)} \left(\tan \left(45^\circ + \frac{21,32^\circ}{2} \right) \right)^2 \right] = 7,3$$

$$N_c = \left[(N_q - 1) \cdot \cot(\varphi_{d,fdn}) \right] = \left[(7,3 - 1) \cdot \cot(21,32^\circ) \right] = 16,14$$

$$N_\gamma = \left[2(N_q - 1) \cdot \tan(\varphi_{d,fdn}) \right] = \left[2 \cdot (7,3 - 1) \cdot \tan(21,32^\circ) \right] = 4,92$$

Koeficijenti nagiba - drenirani

$$L' = \infty \quad m_b = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = 2 \quad c'_{d,fdn} = \frac{C'_{k,fdn}}{\gamma_c} = \frac{5}{1,25} = 4$$

$$i_q = \overline{\left[1 - \left(\frac{H_{Ed}}{V'_{d+A' \cdot c'_{d,fdn} \cdot \cot(\varphi_{d,fdn})} \right) \right]^{m_b}} = \overline{\left[1 - \left(\frac{77,31}{361,45 + 4,04 \cdot 4 \cdot \cot(21,32^\circ)} \right) \right]^2} = 0,65$$

$$i_c = i_q - \overline{\left[\frac{(1-i_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi_{d,fdn})} \right]} = 0,65 - \overline{\left[\frac{(1-0,65)}{16,14 \cdot \tan(21,32^\circ)} \right]} = 0,59$$

$$i_\gamma = \overline{\left[1 - \left(\frac{H_{Ed}}{V'_{d+A' \cdot c'_{d,fdn} \cdot \cot(\varphi_{d,fdn})} \right) \right]^{m_b+1}} = \overline{\left[1 - \left(\frac{77,31}{361,45 + 4,04 \cdot 4 \cdot \cot(21,32^\circ)} \right) \right]^{2+1}} = 0,53$$

Drenirana nosivost

$$\text{Drenirano preopterećenje na bazi temelja } \sigma'_{vk,b} = \gamma_{k,fdn} \cdot (d - \Delta H) = 22 \cdot (0,5 - 0,3) = 4,4 \text{ kPa}$$

Ukupna otpornost:

$$\text{Preopterećenje: } q_{ult_1} = \overline{(N_q \cdot i_q \cdot \sigma'_{vk,b})} = \overline{(7,3 \cdot 0,65 \cdot 4,4)} = 20,88 \text{ kPa}$$

$$\text{Kohezija: } q_{ult_2} = \overline{(N_c \cdot i_c \cdot c'_{d,fdn})} = \overline{(16,14 \cdot 0,59 \cdot 4)} = 38,09 \text{ kPa}$$

$$\text{Vlastita težina: } q_{ult_3} = \overline{\left[N_\gamma \cdot i_\gamma \cdot (\gamma_{k,fdn} - \gamma_w) \cdot \frac{B'}{2} \right]} = \overline{4,92 \cdot 0,53 \cdot (22^\circ - 9,8^\circ) \cdot \frac{4,04}{2}} = 64,26 \text{ kPa}$$

$$\text{Ukupno: } q_{ult} = \sum_{i=1}^3 q_{ult_i} = 20,88 + 38,09 + 64,26 = 123,23 \text{ kPa}$$

Proračunska otpornost: $q'_{Rd} = \frac{q_{ult}}{\gamma_{Rv}} = \frac{123,23}{1} = 123,23 \text{ kPa}$

Provjere

Drenirano klizanje $H_{Ed} = 77,31 \text{ kN/m}$

$$H_{Rd} = 78,10 \text{ kN/m}$$

$$\Lambda_{GEO,2} = \frac{H_{Ed}}{H_{Rd}} = \frac{77,31}{78,10} = 98,99 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

Drenirana nosivost $q'_{Ed} = \frac{V'_{d}}{B'} = \frac{361,45}{4,04} = 89,47 \text{ kPa}$

$$q'_{Rd} = 123,23 \text{ kN/m}$$

$$\Lambda_{GEO,2} = \frac{q'_{Ed}}{q'_{Rd}} = \frac{89,47}{123,23} = 72,60 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

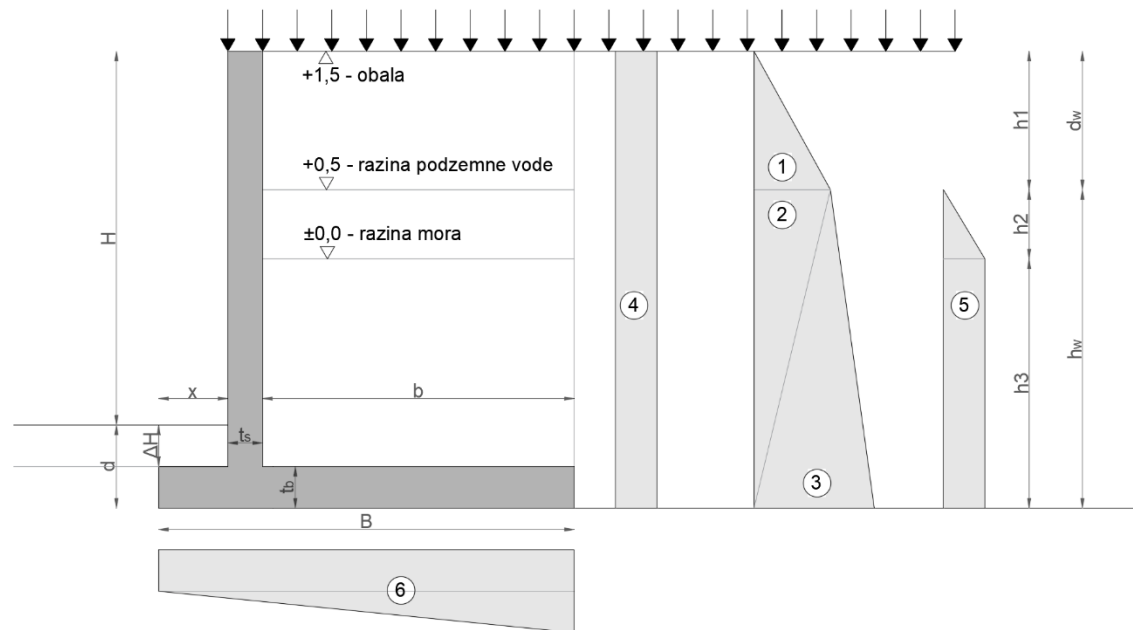
Prevrtanje $M_{Ed,dst} = 215,68 \text{ kNm/m}$

$$M_{Ed,stb} = 944,3 \text{ kNm/m}$$

$$\Lambda_{GEO,2} = \frac{M_{Ed,dst}}{M_{Ed,stb}} = \frac{215,68}{944,3} = 22,84 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

5.2. Primjer proračuna obalnog zida T oblika – proračunski pristup 3

Na primjeru sa *slike 25* prikazana su djelovanja koja utječu na obalni zid,



Slika 25, Djelovanja na obalni zid (izradila autorica)

Ispuna i dodatno opterećenje su konstruktivna djelovanja,

Geometrijski parametri

Neplanirani iskop $\Delta H = \min(10\% H, 0,5) = \min\left(\frac{3}{10}, 0,5\right) = 0,3 \text{ m}$

Proračunska visina $H_d = H + \Delta H = 3 + 0,3 = 3,3 \text{ m}$

Širina nožice $b = B - t_s - x = 3 - 0,25 - 0,5 = 2,25 \text{ m}$

Djelovanja

Karakteristične vrijednosti djelovanja i momenata nastalih zbog vlastite težine

Baza: $W_{Gk_1} = \gamma_{ck} \cdot B \cdot t_b = 25 \cdot 3 \cdot 0,3 = 22,50 \text{ kN/m}$

$$M_{k_1} = W_{Gk_1} \cdot \frac{B}{2} = 22,5 \cdot \frac{3}{2} = 33,75 \text{ kNm/m}$$

Trup: $W_{Gk_2} = \gamma_{ck} \cdot t_s \cdot (H + d - t_b) = 25 \cdot 0,25 \cdot (3 + 0,5 - 0,3) = 20 \text{ kN/m}$

$$M_{k_2} = W_{Gk_2} \cdot \left(x + \frac{t_s}{2}\right) = 20 \cdot \left(0,5 + \frac{0,25}{2}\right) = 12,5 \text{ kNm/m}$$

Ispuna: $W_{Gk_3} = \gamma_k \cdot b \cdot (H + d - t_b) = 18 \cdot 2,25 \cdot (3 + 0,5 - 0,3) = 129,6 \text{ kN/m}$

$$M_3 = W_{Gk_3} \cdot \left(x + t_s + \frac{b}{2}\right) = 129,6 \cdot \left(0,5 + 0,25 + \frac{2,25}{2}\right) = 243 \text{ kNm/m}$$

Ukupna vlastita težina: $W_{Gk} = \sum W_{Gk} = 22,5 + 20 + 129,6 = 172,1 \text{ kN/m}$

Ukupni stabilizirajući moment: $M_{Ek, stb} = \sum M_k = 33,75 + 12,5 + 243 = 289,25 \text{ kNm/m}$

Promjenjivo opterećenje: $Q_{Qk} = q_{Qk} \cdot (B - x) = 5 \cdot (3 - 0,5) = 12,5 \text{ kNm}$

Naprezanja tla na dubini vodnog lica duž virtualne ravnine zida

Ukupna vertikalna naprezanja: $\sigma_{vk,w} = \gamma_k \cdot d_w = 18 \cdot 1 = 18 \text{ kN/m}^2$

Porni tlak: $U_w = 0 \text{ kN/m}^2$

Vertikalna efektivna naprezanja: $\sigma'_{vk,w} = \sigma_{vk,w} - U_w = 18 - 0 = 18 \text{ kN/m}^2$

Naprezanja tla na dubini nožice

Ukupna vertikalna naprezanja: $\sigma_{vk,h} = \gamma_k \cdot (H + d) = 18 \cdot (3 + 0,5) = 63 \text{ kN/m}^2$

Visina vodnog lica: $h_w = H + d - d_w = 3 + 0,5 - 1 = 2,5 \text{ m}$

Porni tlak: $U_h = \gamma_w \cdot h_2 = 10,08 \cdot 0,5 = 5,04 \text{ kN/m}^2$

Vertikalna efektivna naprezanja: $\sigma'_{vk,h} = \sigma_{vk,h} - U_h = 63 - 5,04 = 57,96 \text{ kN/m}^2$

Učinci djelovanja

$$\text{Parcijalni koef,} \quad \begin{pmatrix} A1 \\ A2 \end{pmatrix} \quad \gamma_G = \begin{pmatrix} 1,35 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \gamma_{G, fav} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \gamma_Q = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 1,3 \end{pmatrix}$$

Proračunska vertikalna djelovanja (nepovoljna)

$$\text{Ukupno} \quad V_d = \gamma_G \cdot W_{Gk} + \gamma_Q \cdot Q_{Qk} = 1,35 \cdot 172,1 + 1,5 \cdot 12,5 = 251,09 \text{ kN/m}$$

$$\text{Uzgon} \quad U_d = \gamma_G \cdot B \cdot \gamma_w \cdot \left(h_3 + \frac{h_w - h_3}{2} \right) = 1 \cdot 3 \cdot 10,08 \cdot \left(2 + \frac{2,5 - 2}{2} \right) = 68,07 \text{ kN/m}$$

$$\text{Efektivno} \quad V'_d = V_d - U_d = 251,09 - 68,07 = 183,01 \text{ kN/m}$$

Proračunska vertikalna djelovanja (povoljna)

$$\text{Ukupno} \quad V_{d, fav} = \gamma_{G, fav} \cdot W_{Gk} = 1 \cdot 172,1 = 172,1 \text{ kN/m}$$

$$\text{Uzgon} \quad U_{d, fav} = \gamma_{G, fav} \cdot B \cdot \gamma_w \cdot \left(h_3 + \frac{h_w - h_3}{2} \right) = 1 \cdot 3 \cdot 10,08 \cdot \left(2 + \frac{2,5 - 2}{2} \right) = 68,07 \text{ kN/m}$$

$$\text{Efektivno} \quad V'_{d, fav} = V_{d, fav} - U_{d, fav} = 172,1 - 68,07 = 104,03 \text{ kN/m}$$

Koeficijent aktivnog potiska tla

$$\gamma_\rho = 1,25 \quad \rho_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\rho_k)}{\gamma_\rho} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(40)}{1,25} \right) = 33,87^\circ$$

$$K_a = \frac{1 - \sin(\rho_d)}{1 + \sin(\rho_d)} = \frac{1 - \sin(33,87)}{1 + \sin(33,87)} = 0,28$$

Proračunsko trenje na virtualnoj ravnini zida i destabilizirajući momenti (oko nožice nasipa)

Nesaturirano tlo nasipa $P_{ad_1} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot d_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,28 \cdot 18 \cdot 1}{2}\right)} = 3,45 \text{ kN/m}$

$$M_{d_1} = P_{ad_1} \cdot \left(h_w + \frac{d_w}{3}\right) = 3,45 \cdot \left(2,5 + \frac{1}{3}\right) = 9,78 \text{ kNm/m}$$

Saturirano tlo nasipa $P_{ad_2} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot h_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,28 \cdot 18 \cdot 2,5}{2}\right)} = 8,63 \text{ kN/m}$

$$M_{d_2} = P_{ad_2} \cdot \left(\frac{2 \cdot h_w}{3}\right) = 8,63 \cdot \left(\frac{2 \cdot 2,5}{3}\right) = 14,39 \text{ kNm/m}$$

$$P_{ad_3} = \overline{\left(\frac{\gamma_G \cdot K_a \cdot \sigma'_{vk,w} \cdot h_w}{2}\right)} = \overline{\left(\frac{1,35 \cdot 0,28 \cdot 18 \cdot 2,5}{2}\right)} = 27,80 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_3} = P_{ad_3} \cdot \left(\frac{h_w}{3}\right) = 27,8 \cdot \left(\frac{2,5}{3}\right) = 23,17 \text{ kNm/m}$$

Opterećenje $P_{ad_4} = \overline{\left[\gamma_Q \cdot K_a \cdot q_{Qk} \cdot (H + d)\right]} = \overline{\left[1,5 \cdot 0,28 \cdot 5 \cdot (3 + 0,5)\right]} = 7,46 \text{ kN/m}$

$$M_{d_4} = P_{ad_4} \cdot \left(\frac{H+d}{2}\right) = 7,46 \cdot \left(\frac{3+0,5}{2}\right) = 13,06 \text{ kNm/m}$$

Uzgon

$$U_{ad1} = \frac{\gamma_G \cdot U_h \cdot h_2}{2} = \frac{1 \cdot 5,04 \cdot 0,5}{2} = 1,26 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_{5,1}} = U_{ad1} \cdot \left(h_3 + \frac{h_2}{3} \right) = 1,26 \cdot \left(2 + \frac{0,5}{3} \right) = 2,73 \text{ kNm/m}$$

$$U_{ad2} = \gamma_G \cdot U_h \cdot h_3 = 1 \cdot 5,04 \cdot 2 = 10,08 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_{5,2}} = U_{ad2} \cdot \left(\frac{h_3}{2} \right) = 10,08 \cdot \left(\frac{2}{2} \right) = 10,08 \text{ kNm/m}$$

$$U_{ad3} = \gamma_G \cdot B \cdot \gamma_w \cdot h_3 = 1 \cdot 3 \cdot 10,08 \cdot 2 = 60,51 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_{6,1}} = U_{ad3} \cdot \left(\frac{B}{2} \right) = 60,51 \cdot \left(\frac{3}{2} \right) = 90,76 \text{ kNm/m}$$

$$U_{ad4} = \gamma_G \cdot B \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{h_w - h_3}{2} \right) = 1 \cdot 3 \cdot 10,08 \cdot \left(\frac{2,5 - 2}{2} \right) = 7,56 \text{ kN/m}$$

$$M_{d_{6,2}} = U_{ad4} \cdot \left(\frac{2 \cdot B}{3} \right) = 7,56 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3}{3} \right) = 15,13 \text{ kNm/m}$$

Ukupno proračunsko horizontalno trenje

$$H_{Ed} = \left(\sum_{i=1}^4 \overrightarrow{P_{ad_i}} \right) + U_{ad1} + U_{ad2} = 3,45 + 8,63 + 27,80 + 7,46 + 1,26 + 10,08 = 58,69 \text{ kN/m}$$

Ukupni proračunski destabilizirajući moment

$$M_{Ed,dst} = \left(\sum_{i=1}^6 \overrightarrow{M_{d_i}} \right) = 9,78 + 14,39 + 27,80 + 23,17 + 13,06 + 2,73 + 10,08 + 90,76 + 15,13 = 179,10 \text{ kNm/m}$$

Otpornost na klizanje

Parcijalni koef,: R3 $\gamma_{Rh} = 1$ $\gamma_{Rv} = 1$

Proračunska drenirana otpornost na klizanje

$$\varphi_{d,fdn} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\varphi_{k,fdn})}{\gamma_{\varphi}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(40)}{1,25} \right) = 33,87^{\circ}$$

$$\varphi_{cv,d,fdn} = \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi_d \\ \varphi_{cv,k,fdn} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 33,87^{\circ} \\ 40^{\circ} \end{array} \right. = 33,87^{\circ}$$

$$\delta_{d,fdn} = k \cdot \varphi_{cv,d,fdn} = 1 \cdot 33,87^{\circ} = 33,87^{\circ}$$

$$H_{Rd} = \left[\frac{(V_{d,fav} - U_d) \cdot \tan(\delta_{d,fdn})}{\gamma_{Rh}} \right] = \left[\frac{(172,1 - 68,07) \cdot \tan(33,87^{\circ})}{1} \right] = 69,83 \text{ kN/m}$$

Ekscentricitet

Proračunski stabilizirajući moment

$$M_{Ed,stab} = \gamma_G \cdot M_{Ek,stab} + \gamma_Q \cdot Q_{Qk} \cdot \frac{B+x}{2} = 1,35 \cdot 289,25 + 1,5 \cdot 12,5 \cdot \frac{3+0,5}{2} = 423,3 \text{ kNm/m}$$

$$e_b = \left| \left(\frac{B}{2} - \frac{M_{Ed,stab} - M_{Ed,dst}}{V_d - U_d} \right) \right| = \left| \left(\frac{3}{2} - \frac{423,3 - 179,1}{251,09 - 68,07} \right) \right| = 0,17 \text{ m}$$

$$e_b \leq \frac{B}{6} = 0,50$$

$$B' = B - 2e_b = 3 - 2 \cdot 0,17 = 2,67$$

$$A' = B'$$

Koeficijenti nosivosti - drenirani

$$N_q = \left[e^{(\pi \tan(\varphi_{d,fdn}))} \left(\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi_{d,fdn}}{2} \right) \right)^2 \right] = \left[e^{(\pi \tan 33,87^\circ)} \left(\tan \left(45^\circ + \frac{33,87^\circ}{2} \right) \right)^2 \right] = 28,96$$

$$N_c = \left[(N_q - 1) \cdot \cot(\varphi_{d,fdn}) \right] = \left[(28,96 - 1) \cdot \cot(33,87^\circ) \right] = 41,65$$

$$N_\gamma = \left[2(N_q - 1) \cdot \tan(\varphi_{d,fdn}) \right] = \left[2 \cdot (28,96 - 1) \cdot \tan(33,87^\circ) \right] = 37,53$$

Koeficijenti nagiba - drenirani

$$L' = \infty \quad m_b = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} = 2 \quad c'_{d,fdn} = \frac{C'_{k,fdn}}{\gamma_c} = \frac{0}{1,25} = 0$$

$$i_q = \overline{\left[1 - \left(\frac{H_{Ed}}{V'_{d} + A' \cdot c'_{d,fdn} \cdot \cot(\varphi_{d,fdn})} \right) \right]^{m_b}} = \overline{\left[1 - \left(\frac{58,69}{183,01 + 2,67 \cdot 0 \cdot \cot(33,87^\circ)} \right) \right]^2} = 0,46$$

$$i_c = i_q - \overline{\left[\frac{(1 - i_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi_{d,fdn})} \right]} = 0,65 - \overline{\left[\frac{(1 - 0,46)}{41,65 \cdot \tan(33,87^\circ)} \right]} = 0,44$$

$$i_\gamma = \overline{\left[1 - \left(\frac{H_{Ed}}{V'_{d} + A' \cdot c'_{d,fdn} \cdot \cot(\varphi_{d,fdn})} \right) \right]^{m_b + 1}} = \overline{\left[1 - \left(\frac{58,69}{183,01 + 2,67 \cdot 0 \cdot \cot(33,87^\circ)} \right) \right]^{2+1}} = 0,31$$

Drenirana nosivost

$$\text{Drenirano preopterećenje na bazi temelja } \sigma'_{vk,b} = \gamma_{k,fdn} \cdot (d - \Delta H) = 22 \cdot (0,5 - 0,3) = 4,4 \text{ kPa}$$

Ukupna otpornost:

$$\text{Preopterećenje: } q_{ult_1} = \overline{(N_q \cdot i_q \cdot \sigma'_{vk,b})} = \overline{(28,96 \cdot 0,46 \cdot 4,4)} = 58,79 \text{ kPa}$$

$$\text{Kohezija: } q_{ult_2} = \overline{(N_c \cdot i_c \cdot c'_{d,fdn})} = \overline{(41,65 \cdot 0,44 \cdot 0)} = 0 \text{ kPa}$$

$$\text{Vlastita težina: } q_{ult_3} = \overline{\left[N_\gamma \cdot i_\gamma \cdot (\gamma_{k,fdn} - \gamma_w) \cdot \frac{B'}{2} \right]} = \overline{37,53 \cdot 0,31 \cdot (22^\circ - 10,08^\circ) \cdot \frac{2,67}{2}} = 187,05 \text{ kPa}$$

$$\text{Ukupno: } q_{ult} = \sum_{i=1}^3 q_{ult_i} = 58,79 + 0 + 187,05 = 245,84 \text{ kPa}$$

Proračunska otpornost: $q'_{Rd} = \frac{q_{ult}}{\gamma_{Rv}} = \frac{245,84}{1} = 245,84 \text{ kPa}$

Provjere

Drenirano klizanje $H_{Ed} = 58,69 \text{ kN/m}$

$$H_{Rd} = 69,83 \text{ kN/m}$$

$$\Lambda_{GEO,1} = \frac{H_{Ed}}{H_{Rd}} = \frac{58,6}{69,83} = 84,05 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

Drenirana nosivost $q'_{Ed} = \frac{V'_d}{B'} = \frac{183,01}{2,67} = 68,58 \text{ kPa}$

$$q'_{Rd} = 245,84 \text{ kN/m}$$

$$\Lambda_{GEO,2} = \frac{q'_{Ed}}{q'_{Rd}} = \frac{68,58}{245,84} = 27,90 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

Prevrtanje $M_{Ed,dst} = 179,1 \text{ kNm/m}$

$$M_{Ed,stb} = 423,30 \text{ kNm/m}$$

$$\Lambda_{GEO,3} = \frac{M_{Ed,dst}}{M_{Ed,stb}} = \frac{179,1}{423,3} = 42,31 \% \quad \rightarrow \quad \text{zadovoljeno}$$

5.3. Usporedba rezultata

U *tablici 8* usporedno su prikazani konačni rezultati proračuna potpornog i obalnog zida prema pristupima 1 i 3, uz različite moguće kombinacije.

Tablica 8. Usporedba rezultata proračuna (izradila autorica)

	POTPORNI ZID						OBALNI ZID
	pristup 1		pristup 3				pristup 3
	komb 1 (A1,R1)	komb 2 (A2,R2)	1 - ispunjena i q su konstruktivna djelovanja	2 - ispunjena i q su geotehnička djelovanja	3 - ispunjena je konstruktivno, q je geotehničko djelovanje	4 - ispunjena je geotehničko, q je konstruktivno djelovanje	1 - ispunjena i q su konstruktivna djelovanja
drenirano klizanje ($\Lambda_{GEO,1}$)	98,80 %	82,81 %	99,23 %	82,81 %	96,26 %	85,78 %	84,05 %
drenirana nosivost ($\Lambda_{GEO,2}$)	34,97 %	59,28 %	72,89 %	62,14 %	70,67 %	64,43 %	27,90 %
prevrtanje ($\Lambda_{GEO,3}$)	25,95 %	27,70 %	22,87 %	26,63 %	22,88 %	26,53 %	42,31 %

ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je istražiti različite proračunske pristupe dane u Eurokodu 7 na primjeru potpornog zida te usporediti najkritičniju situaciju s obalnim zidom sličnih dimenzija.

U proračunu prema proračunskom pristupu 3 definirane su četiri kombinacije odabira geotehničkih i konstruktivnih djelovanja te su za svaku provedene provjere za drenirano klizanje, dreniranu nosivost i prevrtanje. Rezultati provjera otpornosti variraju ovisno o tome tretiraju li se djelovanja nastala od ispune nasipa i dodatnog opterećenja kao konstruktivna ili geotehnička. Za otpornost na drenirano klizanje ($\lambda_{GEO,1}$) rezultati se kreću od 82,8 % do 99,2 %, za dreniranu nosivost ($\lambda_{GEO,2}$) od 62,1 % do 72,9 %, a za prevrtanje ($\lambda_{GEO,3}$) od 22,9 % do 26,6 %.

Kada je riječ o dreniranom klizanju ($\lambda_{GEO,1} = 99,2 \%$), dreniranoj nosivosti ($\lambda_{GEO,2} = 72,9 \%$) i prevrtanju ($\lambda_{GEO,3} = 27,7 \%$), usporedbom rezultata vidljivo je da najkritičnija situacija nastaje kada se djelovanja nastala zbog ispune nasipa i dodatnog opterećenja tretiraju kao konstruktivna, prema pristupu 3.

Iz rezultata proračuna potpornog zida prema proračunskom pristupu 1 i pristupu 3 uočeno je da je provjera otpornosti na prevrtanje kritičnija u pristupu 1 ($\lambda_{GEO,3} = 27,7 \%$), u odnosu na pristup 3 ($\lambda_{GEO,3} = 26,6 \%$).

Nakon proračuna prema proračunskom pristupu 3, koji je pokazao najkritičniju situaciju, obalni zid istih dimenzija kao potporni zid nije zadovoljio provjeru na drenirano klizanje. Iz tog razloga su minimalno promijenjeni parametri tla i dimenzije konstrukcije. Usporedbom obalnog zida s novim parametrima i potpornog zida iz primjera vidi se da je i dalje najkritičnija provjera otpornosti na drenirano klizanje ($\lambda_{GEO,1} = 84,1 \%$).

Kako bi se za dane parametre osigurala optimalna iskoristivost i stabilnost konstrukcije, zaključeno je da je najsigurniji proračun onaj po proračunskom pristupu 3, pri čemu se djelovanja zbog ispune nasipa i dodatnog opterećenja tretiraju kao konstruktivna djelovanja.

LITERATURA

- Zajednički istraživački centar Europske komisije, About the EN Eurocodes, <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/about-en-eurocodes>, pristup 12.03.2024.
- Bond Andrew, Harris Andrew, Decoding Eurocode 7, Taylor & Francis, e-Library, 2008.
- Europski propis EN 1997-1-2004, Eurokod 7 – Geotehničko projektiranje
- Hrvatska norma HRN EN 1997-1:2012/NA, Eurokod 8: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak
- Zajednički istraživački centar Europske komisije, Eurocode 7 – Geotechnical design, <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-7-geotechnical-design>, pristup 13.03.2024.